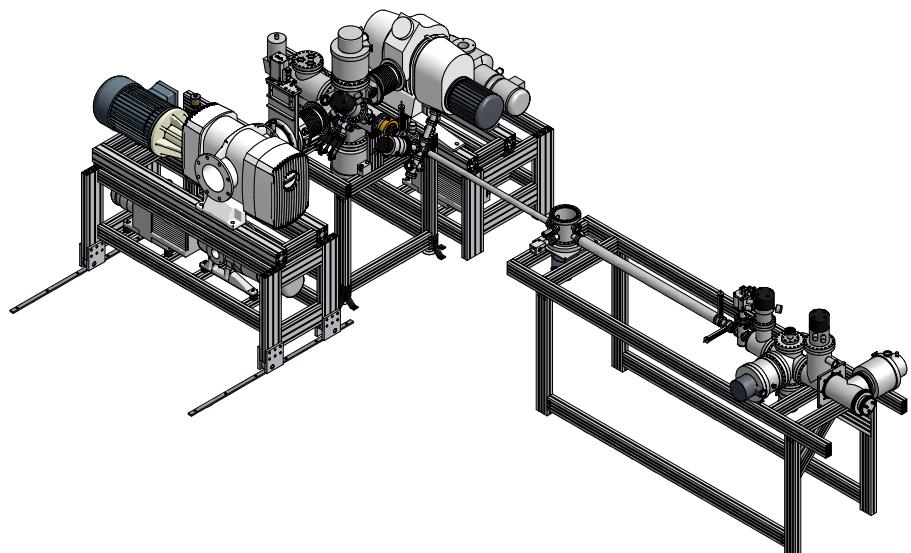


Bachelorarbeit

*Optimierungsarbeiten am  
Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2  
– ein Prototyp für das  $\bar{P}ANDA$ -Experiment*

*Improvements on the  
Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2  
– a Prototype for the  $\bar{P}ANDA$ -Experiment*



vorgelegt von  
**Ann-Katrin Hergemöller**  
~ Juli 2010 ~



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Das <math>\bar{\text{P}}\text{ANDA}</math>-Experiment am zukünftigen Forschungs- und Beschleunigerzentrum FAIR</b>	<b>5</b>
2.1 Das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment . . . . .	5
2.2 Der $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor . . . . .	7
2.3 Die Ziele des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiments . . . . .	9
<b>3 Das Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2</b>	<b>13</b>
3.1 Anforderungen an ein internes Target für das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment . . . . .	13
3.2 Der Aufbau des Münsteraner Cluster-Jet Targets MCT2 . . . . .	14
3.2.1 Die Clusterquelle des MCT2 . . . . .	15
3.2.2 Die Streukammer des MCT2 . . . . .	22
3.2.3 Der Auffänger des MCT2 . . . . .	23
3.3 Das Vakuum-System des MCT2 . . . . .	25
<b>4 Allgemeine Optimierungsarbeiten am Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2</b>	<b>31</b>
4.1 Verbesserungen der Schrittmotorsysteme . . . . .	31
4.1.1 Die Mechanik des Monitorsystems in der Streukammer . . . . .	32
4.1.2 Die Mechanik zur Verschiebung von Skimmer und Kollimator . . . . .	37
4.1.3 Belastungstest der Schiebedurchführung . . . . .	45
<b>5 Systematische Untersuchungen des schlitzförmigen Clusterstrahls</b>	<b>49</b>
5.1 Erste Messungen des Clusterstrahls in der Streukammer . . . . .	50

*Inhaltsverzeichnis*

---

5.2 Untersuchungen des maximalen Druckanstieges in der Streukammer . . . . .	54
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>63</b>
<b>A Anhang</b>	<b>67</b>
A.1 Luminosität und Flächendichte . . . . .	67
A.2 Funktionsweise der verwendeten Vakuumpumpen . . . . .	69
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>76</b>

# 1 Einleitung

In der Natur gibt es vier fundamentale Kräfte: die Gravitation, die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung. Die starke Wechselwirkung ist für den Zusammenhalt der Quarks und als Restwechselwirkung für die Bindung der Nukleonen im Atomkern verantwortlich. Quarks gelten neben den Leptonen bisher als fundamentale Bausteine der Materie. Farbneutrale Quarksysteme werden als Hadronen bezeichnet und lassen sich in Baryonen und Mesonen klassifizieren. Baryonen sind Teilchen, die aus drei Quarks aufgebaut sind. Mesonen bestehen aus einem Quark-Antiquark-Paar. Die Theorie, die die Wechselwirkungen der Quarks untereinander beschreibt, ist die Quantenchromodynamik. Sie erlaubt neben den Baryonen und Mesonen auch exotische farbneutrale Zustände, wie Hybride und Glueballs. Hybride sind Mesonen mit einem gluonischen Freiheitsgrad und als Glueballs werden farbneutrale Zustände bezeichnet, die nur aus Gluonen bestehen. Diese exotischen Teilchen werden experimentell zugänglich, indem man an Teilchenbeschleunigern geladene Teilchen auf annähernd Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und mit den Teilchen eines Targets zur Kollision bringt. Die Kollision von einem Teilchen mit seinem dazugehörigen Antiteilchen wird als Annihilation bezeichnet. Diese besitzt gegenüber der reinen Teilchenkollision den Vorteil, dass neben der kinetischen Energie auch die Ruheenergie der Teilchen zur Teilchenproduktion zur Verfügung steht. Somit werden die Energiebereiche zugänglich, bei der exotische Zustände zu erwarten sind.

## 1 Einleitung

---

Die Suche und Erzeugung dieser exotischen Zustände wird ein Schwerpunkt des  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ <sup>1</sup>-Experimentes sein. Das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment wird am neuen Forschungs- und Beschleunigerzentrum FAIR<sup>2</sup>, das am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt errichtet wird, stattfinden. Zur Erzeugung bekannter und exotischer Teilchen wird dabei ein beschleunigter Antiprotonenstrahl mit einem Protonentarget wechselwirken. Dabei kommt es zur Annihilation der beiden Teilchen, wodurch bekannte und exotische Teilchen erzeugt und im  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor detektiert werden.

Das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment ist ein Fixed-Target-Experiment, bei dem ein internes Target verwendet wird. Dabei befindet sich das Target im Vergleich zum Beschleunigerstrahl annähernd in Ruhe und direkt im Speicherring, sodass die Teilchen des Beschleunigerstrahls, die nicht mit dem Target wechselwirken, für den nächsten Umlauf zur Verfügung stehen. Bei Fixed-Target-Experimenten muss ein Kompromiss zwischen einer hohen Ereignisrate und einer niedrigen Beeinflussung des Beschleunigerstrahls in Abhängigkeit von der eingesetzten Targetdichte gefunden werden. Die Größe, die den Zusammenhang zwischen Targetdichte, Ereignisrate und Beschleunigerstrahlintensität darstellt, ist die Luminosität. Die Betrachtung der maximalen Luminosität hat für das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment eine Targetdichte im Bereich von  $10^{15} \frac{\text{Atome}}{\text{cm}^2}$  am Wechselwirkungspunkt ergeben. Die Targetquelle muss sich für das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment außerhalb des Detektors befinden, damit dieser einen Raumwinkel von  $4\pi$  abdecken kann. Das bedeutet, dass sich die Targetquelle 2,1 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt befinden muss. Auf Grund dieser zwingenden Eigenschaften, sind für das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment zwei Targets geplant: das Cluster<sup>3</sup>-Jet Target und das Pellet<sup>4</sup>-Target.

An der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster wurde der Prototyp eines Cluster-Jet Targets für das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment im Jahr 2008 erfolgreich in Betrieb genommen. Das Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2 wurde bereits komplett in  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Geometrie errichtet. Der Clusterstrahl des MCT2 besitzt am Wechselwirkungspunkt in 2,1 m

---

<sup>1</sup>AntiProtonen **A**Nnihilation at **D**Armstadt

<sup>2</sup>**F**acility for **A**ntiproton and **I**on **R**esearch

<sup>3</sup>Cluster bestehen aus  $n$  Teilchen, die durch die Van-der-Waals-Kraft gebunden werden.

<sup>4</sup>Pellets sind gefrorene Flüssigkeitströpfchen.

---

Entfernung zur Quelle eine Dichte von  $10^{15}$  Atome/cm<sup>2</sup> bei einer Clusterstrahlbreite von 15 mm und erfüllt den gewünschten Bereich der Targetdichte. Das MCT2 ist das weltweit einzige Cluster-Jet Target, das eine so hohe Dichte in einer solchen Entfernung zur Quelle vorweisen kann.

Ziel dieser Arbeit ist es, einige Optimierungen am Aufbau des Targets durchzuführen, um einen optimalen und kontinuierlichen Betrieb des Targets während des  $\bar{P}$ ANDA-Experiments zu gewährleisten.

Außerdem soll die räumliche Ausdehnung des Clusterstrahls am Wechselwirkungspunkt mit dem Antiprotonenstrahl so gering wie möglich gehalten werden, um eine Erhöhung der Lebensdauer des Antiprotonenstrahls durch Minimierung möglicher Untergrundreaktionen zu erzielen. Dazu wird eine Blende mit schlitzförmiger Öffnung, der sogenannte Kollimator, eingesetzt. Der damit geformte Clusterstrahl wird im Rahmen dieser Arbeit auf seine Eigenschaften hin untersucht.



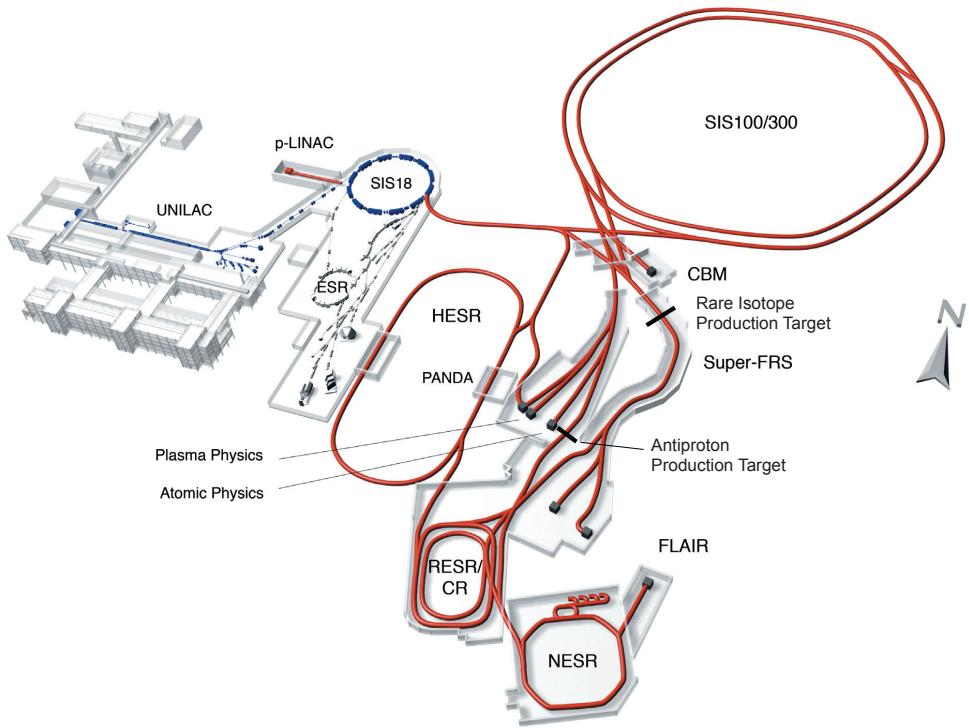
## 2 Das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment am zukünftigen Forschungs- und Beschleunigerzentrum FAIR

Um einen tieferen Einblick in die Struktur der Materie und des Universums zu erhalten, wird am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt das neue Beschleunigerzentrum FAIR errichtet. Dieses erweitert die bestehende Beschleunigeranlage für Ionenstrahlen und ermöglicht durch ein Doppelring-Konzept den zeitgleichen Betrieb mehrerer Experimente mit unterschiedlichen Ionensorten [WDP06]. Eines der geplanten Experimente am FAIR ist das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment, das sich mit Fragen der Kern- und Hadronenphysik beschäftigt. Der Aufbau und die Ziele dieses Experimentes sowie der Aufbau der neuen Beschleunigeranlage FAIR werden in diesem Kapitel erläutert.

### 2.1 Das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment

Das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment ist eines von vielen Experimenten, das zukünftig am neuen internationalen Forschungs- und Beschleunigerzentrum FAIR durchgeführt wird. FAIR wird als Erweiterung an die bereits bestehende Beschleunigeranlage der GSI Darmstadt angegliedert. Der Aufbau des Bechleunigerkomplexes ist in Abbildung 2.1 gezeigt. Die Elemente der bereits bestehenden Anlage, der Linearbeschleuniger UNILAC und

der Schwerionen-Synchrotron SIS18 dienen zusammen mit einem neuen Protonen-Linearbeschleuniger p-LINAC als Injektor für die neue Beschleunigeranlage. Diese besteht aus einem Doppelring-Beschleuniger SIS100/300. Er wird in einer Tiefe von etwa 10 bis 13 m mit einem Umfang von 1100 m gebaut werden und bildet damit den Kern der neuen Anlage. Daran schließen sich ein Supraleitender-Fragmentspeicher Super-FSR und die Speicherringe CR (Collector-Ring), RESR (Recycled Experimental Storage-Ring), NESR (New Experimental Storage-Ring) und HESR (High Energy Storage-Ring) an. An den Speicherringen befinden sich die Experimentierstationen, unter anderem das  $\bar{P}$ ANDA-Experiment am HESR.



**Abbildung 2.1:** Die zukünftige Beschleunigeranlage FAIR [FAI06]. Zum Neubau gehören der p-LINAC, das SIS100/300, die Experimentierstationen CBM (Compressed Baryonic Matter), FLAIR (Facility of Low Energy Antiproton Ion Research),  $\bar{P}$ ANDA und die Speicherringe CR, ESR, HESR, NESR (rot dargestellt).

Die Vorteile der neuen Beschleunigeranlage FAIR liegen darin, dass durch das Doppelring-Konzept Strahlenergien von bis zu 30 GeV pro Nukleon erreicht werden können und die Ionenstrahlen von Protonen bis hin zu Uran möglich sein werden. Zudem können parallel mehrere Experimente mit unterschiedlichen Ionensorten durchgeführt werden.

Das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment findet am Hochenergie-Speicherring HESR statt. Dabei werden vornehmlich Antiprotonen auf ein stationäres, internes Protonen-Target geschossen [oC05]. Proton und Antiproton werden dabei zur Kollision gebracht und annihilieren. Durch die dabei freiwerdende Energie können neue Teilchen entstehen und detektiert werden. Der Vorteil der Annihilation im Gegensatz zu Teilchen-Teilchen-Stößen liegt darin, dass auch die Ruheenergie der Stoßpartner zur Teilchenproduktion zur Verfügung steht. Auch wenn das Antiproton einen Impuls von 0 GeV/c besitzt, wird auf Grund der Ruhemasse des Protons von  $0,9 \text{ GeV}/c^2$  bei einer Annihilation eine Energie von etwa 1,8 GeV frei. Zur Produktion der Antiprotonen für das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment werden Primärprotonen vom p-LINAC und SIS18 vorbeschleunigt und an das SIS100 übergeben, in dem sie auf eine Energie von 29 GeV [FAI06] beschleunigt werden (Schwellenenergie 5,6 GeV [Hin08]). Die so beschleunigten Protonen treffen dann auf ein Iridium-Target, wobei durch Streuung mit den Protonen der Iridium-Kerne Antiprotonen entstehen, gemäß

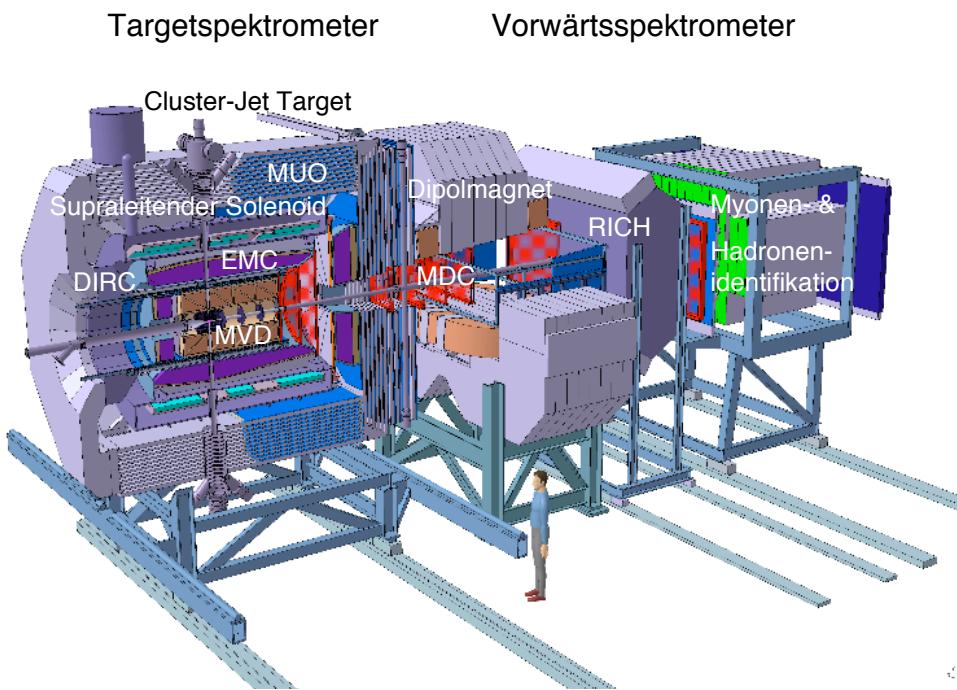
$$p+p \rightarrow p+p+p+\bar{p} .$$

Die so gewonnenen Antiprotonen werden gekühlt und in den HESR injiziert. Dort können Strahlenimpulse zwischen 1,5 GeV/c und 15 GeV/c erreicht werden [KTB05].

## 2.2 Der $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor

Die durch die Annihilation von Proton und Antiproton neu entstehenden Teilchen können mit dem  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor nachgewiesen werden. Abbildung 2.2 zeigt einen seitlichen Querschnitt des Detektors. Im Wesentlichen besteht der  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor aus zwei Spektrometern, dem Vorwärts- und dem Targetspektrometer [oC05]. Da es sich um ein

Fixed-Target-Experiment handelt und die Impulserhaltung gelten muss, wird sich der größte Teil der entstehenden Teilchen in dieselbe Richtung wie der Antiprotonenstrahl bewegen. Der Vorwärtsdetektor ist daher so konstruiert, dass die Teilchen detektiert werden, die unter einem vertikalen Winkel von bis zu  $5^\circ$  und einem horizontalen Winkel von bis zu  $10^\circ$  emittiert werden. Beide Detektoren bestehen aus mehreren unterschiedlichen Detektorschichten, die den Nachweis verschiedenster Teilchen und die Rekonstruktion ihrer Spuren ermöglichen.



**Abbildung 2.2:** Der  $\bar{P}$ ANDA-Detektor. Er kann in Target- und Vorwärtsspektrometer eingeteilt werden und enthält folgende Komponenten: DIRC (Detector for Internally Reflected Cherenkov Light) für die Identifikation geladener Teilchen, MUO (MUOn Detector) zur Detektion von Myonen, EMC (ElectroMagnetic Calorimeter) zur Detektion von Photonen, die aus Zerfällen von Elektronen und neutralen Teilchen stammen, MVD (Micro-Vertex-Detector) zur Identifikation von Nebenvertices und Rekonstruktion von Zerfällen extrem kurzlebiger Teilchen, MDC (Mini-Drift Chamber) für die Spurrekonstruktion geladener Teilchen, RICH (Ring Imaging CHerenkov) für die Identifikation geladener Teilchen. Außerhalb des Detektors befindet sich das geplante Cluster-Jet Target. [oC05]

## 2.3 Die Ziele des $\bar{\text{P}}\text{ANDA-Experiments}$

Die hauptsächliche Zielsetzung des  $\bar{\text{P}}\text{ANDA-Experiments}$  liegt darin, ein tieferes Verständnis der starken Wechselwirkung, deren grundlegende Theorie die Quantenchromodynamik (QCD) ist, zu erhalten. Die wesentlichen Forschungsschwerpunkte werden im Folgenden kurz erläutert.

### Charmonium-Spektroskopie

Das Charmonium ist ein gebundener Zustand aus einem  $\bar{c}$ - und einem  $c$ -Quark. Allgemein werden Zustände aus Quark und dem zugehörigen Antiquark als Quarkonia bezeichnet. Die Quarkonia stellen in der Quantenchromodynamik ein Analogon zum Positronium dar. Die niedrigen Charmoniumzustände sind bei entsprechender Energiesaklierung denen des Positroniums sehr ähnlich [BP08]. Die gebundenen Zustände aus Quark und Antiquark werden jedoch nicht nur durch die elektromagnetische, sondern vor allem durch die starke Wechselwirkung zusammengehalten. Um Charmonium zu erzeugen, wurde in früheren Experimenten häufig die  $e^-e^+$ -Annihilation genutzt:

$$e^-e^+ \rightarrow \gamma^* \rightarrow c\bar{c}$$

Dabei können jedoch nur Zustände des Charmoniums mit den Quantenzahlen des Photons ( $J^{PC} = 1^{--}$ ) erzeugt werden. Dies liegt daran, dass die Erzeugung des Charmoniums über ein virtuelles Photon erfolgt. Geschieht die Charmonium-Erzeugung hingegen über eine  $p\bar{p}$ -Annihilation, können Anfangszustände mit beliebigen Quantenzahlen entstehen. Seit der Entdeckung des ersten Charmoniumzustandes, genannt  $J/\Psi$ , im Jahr 1974 sind die übrigen Zustände des Charmoniums unterhalb der doppelten D-Mesonenmasse ( $m(D\bar{D})$ ) recht gut erforscht. Das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA-Experiment}$  soll die Kenntnisse über diese Zustände präzisieren und vervollständigen, sowie die Charmoniumzustände in den höheren Massenbereichen, die von der Quantenchromodynamik vorhergesagt werden, erforschen [FAI05].

### **Spektroskopie von Zuständen mit gluonischen Freiheitsgraden**

Neben den farbneutralen hadronischen Zuständen erlaubt die Quantenchromodynamik auch exotische Zustände. Beispiele dafür sind Hybride oder Glueballs. Als Hybrid bezeichnet man Mesonen (Quark-Antiquark-Paar) mit einem zusätzlich angeregten gluonischen Freiheitsgrad. Glueballs sind farbneutrale Teilchen, die ausschließlich aus Gluonen bestehen und über die starke Wechselwirkung zerfallen. Diese exotischen hadronischen Zustände besitzen Quantenzahlen, die nicht durch  $qqq$ - bzw  $q\bar{q}$ - Kombinationen erreicht werden können [FAI05]. Glueballs und Hybride konnten bisher noch nicht eindeutig nachgewiesen werden. Es gibt jedoch bereits Hinweise auf die Existenz des Glueball-Grundzustandes [oC09]. Mit dem  $\bar{P}$ ANDA-Experiment wird es möglich sein, Zustände in höheren Massenbereichen zu erzeugen und durch deren Untersuchung an die bisherigen Forschungsergebnisse anzuknüpfen.

### **Spektroskopie doppelter Hyperkerne**

Hyperkerne sind Kerne, die neben den Protonen und Neutronen auch Hyperonen als Bestandteile besitzen. Hyperonen sind wiederum Baryonen, die mindestens ein s-Quark enthalten. Die Hyperkerne bezeichnet man, je nach Anzahl der s-Quarks, als  $\Lambda$ -,  $\Sigma$ -Hyperon mit je einem,  $\Xi$ -Hyperon mit zwei und  $\Omega$ -Hyperon mit drei Strange-Quarks. Mit dem  $\bar{P}$ ANDA-Experiment sollen durch die Erzeugung von Doppelhyperkernen die Nukleon-Hyperon- und die Hyperon-Hyperon-Wechselwirkung erforscht werden. Die genaue Untersuchung der doppelten Hyperkerne erfolgt durch hochauflösende  $\gamma$ -Spektroskopie [oC09].

### **Untersuchung von Charmzuständen in Kernen**

Bestimmt man die Masse eines Hadrons und vergleicht diese mit der Masse der Quarks, aus denen es zusammengesetzt ist, so ist eine Massendifferenz zu beobachten. Die Masse

des Hadrons ist vielfach größer als die der Konstituentenquarks. Dieser Effekt ist auf die Brechung der chiralen Symmetrie in der hadronischen Materie zurückzuführen [oC09]. Diese Symmetrie kann zum Teil wieder hergestellt werden, wenn sich die Hadronen in Kernmaterie befinden. Untersucht man freie Hadronen und Hadronen, die sich in der Kernmaterie befinden, so sind Massenverschiebungen festzustellen [FAI05]. Das  $\bar{P}$ ANDA-Experiment wird es ermöglichen diesen Effekt nicht nur bei Mesonen, die aus den drei leichtesten Quarks (uds) bestehen, sondern auch bei Charm-Mesonen zu untersuchen, die sich in Kernmaterie befinden.



### 3 Das Münsteraner Cluster-Jet Target

#### MCT2

Das Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2 ist der Prototyp für das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment und wurde im Jahr 2008 aufgebaut. In diesem Kapitel wird zunächst auf allgemeine Anforderungen an ein Target für das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment eingegangen. Desweiteren werden der Aufbau des Targets und der Prozess der Clusterbildung erläutert und abschließend das Vakuumsystem des Münsteraner Cluster-Jet Targets beschrieben.

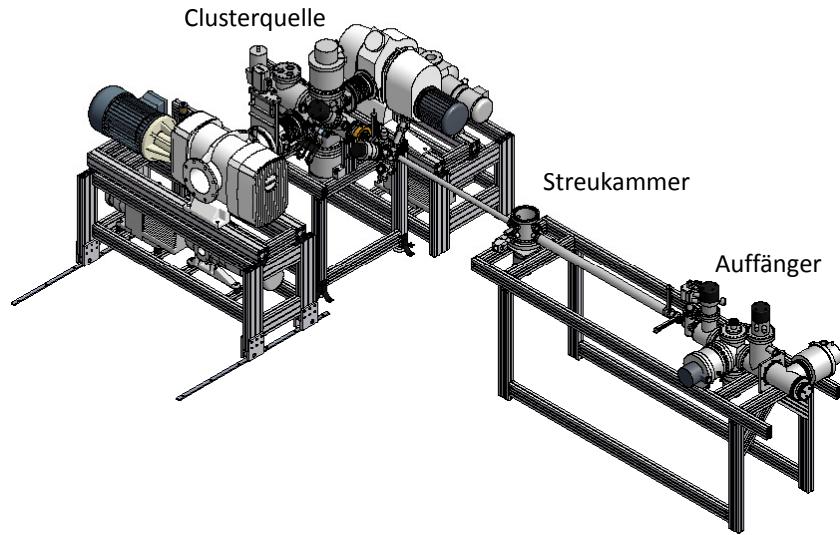
##### 3.1 Anforderungen an ein internes Target für das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment

Beim  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment handelt sich um ein Fixed-Target-Experiment, bei dem ein internes Target verwendet werden wird. Das Target wird sich direkt im Speicherring befinden, also in der Bahn der dort beschleunigten Teilchen. Da nur ein geringer Teil des Beschleunigerstrahls mit dem internen Target wechselwirkt, hat das den Vorteil, dass die Teilchen, die nicht direkt mit dem Target wechselwirken, für den nächsten Umlauf zur Verfügung stehen. Der umlaufende Teilchenstrahl bekommt beim Durchlaufen des Targets eine zunehmende Impulsverschmierung, die beim HESR jedoch durch verschiedene Strahlkühlmechanismen (stochastische und Elektronenkühlung) kompensiert werden kann [oC05].

Das interne Target für das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment muss einige grundlegende Eigenschaften erfüllen. Die Quelle des Targets muss sich außerhalb des Detektors befinden, damit dieser einen Raumwinkel von  $4\pi$  um den Wechselwirkungspunkt abdecken kann (vgl. Abbildung 2.2). Das bedeutet für das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment, dass sich die Targetquelle in einem Abstand von 2,1 m zum späteren Wechselwirkungspunkt befinden muss. Das Target sollte möglichst homogen sein und trotz der großen Entfernung zur Quelle eine geringe räumliche Ausdehnung besitzen, damit der Hauptwechselwirkungspunkt bekannt ist und eine genaue Spurrekonstruktion stattfinden kann. Außerdem sollte das Target das Vakuum im Bereich um den Wechselwirkungspunkt nicht stark beeinflussen. Dadurch könnten vermehrt Reaktionen außerhalb des vorgesehenen Wechselwirkungspunktes auftreten. Zudem sollen neben Wasserstoff verschiedene Gase, wie zum Beispiel Deuterium, Stickstoff oder Argon, als Targetmaterial verwendet werden können. Interne Targets haben typischerweise eine Flächendichte im Bereich von  $10^{12} - 10^{18} \frac{\text{Atome}}{\text{cm}^2}$ . Um eine möglichst geringe Beeinflussung des Beschleunigerstrahls, aber dennoch eine geeignet hohe Ereignisrate zu erhalten, muss die Flächendichte des  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Targets etwa  $4 \cdot 10^{15} \frac{\text{Atome}}{\text{cm}^2}$  betragen (s. Anhang). Um die oben genannten Eigenschaften bestmöglich zu erfüllen, eignen sich zwei Targetarten, die auch zukünftig am  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment eingesetzt werden: das Cluster-Jet Target und das Pellet-Target. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Cluster-Jet Target näher untersucht, dessen Prototyp für das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment an der Universität Münster aufgebaut wurde.

## 3.2 Der Aufbau des Münsteraner Cluster-Jet Targets MCT2

Allgemein lässt sich der Aufbau des Münsteraner Cluster-Jet Targets MCT2 in drei Bereiche unterteilen: die Clusterquelle, die Streukammer und der Auffänger. Der Aufbau des MCT2 ist in Abbildung 3.1 gezeigt. Auf die einzelnen Hauptkomponenten wird im Folgenden näher eingegangen.



**Abbildung 3.1:** Aufbau des Münsteraner Cluster-Jet Targets MCT2. Links befindet sich die Clusterquelle und die Pumpstände der Skimmerkammer; in der Mitte ist die Streukammer zu sehen und rechts der Auffänger. Das Target hat eine Gesamtlänge von etwa 5,5 m

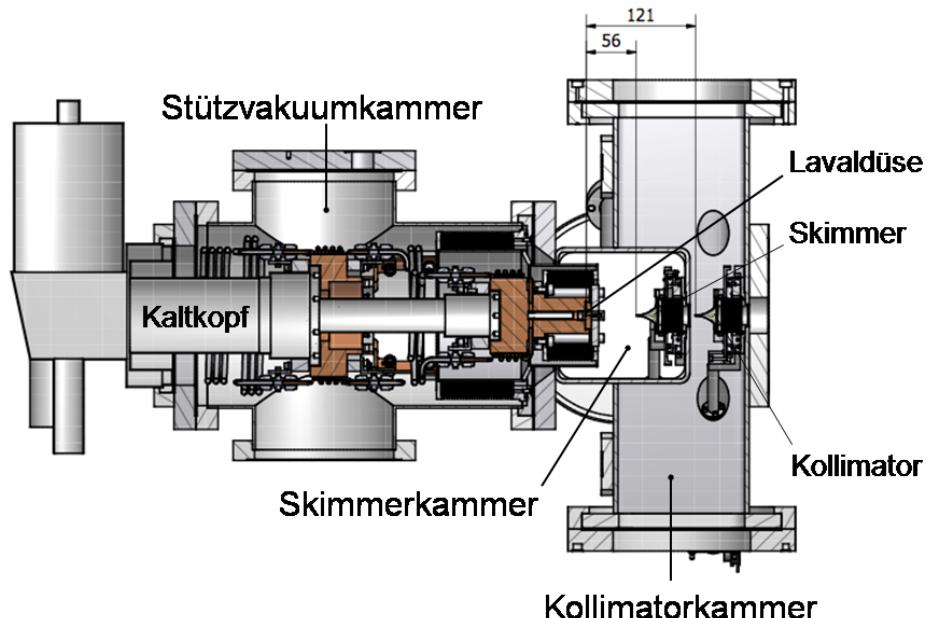
### 3.2.1 Die Clusterquelle des MCT2

Abbildung 3.2 zeigt den schematischen Aufbau der Clusterquelle. Sie besteht im Wesentlichen aus der Stützvakuumkammer, der Skimmer- und der Kollimatorkammer. Skimmer und Kollimator dienen der Extraktion und Formgebung des Clusterstrahls (s.u.). Damit Wasserstoffcluster in der Quelle erzeugt werden können, wird zunächst Wasserstoff der Reinheit 5.0 durch einen Wasserstoffreiniger geleitet. Verunreinigungen haften an der Palladiummembran des Reinigers, die auf etwa 300 °C aufgeheizt wird. Dadurch gelangt Wasserstoff der Reinheit 9.0 zur Quelle. Ein Zufrieren durch Verunreinigung der Lavaldüse, die für den Clusterbildungsprozess verantwortlich ist und einen minimalen Durchmesser im Mikrometerbereich besitzt, wird dadurch vermieden. Der Druck (max.

### 3 Das Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2

---

24 bar) und der Durchfluss (max. 5  $\ell\text{m}/\text{min}$ ) können durch Regler der Firma Brooks Instruments gemessen und variiert werden. Das zur Clusterquelle geleitete Wasserstoffgas wird durch einen Kaltkopf und einem zugehörigen Kompressor der Firma Leybold herunter gekühlt. Der Kompressor verdichtet in einem geschlossenen Helium-Kreislauf das Gas, das im Kaltkopf entspannt wird, wodurch eine Temperatursenkung eintritt. Der eingesetzte Kaltkopf 10MD der Firma Leybold ist ein zweistufiger Kaltkopf, der eine warme und eine kalte Stufe besitzt (s. Abschnitt A.2).



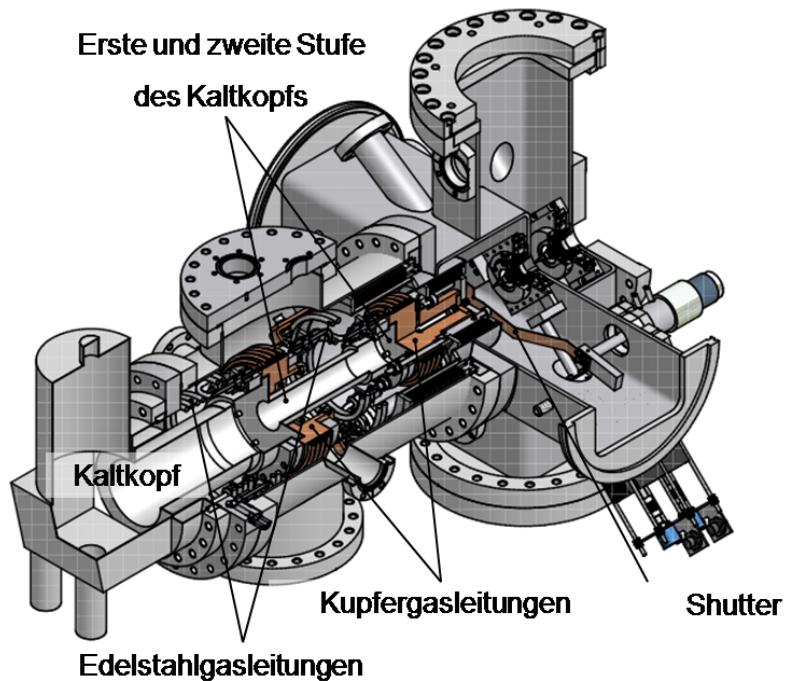
**Abbildung 3.2:** Schnitt durch die Clusterquelle des MCT2 mit dem Kaltkopf, der Stützvakuum-, Skimmer- und Kollimatorkammer. Der Abstand zwischen Lavaldüse und Skimmer beträgt etwa 5,6 cm, zwischen Skimmer und Kollimator 6,5 cm.

Das Wasserstoffgas wird in Kupferleitungen mehrmals um die beiden Stufen des Kaltkopfes geführt (vgl. Abbildung 3.3). Die Kupferleitungen haben eine bessere Wärmeleitfähigkeit<sup>1</sup> als zum Beispiel Edelstahlleitungen, die sonst als Gasleitungen verwendet werden. An die zweite Stufe des Kaltkopfes schließt sich die Lavaldüse an, die in einem Kupferblock eingelassen ist. Beide sind durch einen Indiumring mit einem Außendurchmesser von 18 mm und einem Innendurchmesser von 10 mm abgedichtet und werden ebenfalls durch den Kaltkopf gekühlt. Vor der Düse befindet sich zusätzlich ein Sinterfilter (Porengröße 20 µm), der grobe Verunreinigungen, die zum Beispiel durch Wartungsarbeiten in die Gasleitungen gelangen könnten, herausfiltert, um einen Verschluss der Düse zu verhindern. Durch eine Temperaturdiode, die sich im Kupferblock befindet, kann die Gastemperatur gemessen werden. Um eine konstante Temperatur zur Clusterproduktion zu gewährleisten, wird ein Temperaturregler vom Model 331 der Firma Lakeshore eingesetzt. Dieser steuert eine Heizpatrone (max. 25 W), die sich im Kupferblock des Kaltkopfes befindet. Zur Messung des statischen Gasdrucks an der Düse wird das Gas separat zu einem Baratron geleitet. Damit ein möglichst geringer Wärmeaustausch mit der Umgebung gegeben ist, befindet sich der Kaltkopf in einer separaten Vakuumkammer, der sog. Stützvakuumkammer.

Wird das herunter gekühlte Gas durch die Lavaldüse geleitet, können sich Wasserstoffcluster bilden. Im Folgenden wird der Prozess der Clusterbildung in einer Lavaldüse näher erläutert und die Geometrie der Lavaldüse beschrieben.

---

<sup>1</sup>  $\lambda_{Cu,20^\circ C} = 399 \frac{W}{m \cdot K}$ ,  $\lambda_{Edelstahl,20^\circ C} = 15 \frac{W}{m \cdot K}$  [Kuc04]

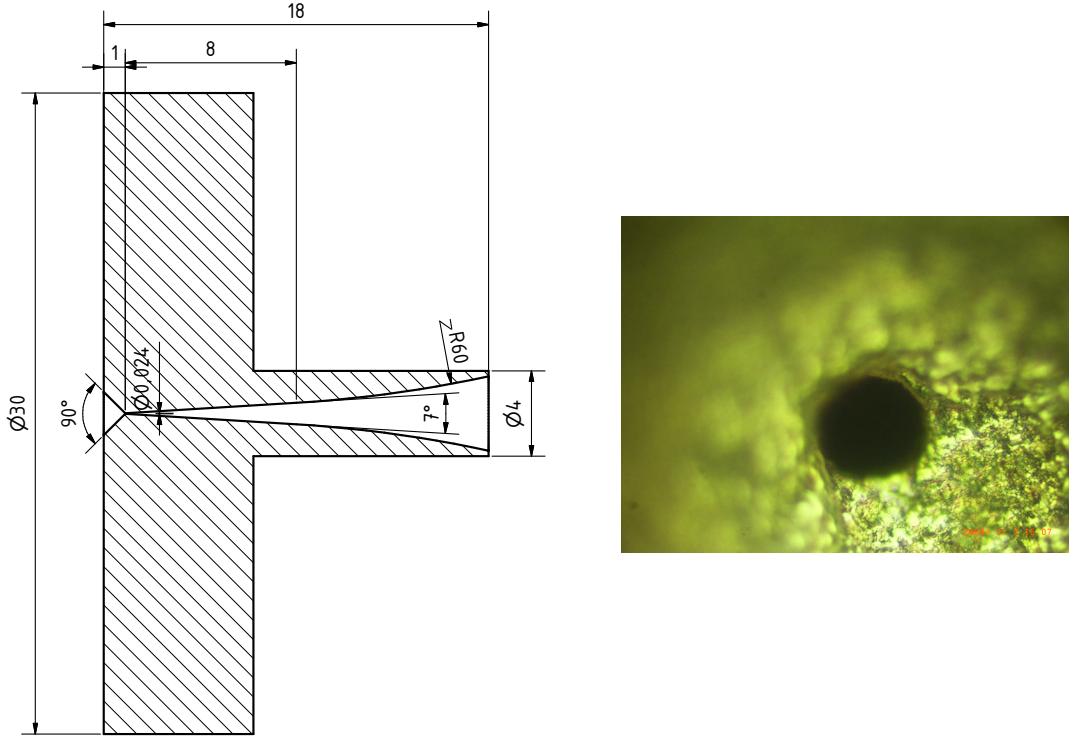


**Abbildung 3.3:** Draufsicht und Schnitt durch die Clusterquelle des MCT2. In der Stützvakuumkammer sind die Gasleitungen um die beiden Stufen des Kaltkopfes gewickelt. Es handelt sich bei den Gasleitungen um Edelstahl- (graublau) und Kupferleitungen (rotbraun). Ganz rechts sind die Skimmer- und die Kollimatkorkammer zu erkennen.

### Die Clusterbildung in einer Lavaldüse

Eine Querschnittzeichnung der Lavaldüse ist in Abbildung 3.4 gezeigt. Ihre Form kann in zwei Bereiche eingeteilt werden: der konvergente Einlassbereich und der divergente Auslass. Im Einlassbereich nimmt der Durchmesser kontinuierlich bis zu einer engsten Stelle ab und nimmt dann divergent wieder zu. Dabei sind Öffnungswinkel und Länge der beiden Bereiche so gewählt, dass Reibungsverluste und damit Verluste in der Strömung minimiert werden. Im Münsteraner Cluster-Jet Target wird zur Zeit eine Lavaldüse mit einem engsten Querschnitt von  $28 \mu\text{m}$  eingesetzt. Strömt das Gas in die Düse, wird seine Geschwindigkeit bis zum engsten Querschnitt bei einer Druck- und Temperaturminde-  
rung immer weiter erhöht. Da der Auslassdruck ( $1 \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$ ) viel geringer ist als der

Einlassdruck (17 bar), wird am engsten Querschnitt Schallgeschwindigkeit erreicht und danach wird die Strömung weiter beschleunigt.



**Abbildung 3.4:** Links: Querschnittszeichnung einer Lavaldüse. Durch den konvergenten Einlassbereich (links) strömt das Wasserstoffgas bis zu einem engsten Querschnitt in die Lavaldüse und gelangt dann in den divergenten Auslassbereich (rechts). An Einlass- und Auslassbereich liegen unterschiedliche Drücke an, die die Strömungsgeschwindigkeit des Wasserstoffgases bestimmen. Rechts: Vergrößerte Aufnahme der Lavaldüsenöffnung. Die Öffnung hat einen Durchmesser von  $28 \mu\text{m}$ .

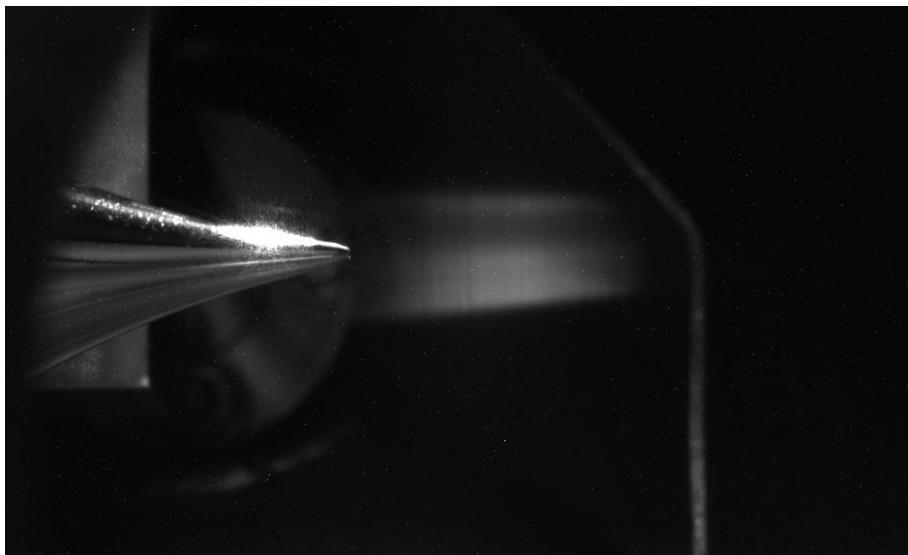
Nachdem das Gas den engsten Querschnitt der Lavaldüse passiert hat, kommt es zu einer starken Expansion des Gases. Dies hat zur Folge, dass auf Grund des Joule-Thomson-Effektes die Temperatur des Gases weiter abköhlt. Es bildet sich ein gerichteter Teilchenstrom, da die Relativgeschwindigkeit der Gasteilchen abnimmt. Durch den Prozess von Drei-Körper-Stößen kann ein Kondensationskeim entstehen, an dem sich weitere Moleküle anlagern können [Dem04]. Die Größe der Cluster reicht von 3-100 Teilchen bei kleinen, bis zu mehr als  $10^6$  Teilchen bei großen Clustern [Dem04]. Die

### 3 Das Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2

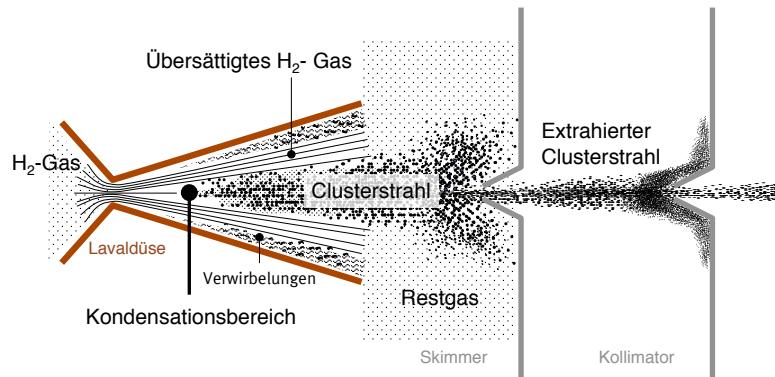
---

so entstandenen Cluster werden durch die van-der-Waals-Kraft zusammengehalten und gelangen als Clusterstrahl in die Skimmerkammer. Der Clusterstrahl ist sichtbar und kann dort durch zwei Vakuumfenster beobachtet werden, was in Abbildung 3.5 gezeigt ist. Da sich nur ein geringer Teil des Gases zu Clustern ausbildet, muss der Clusterstrahl vom Restgas getrennt werden. In Abbildung 3.6 ist schematisch der Clusterbildungsprozess und die Separation vom Restgas gezeigt.

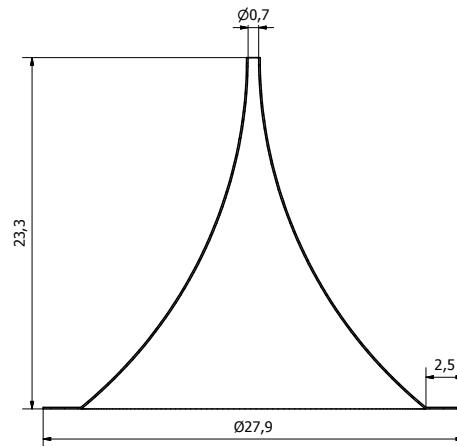
Um den Clusterstrahl vom Restgas zu separieren, wird ein Skimmer eingesetzt, der schematisch in Abbildung 3.7 gezeigt ist. Der Skimmer ist in etwa kegelförmig, besitzt aber eine konkave Mantelfläche, wodurch der Clusterstrahl vom Restgas extrahiert wird, ohne dass er sich davor anstaut. Die konkave Form hat einen weiteren Vorteil: Die Cluster, die den Skimmer passieren, werden nicht zu stark von reflektierten Clustern beeinflusst, da sich die Skimmeröffnung vergrößert.



**Abbildung 3.5:** Sichtbarer Clusterstrahl in der Skimmerkammer bei 24 K und 17,5 bar.  
Im linken Bereich ist der Skimmer zu erkennen.



**Abbildung 3.6:** Prozess der Clusterbildung in einer Laval-Düse von Wasserstoffgas. Nach dem engsten Querschnitt der Düse entstehen Kondensationskeime, an denen sich Cluster bilden können. Die Cluster werden von einem Skimmer vom Restgas getrennt. Abschließend ist ein Kollimator für die Form und Größe des Clusterstrahls verantwortlich. [Köh10]



**Abbildung 3.7:** Skimmer. Die Einlassöffnung (oben) hat einen Durchmesser von 0,7 mm. Die Mantelfläche des Skimmers ist konkav gefertigt, um Reflexionen des Restgases an der Skimmeröffnung und der Cluster im Innern des Skimmers zu verringern.

Der beim MCT2 verwendete Skimmer der Firma Beam Dynamics Inc. ist aus Nickel gefertigt, besitzt einen Öffnungs durchmesser von 0,5 mm und eine Wandstärke von 10 $\mu$ m. In der Skimmerkammer befindet sich ein Shutter, der den Clusterstrahl jederzeit blockieren kann, ohne die Gaszufuhr schließen zu müssen. Der separierte Clusterstrahl tritt im Anschluss an die Skimmerkammer in die Kollimatkorkammer ein.

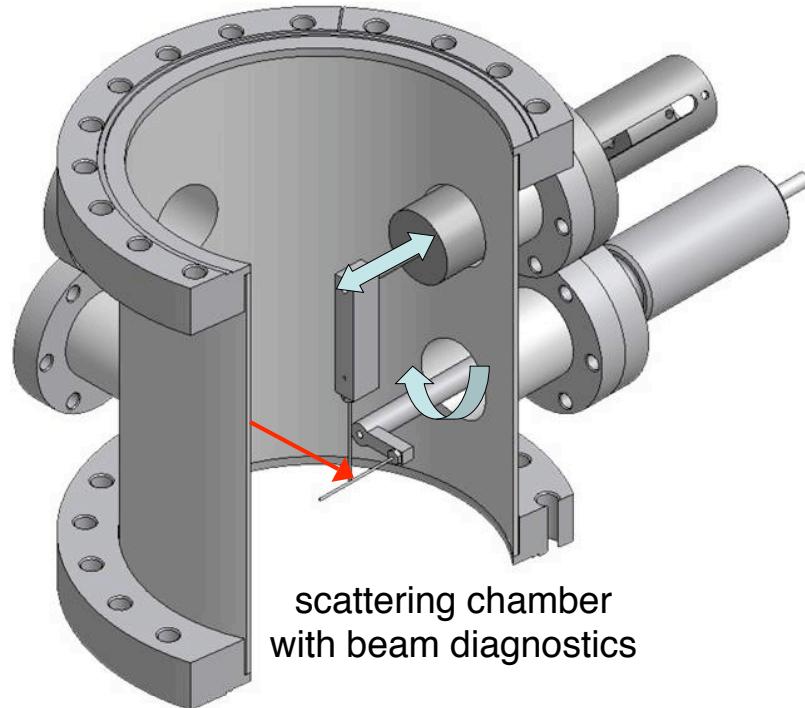
Der Kollimator ist eine kegelförmige Blende, die für die Formgebung des Clusterstrahls, in Abhängigkeit vom Durchmesser und der Querschnittsform, verantwortlich ist. Zurzeit werden zwei verschiedene Kollimatoren aus Edelstahl verwendet: zum einen ein Kollimator mit kreisförmiger Öffnung mit einem Durchmesser von 0,7 mm und zum anderen ein Kollimator mit einer schlitzförmigen Öffnung mit einer Länge von 0,78 mm und einer Breite von 0,06 mm (s. Kapitel 5).

Um ein Eindringen des Clusterstrahls in Skimmer und Kollimator zu optimieren, befinden sich beide auf Kreuztischen. Die Kreuztische ermöglichen eine gekreuzte, diagonale Bewegung unter 45° um 2 mm in zwei Richtungen, die durch Schrittmotoren realisiert wird. Eine genauere Erläuterung der Verschiebung erfolgt in Kapitel 4.

#### 3.2.2 Die Streukammer des MCT2

In 2,1 m Entfernung zur Clusterquelle befindet sich beim Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2 die sogenannte Streukammer, die dem späteren Wechselwirkungspunkt mit den Antiprotonen beim  $\bar{P}$ ANDA-Experiment entspricht. Sie ist in  $\bar{P}$ ANDA-Geometrie errichtet worden, um die gewonnenen Untersuchungsergebnisse direkt auf das spätere Experiment übertragen zu können. In der Streukammer befindet sich ein Monitorsystem, das in Abbildung 3.8 dargestellt ist. Es dient dazu, die genaue Position, den Durchmesser und den maximalen Druckanstieg zur Ermittlung der Clusterstrahldichte zu ermitteln. Dazu werden dünne Stäbe in horizontaler und vertikaler Richtung durch die Streukammer gefahren. Trifft ein Stab des Monitorsystems auf den Strahl, brechen die Cluster an ihm auf und der Druck in der Streukammer steigt an. Wird dieser Druckanstieg in Abhängigkeit der Stabposition gemessen, erhält man ein Profil, aus dem die Breite und

die genaue Position des Clusterstrahls in der Streukammer abgelesen werden können. Durch die Kenntnis der Position ist eine optimale Durchführung des Clusterstrahls bis zum Auffänger möglich. Zudem dienen der maximale Druckanstieg und die Breite des Clusterstrahls zur Berechnung der Strahldichte. Strahlprofile sind beispielsweise in Kapitel 4 gezeigt.



**Abbildung 3.8:** Das Monitorsystem in der Streukammer. Dünne Stäbe können vertikal oder horizontal durch die Streukammer gefahren werden. Treffen diese auf den Clusterstrahl, brechen die Cluster auf, was zu einem Druckanstieg führt. Trägt man den Druckanstieg gegen die Stabposition auf, erhält man ein Clusterstrahlprofil aus dem die genaue Position und der Durchmesser des Clusterstrahls bestimmt werden können. Außerdem dient der maximale Druckanstieg zur Bestimmung der Clusterstrahldichte.

### 3.2.3 Der Auffänger des MCT2

Damit der Einfluss des Clusterstrahls auf das Vakuumsystem der Streukammer bemessen werden kann, wird der Clusterstrahl durch ein differentielles Pumpensystem, den Auffänger,

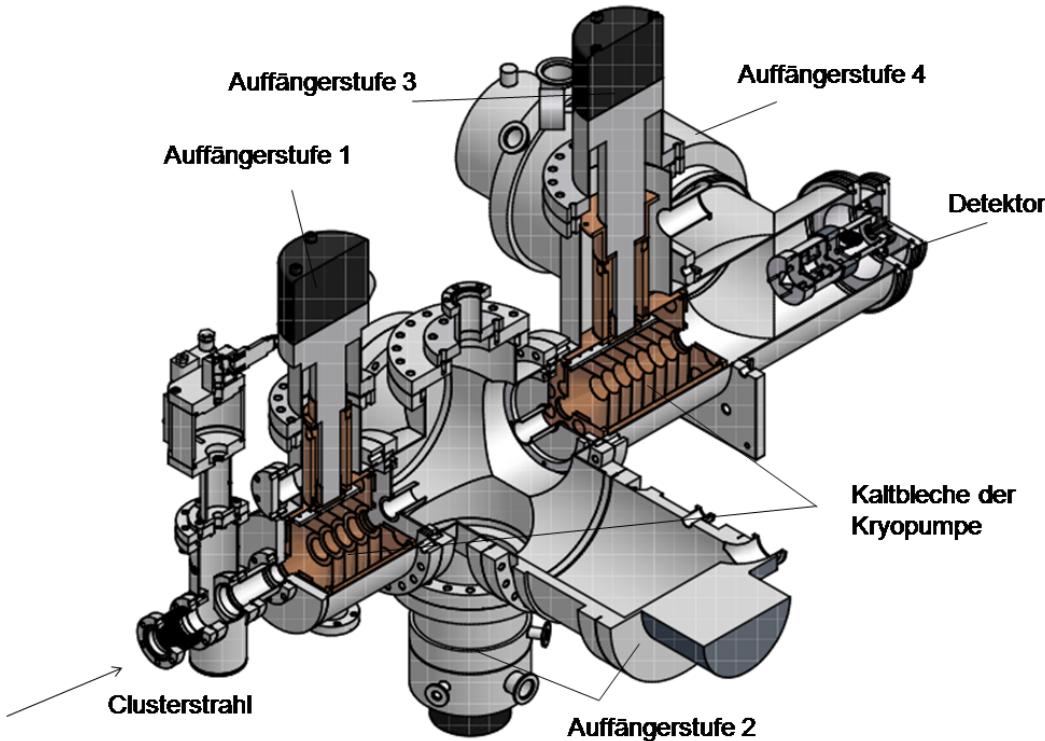
### 3 Das Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2

---

abgesaugt. Beim Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2 wird dafür das vierstufige Auffängersystem des abgeschlossenen Experiments COSY-11<sup>2</sup> eingesetzt. Die erste und dritte Pumpstufe besteht aus Kryopumpen, die speziell für den Einsatz am Cluster-Jet Target entwickelt worden sind. Der Clusterstrahl durchströmt darin die Öffnung sogenannter mit Aktivkohle besetzter Kaltbleche, an denen eventuelles Restgas kondensiert. Die Kaltbleche haben typischerweise eine Temperatur von unter 15 K (vgl. Abschnitt A.2). Die zweite und vierte Pumpstufe bestehen aus insgesamt drei Turbomolekularpumpen. Das gesamte Auffängersystem ist in Abbildung 3.9 gezeigt. Darin befindet sich vor Kopf des Targets ein Detektor zur Flugzeitmessung und die letzte Turbomolekularpumpe ist seitlich davon positioniert. Aktuell befindet sich an Stelle des Detektors am Ende des Strahlrohres die Turbomolekularpumpe der letzten Auffängerstufe, damit der Strahl direkt auf die Saugseite der letzten Pumpstufe trifft, um Rückreflexionen zu vermeiden. Dennoch ist die vierte Pumpstufe nicht in einer Achse mit dem Strahlrohr montiert, sondern leicht nach unten versetzt, damit die Cluster direkt auf die Leitbleche der Turbomolekularpumpe treffen, aufbrechen und abgesaugt werden können.

---

<sup>2</sup>Abgeschlossenes Beschleunigerexperiment am COSY (**CO**ler **SY**nchrotron)



**Abbildung 3.9:** Querschnittzeichnung des Auffängers des MCT2. Der Auffänger besitzt ein differentielles, vierstufiges Pumpensystem. Am Ende des Targets ist ein Detektor montiert, der zur Messung der Clusterflugzeiten dient. Aktuell befindet sich vor Kopf des Targets jedoch die vierte Pumpstufe.

### 3.3 Das Vakuum-System des MCT2

Das Münsteraner Cluster-Jet Targets MCT2 verfügt über ein Vakuumsystem, das aus mehreren Bereichen von Hoch- bis Feinvakuum mit unterschiedlichen Vakuumpumpen besteht. Die Optimierung des Vakuumsystems für den Einsatz am  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment wird bereits geplant.

Die verschiedenen Bereiche des MCT2 verfügen über einzelne Kammern, an denen unterschiedliche Druckbereiche realisiert werden müssen. Dazu werden mehrere Arten von Vakuumpumpen eingesetzt: Kryo-, Turbomolekular- und Rootspumpen; als Vorpumpen werden Drehschieberpumpen eingesetzt (vgl. Abschnitt A.2). Das gesamte Vakuumsy-

stem ist in Abbildung 3.10 gezeigt. Darin sind auch die nominellen Saugvermögen<sup>3</sup> für Luft angegeben.

Im Bereich der Clusterquelle wird ein differentielles Pumpensystem eingesetzt, das schrittweise den Druck absenkt, um den Druck in der Streukammer so wenig wie möglich zu beeinflussen. Vor dem differentiellen Pumpensystem der Clusterquelle befindet sich die Stützvakuumkammer des Kaltkopfes und der Gasleitungen. Dort wird eine Turbomolekularpumpe mit nominellem Saugvermögen<sup>4</sup> von  $360 \frac{\ell}{s}$  eingesetzt. Der Druck in der Stützvakuumkammer liegt im Bereich von  $10^{-6}$  mbar. Vorgepumpt wird die Turbomolekularpumpe durch das Vorpumpensystem der Kollimatorkammer (s.u.).

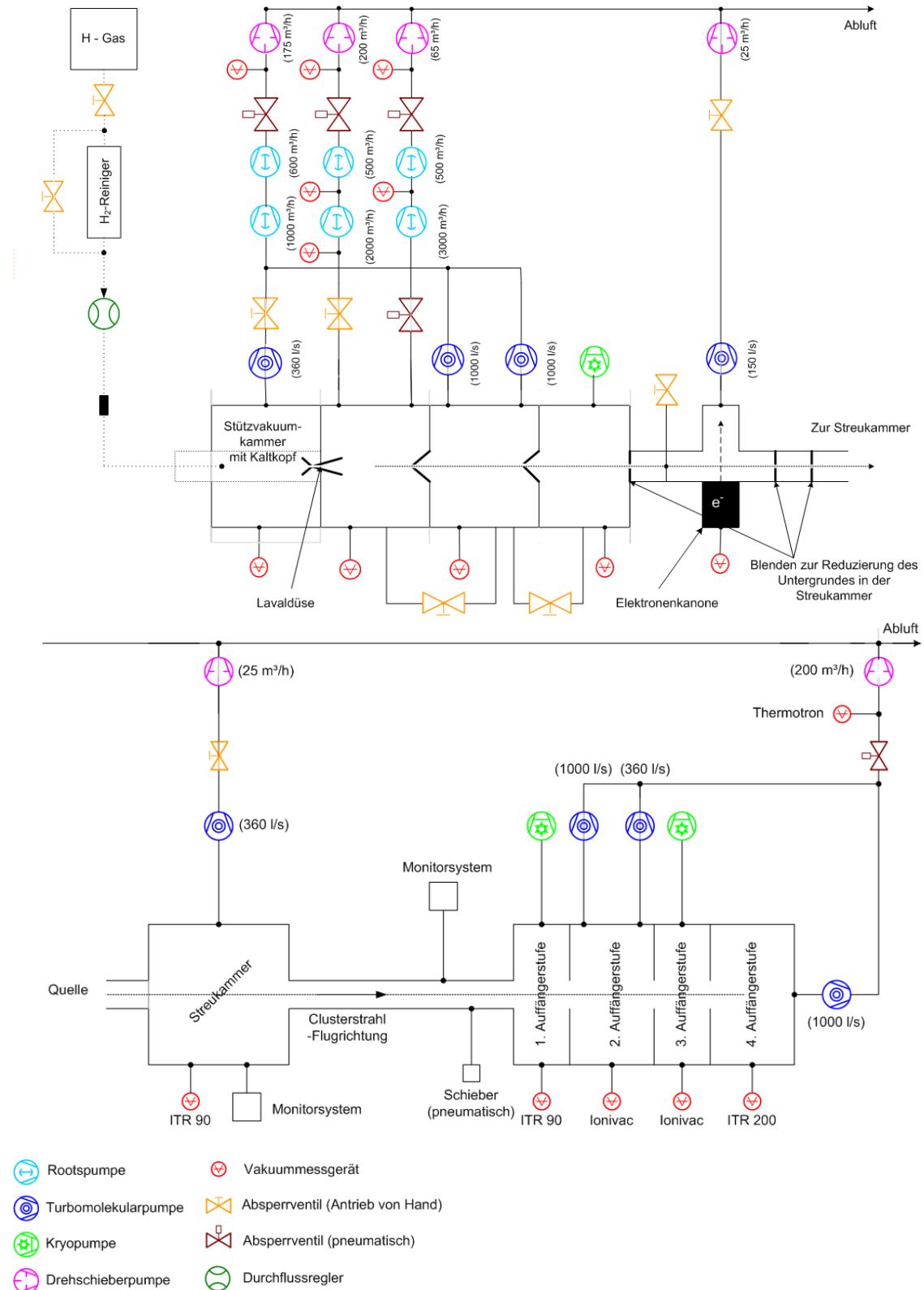
Das Vakuumsystem der Skimmerkammer bildet die erste Stufe. Sie wird von zwei Rootspumpen evakuiert. Beide Pumpen sind symmetrisch an der Skimmerkammer angeordnet und haben ein Saugvermögen von  $2000 \frac{m^3}{h}$  bzw.  $3000 \frac{m^3}{h}$ . Da dort der Clusterstrahl vom Restgas separiert wird und nur ein geringer Teil des Gases zu Clustern kondensiert, liegt dort eine hohe Gaslast von bis zu  $5 \frac{n\ell}{min}$  an. Da sich bei zunehmender Gaslast das effektive Saugvermögen der Turbomolekularpumpen verringert und die Lebensdauer durch Überbeanspruchung stark abnehmen könnte [Umr97], werden keine Turbomolekularpumpen eingesetzt. Die Drücke in der Skimmerkammer liegen beim Targetbetrieb mit hohen Dichten (17 bar, 25 K) im Bereich von  $10^{-2}$  mbar. Als Vorpumpensystem für beide Rootspumpen werden jeweils eine weitere Rootspumpe mit einem Saugvermögen von  $500 \frac{m^3}{h}$  und eine Drehschieberpumpe mit einem nominellen Saugvermögen von  $200 \frac{m^3}{h}$  bzw.  $65 \frac{m^3}{h}$  hintereinandergeschaltet.

An die Pumpstufe der Skimmerkammer schließt sich die der Kollimatorkammer an. Dort werden zwei symmetrisch angeordnete Turbomolekularpumpen mit jeweils einem Saugvermögen von  $1000 \frac{\ell}{s}$  eingesetzt. An der Kollimatorkammer ist es möglich, Turbomolekularpumpen einzusetzen, da der Skimmer den Clusterstrahl weitestgehend vom Restgas getrennt hat und der Kollimator nur einen kleinen Teil des Clusterstrahls heraus schneidet. Somit ist dort für den Einsatz von Turbomolekularpumpen die Gaslast nicht

---

<sup>3</sup>mittlerer Volumendurchfluss durch die Saugöffnung der Pumpe

<sup>4</sup>alle angegebenen Saugvermögenen gelten für Luft



**Abbildung 3.10:** Vakuumsystem des MCT2. Alle angegebenen Saugvermögen gelten für Luft. Oben: Vakuumsystem der Quelle, unten: Vakuumsystem der Streukammer und des Auffängers.

zu groß. In der Kollimatorkammer sind Drücke bei hoher Clusterdichte im Bereich von  $10^{-4}$  mbar möglich. Vorgepumpt werden beide durch ein System von zwei Rootspumpen ( $1000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  bzw.  $600 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ ) und einer Drehschieberpumpe ( $175 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ ), da das Saugvermögen einer einzelnen Drehschieberpumpe nicht ausreichen würde, um ein geeignetes Verhältnis von Auslass- zu Einlassdruck (Kompressionsverhältnis) zu erreichen.

Hinter der Kollimatorkammer befindet sich eine weitere Pumpkammer, die die dritte Stufe des Vakuumsystems der Clusterquelle bildet. Dort wird eine Kryopumpe eingesetzt, die speziell für das Münsteraner Cluster-Jet Target entwickelt wurde (s. Abschnitt A.2). Daher können im Targetbetrieb in dieser Kammer Drücke von  $10^{-5}$  mbar erreicht werden. Zwischen der Kryopumpe an der Quelle und der Streukammer befindet sich noch eine zusätzliche Turbomolekularpumpe ( $150 \frac{\text{L}}{\text{s}}$ ), die durch eine Drehschieberpumpe ( $25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ ) vorgepumpt wird, und mehrere Blenden, die den Gasfluss in die Streukammer vermindern sollen. Auf Grund der geringen Strahlrohrgröße ( $\varnothing 2 \text{ cm}$ ) für das Target und den Beschleuniger beim zukünftigen  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment ist es nicht möglich, am Wechselwirkungspunkt eine weitere Vakumpumpe einzusetzen. Somit muss im Vorhinein für einen geringen Gasfluss gesorgt werden.

Zurzeit befindet sich an der Streukammer eine Turbomolekurlarpumpe mit einem nominalen Saugvermögen von  $360 \frac{\text{L}}{\text{s}}$ , die durch eine Drehschieberpumpe ( $25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ ) vorgepumpt wird. Dadurch können Drücke in der Streukammer bei einem Clusterstrahl mit hoher Dichte im Bereich von  $10^{-5}$  mbar erzielt werden. Der Auffänger des Targets verfügt wiederum über ein differentielles Pumpsystem, das aus vier Stufen besteht. Für die erste und die dritte Stufe werden insgesamt drei Turbomolekularpumpen mit einem Saugvermögen von  $1000 \frac{\text{L}}{\text{s}}$  bzw.  $360 \frac{\text{L}}{\text{s}}$  verwendet. Sie werden durch eine gemeinsame Drehschieberpumpe ( $20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ ) vorgepumpt. Die zweite und vierte Pumpstufe werden durch zwei Kryopumpen gebildet. Die Drücke am Auffänger liegen an den ersten beiden Stufen bei hohen Clusterdichten im Bereich von  $10^{-6}$  mbar. An Stufe drei und vier herrscht ein Druck im Bereich von  $10^{-6}$  mbar, da dort die Cluster aufgebrochen werden. Durch das differentielle Pumpsystem wird ein Rückreflektieren der Cluster in die Streukammer und ein damit verbundener Druckanstieg verhindert.

In Abbildung 3.10 ist zusätzlich das Gassystem (gestrichelte Linien) für das Target mit eingezeichnet. Der Einlass von Wasserstoffgas dient der Clusterproduktion beim Durchfluss durch die Lavaldüse. Zusätzlich verfügt das MCT2 über eine Elektronenkanone, die zur Ionisierung der Cluster dient. Dadurch können zum Beispiel mit einem Channeltron, das sich am Ende des Auffängers vor Kopf befindet, die Flugzeiten der Cluster bestimmt werden (vgl. Diplomarbeit E. Koehler [Köh10]).



## 4 Allgemeine Optimierungsarbeiten am Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2

Das Münsteraner Cluster-Jet Target ist ein Prototyp für das zukünftige  $\bar{P}$ ANDA-Experiment, das an der Beschleunigeranlage FAIR in Darmstadt geplant ist. Der aktuelle Betrieb des Targets dient Untersuchungen der Eigenschaften des Clusterstrahls und dazu, den Aufbau des Cluster-Jet Targets weiterzuentwickeln, um einen optimalen Targetbetrieb während des Experimentes zu gewährleisten. Im Folgenden soll auf einige Verbesserungen des Aufbaus eingegangen werden, die im Entstehungszeitraum dieser Arbeit stattgefunden haben.

### 4.1 Verbesserungen der Schrittmotorsysteme

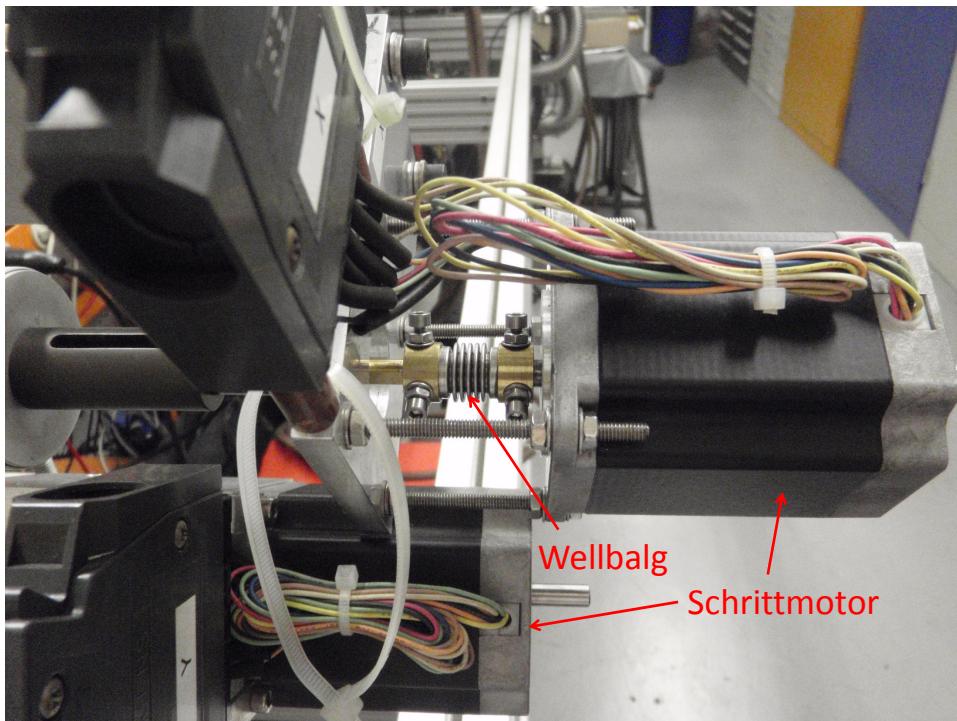
Schrittmotoren<sup>1</sup> werden an zwei unterschiedlichen Komponenten des Targets verwendet: zum einen am Monitorsystem der Streukammer, zum anderen zur Verschiebung von Skimmer und Kollimator in der Clusterquelle. Im Folgenden wird zunächst das Schrittmotorsystem des Monitorsystems in der Streukammer erklärt und die daran vorgenommenen Verbesserungen vorgestellt. Anschließend wird näher auf die Verschiebung von Skimmer und Kollimator und den damit verbundenen Optimierungsarbeiten eingegangen.

---

<sup>1</sup>Schrittmotoren verfügen über einen Rotor, der über ein schrittweise rotierendes, elektromagnetisches Feld einer Statorspule um kleine Winkel bzw. deren Vielfache gedreht werden kann.

#### 4.1.1 Die Mechanik des Monitorsystems in der Streukammer

In der Streukammer des MCT2 ist ein so genanntes Monitorsystem installiert. Es dient der Bestimmung der genauen Position und den Abmessungen des Clusterstrahls in der Streukammer sowie der Bestimmung der Clusterstrahldichte (vgl. Diplomarbeiten J. Otte [Ott07], E. Köhler [Köh10]). Dazu werden dünne Stäbe in horizontaler und vertikaler Richtung durch die Streukammer gefahren. Treffen die Stäbe auf den Clusterstrahl, brechen dort die Cluster auf, was zu einem Druckanstieg in der Streukammer führt. Die verwendeten Stäbe haben zurzeit einen Durchmesser von 1 mm. Die elektronische Steuerung dieser Stäbe übernehmen jeweils Schrittmotoren, die in Abbildung 4.1 gezeigt sind.



**Abbildung 4.1:** Abbildung der Schrittmotoren des Monitorsystems. Durch die Schrittmotoren können die Monitorstäbe horizontal bzw. vertikal durch die Streukammer gefahren werden.

Um die Bewegung in horizontaler Richtung zu realisieren ist der Schrittmotor über eine Welle<sup>2</sup> und einen Wellbalg mit einer Mikrometerschraube verbunden, die die drehende Bewegung des Motors in eine geradlinige Bewegung umwandelt. Ein Wellbalg ist ein Kompensationselement, das aus einer dünnen Metallwand besteht, die ziehharmonikaartig gefaltet ist. Der Wellbalg dient als Verbindungsstück und unter anderem dazu, eine Schwingungsübertragung zwischen zwei Bauteilen zu vermeiden. In diesem Fall dient er dazu, eine Übertragung der Vibrationen des Schrittmotors zu verringern. Bei der Drehung des Motors schraubt sich die Mikrometerschraube in horizontale Richtung ein und zieht den mit ihr verbundenen Stab mit sich.

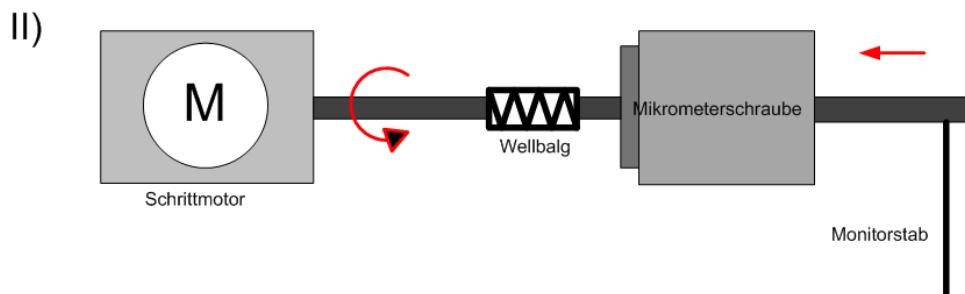
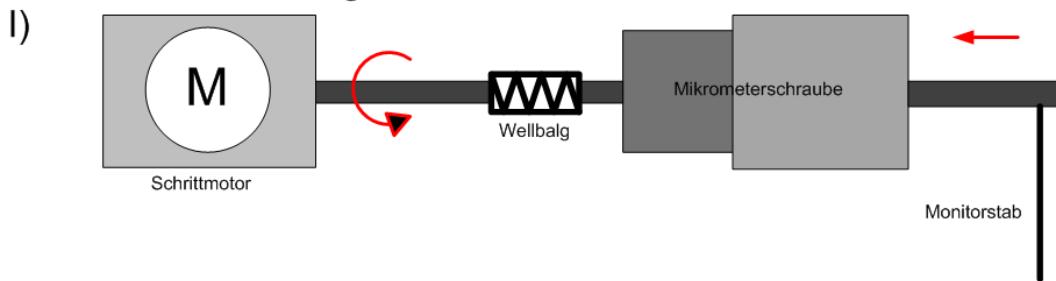
Für die vertikale Bewegung ist der Stab direkt mit einem Schrittmotor über eine Welle verbunden. Der Stab liegt jedoch nicht in einer Achse mit der Welle, sondern ist durch ein Verbindungsstück leicht dazu versetzt. Dreht sich der Motor, so vollführt der Stab eine Kreisbewegung in horizontaler Richtung innerhalb der Streukammer. Vereinfacht sind die beiden Bewegungen in Abbildung 4.2 gezeigt. Angesteuert werden die Schrittmotoren durch eine Computersoftware, die von A. Täschner entwickelt wurde. Zudem nimmt diese Software bei jedem Schritt des Motors einen Druckwert der Streukammer in Abhängigkeit von der Stabposition auf und stellt das entstehende Profil des Clusterstrahls graphisch dar. Ein solches Strahlprofil<sup>3</sup> ist in Abbildung 4.3 gegeben.

---

<sup>2</sup>Maschinenelement, das zur Weiterleitung von Drehbewegungen bzw. Drehmomenten genutzt wird.

<sup>3</sup>Alle in dieser Arbeit gezeigten Strahlprofile sind untergrundkorrigiert.

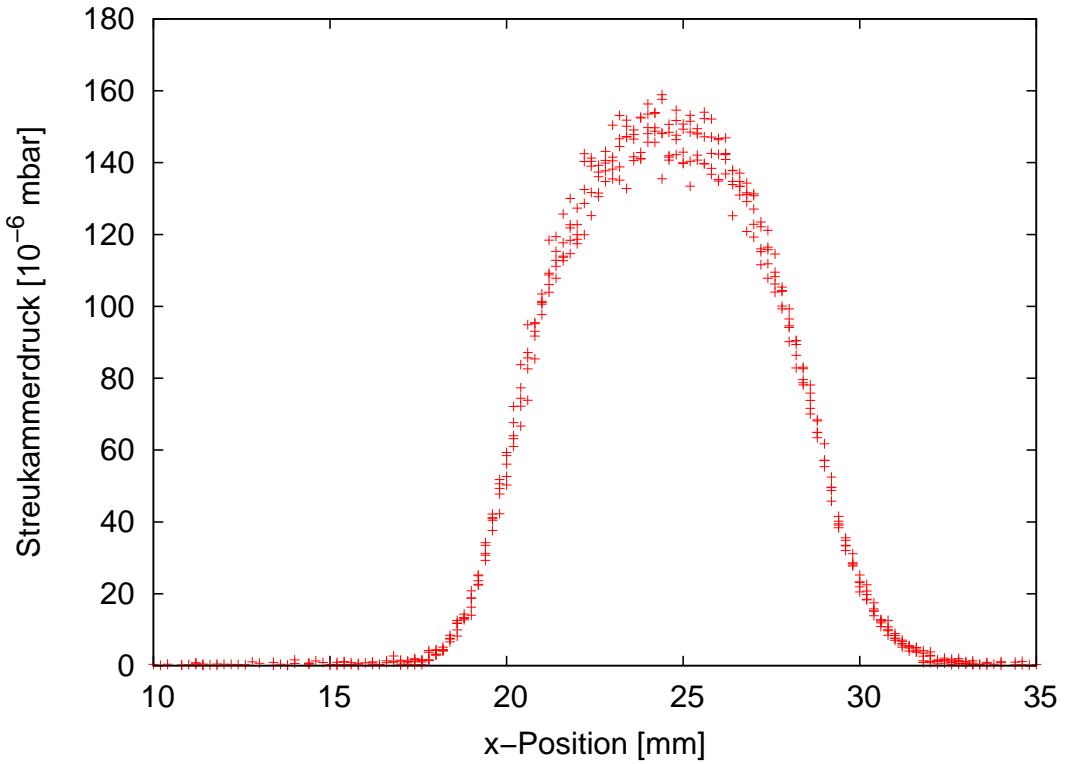
### horizontale Verschiebung



### vertikale Verschiebung



**Abbildung 4.2:** Vereinfachte Darstellung der Schrittmotorsteuerung des Monitorsystems. Oben: Bewegung in horizontaler Richtung, unten: Bewegung in vertikaler Richtung.



**Abbildung 4.3:** Clusterstrahlprofil in der Streukammer. Durch das Monitorsystem werden die Cluster aufgebrochen, sodass es zu einem Druckanstieg kommt. Trägt man den Streukammerdruck gegen die Stabposition auf, erhält man ein Profil des Clusterstrahls.

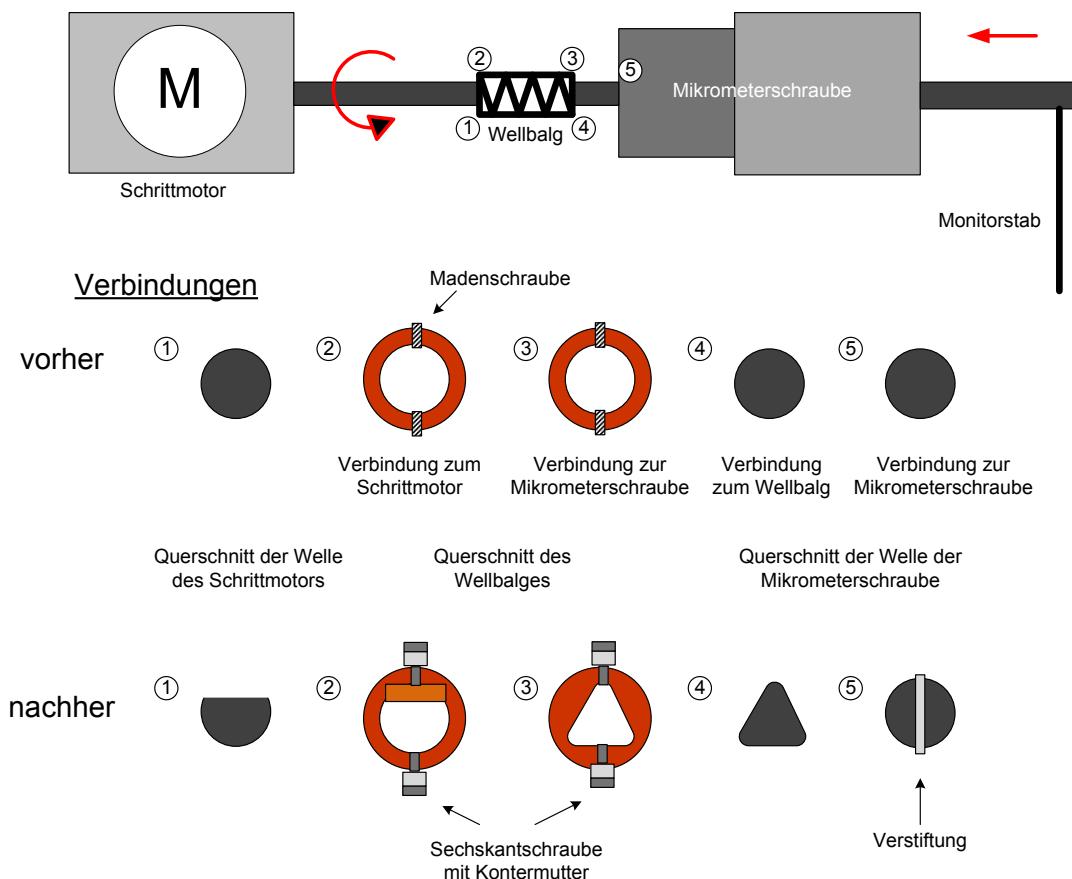
### Optimierung des Schrittmotorsystems des Monitorsystems

Die Anzahl  $n$  der Schritte, die ein Schrittmotor pro Umdrehung ausführt, ist abhängig vom gewählten Schrittewinkel  $\phi$

$$n = \frac{360^\circ}{\phi} .$$

Zur Zeit läuft der Motor mit einer Schrittweite von 0,3 mm. Durch die Schritte und die abrupte Abbremsung zwischen den Schritten kam es in der Vergangenheit dazu, dass sich die Verschraubungen an den Wellen bzw. dem Wellbalg gelöst haben. Wird die Verbindung zwischen dem Schrittmotor und der Mikrometerschraube unterbrochen, stimmt die angegebene Position des Stabes nicht mehr mit der tatsächlichen Position überein. Um Störungen zu vermeiden, wurden die Querschnitte der Wellen verändert

und der Wellbalg entsprechend angepasst. Der Wellbalg war zunächst mit kleinen Madenschrauben befestigt, die zusätzlich durch Sechskantschrauben mit Kontermutter ausgetauscht wurden; die zweite Welle und die Mikrometerschraube wurden verstiftet. Die gesamten Änderungen sind in Abbildung 4.4 dargestellt. Es wurden bewusst nicht alle Verbindungen verstiftet, damit noch immer die Möglichkeit besteht, Umbauarbeiten vornehmen zu können.

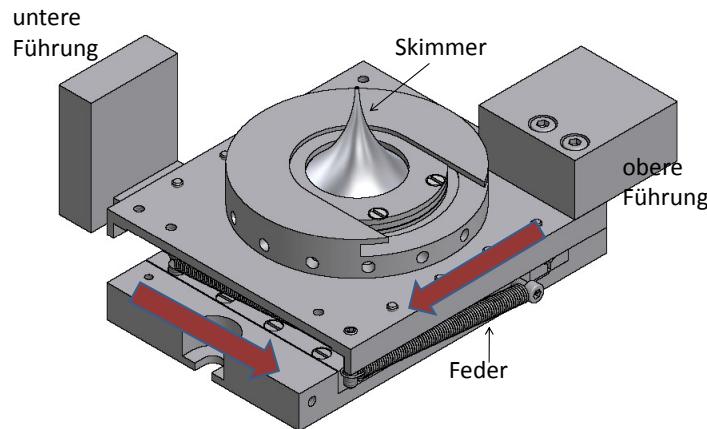


**Abbildung 4.4:** Schematische Darstellung der Änderungen am Schrittmotorsystem. Die Querschnitte der Wellen wurden verändert und die Madenschrauben gegen Sechskantschrauben mit Kontermutter ausgetauscht. Die Welle zur Mikrometerschraube ist speziell für das Monitorsystem angefertigt worden, sodass von vornherein eine Dreiecksform gewählt werden konnte. Die Welle des Schrittmotors ist fest mit diesem verbunden und hatte eine runde Form, die nachträglich abgeflacht wurde.

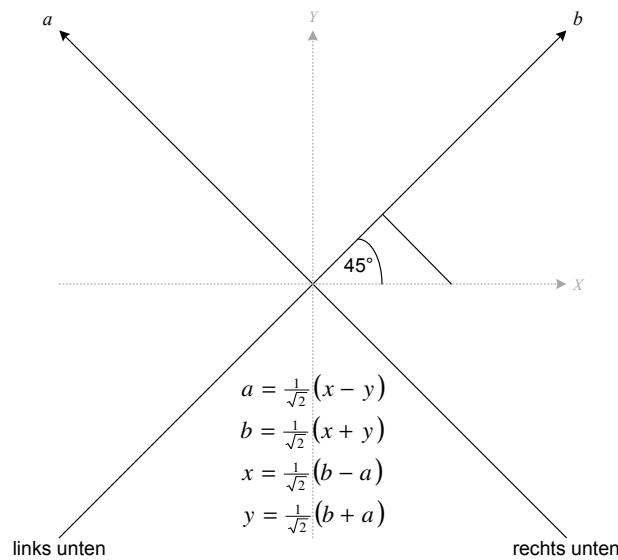
Um die anfallenden Vibrationen am Monitorsystem zu minimieren, wurde der Schrittmotor bei unterschiedlichen Frequenzen betrieben und beobachtet. Bei besonders hohen Frequenzen größer 1 kHz zeigten sich neben starken Vibrationen auch Schrittfehler. Ein ruhiger Betrieb ohne Schrittfehler ergab sich bei einer Frequenz von 600 Hz. Auf Grund dieser Änderungen des Schrittmotorsystems ist ein Lösen der Bauteile nicht mehr möglich und ein ungestörter Betrieb des Monitorsystems gewährleistet.

#### **4.1.2 Die Mechanik zur Verschiebung von Skimmer und Kollimator**

Damit der Clusterstrahl optimal von der Quelle zur Streukammer gelangt, ohne an den Strahlrohrwänden reflektiert zu werden, können die Positionen von Skimmer und Kollimator verändert werden. Dies wird durch so genannte Kreuztische realisiert auf denen Skimmer und Kollimator angebracht sind. Ein Kreuztisch besteht aus zwei gekreuzten Führungen, die um  $90^\circ$  versetzt sind. Skimmer und Kollimator können durch ein Verschieben der beiden Achsen jede Position in deren Ebene einnehmen. Über eine Feder sind die beiden Führungen jeweils mit der oberen Platte verbunden, die zur Halterung der Führungen dient. Die Kreuztische des MCT2 sind so montiert, dass sie eine diagonale Bewegung unter einem Winkel von  $45^\circ$  in zwei Richtungen um jeweils 2 mm nach oben oder unten ermöglichen. Diese Bewegung erfolgt senkrecht zur Clusterstrahlachse. Eine horizontale und vertikale Verschiebung kann durch Kombination der diagonalen Bewegungen erfolgen. In Abbildung 4.5 ist ein Kreuztisch für die Skimmerbewegung dargestellt und in Abbildung 4.6 ist die Verschiebung von Skimmer und Kollimator in Richtung der diagonalen Achsen gezeigt.

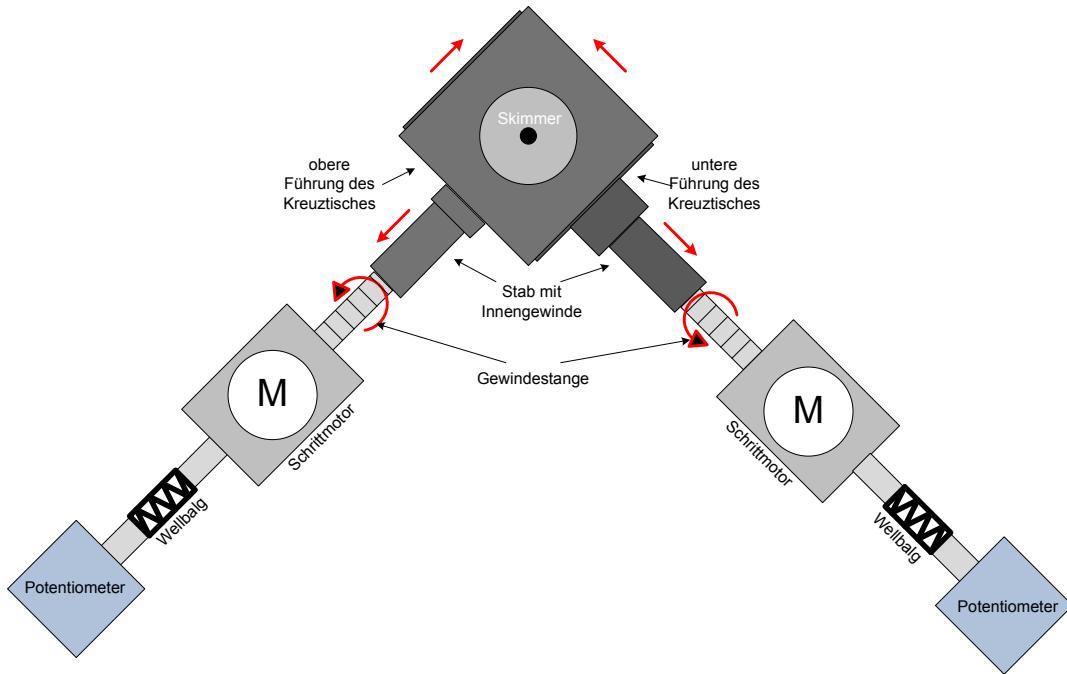


**Abbildung 4.5:** Kreuztische zur Verschiebung von Skimmer und Kollimator. Er ermöglicht eine diagonale Bewegung in zwei Richtungen unter einem Winkel von  $45^\circ$  nach oben oder unten. Auf dem Kreuztisch ist ein Skimmer eingesetzt.



**Abbildung 4.6:** Diagonale Verschiebung von Skimmer und Kollimator. Die Verschiebung erfolgt unter einem Winkel von  $45^\circ$  entlang der Achsen a und b. Durch Kombination von beiden können horizontale und vertikale Bewegungen in x- und y-Richtung erfolgen.

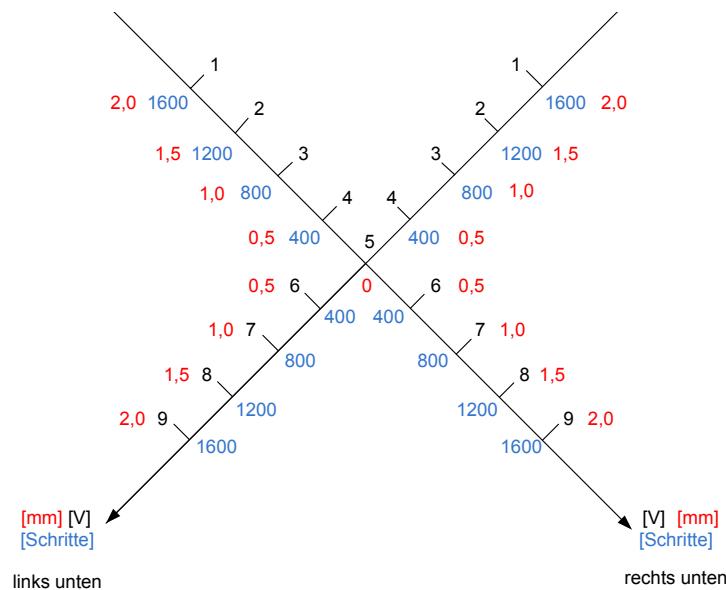
Die Verschiebung von Skimmer und Kollimator erfolgt durch einen Schrittmotor, der mit einer Gewindestange verbunden ist. Diese Gewindestange führt in einen weiteren Stab mit einem Innengewinde, der gegen die Führung des Kreuztisches drückt. Dreht sich der Motor und damit die Gewindestange in die eine Richtung, so wird der Stab diagonal nach unten gezogen und die Führung des Kreuztisches rutscht auf Grund der Feder nach. In der anderen Drehrichtung wird der Stab mit dem Innengewinde diagonal nach oben gedrückt und die Führung des Kreuztisches wird dementsprechend verschoben. Diese sogenannte Schiebedurchführung ist in Abbildung 4.7 gezeigt. Eine komplette Umdrehung des Schrittmotors und damit der Gewindestange entspricht **400 Schritten** und eine Bewegung von **0,5 mm** der Kreuztische, was sich aus dem Abstand der Gewinderinge ergibt.



**Abbildung 4.7:** Schematische Darstellung der Steuerung des Kreuztisches. Durch die Drehung des Schrittmotors dreht sich die Gewindestange mit und verschiebt eine Platte des Kreuztisches. Auf der oberen Platte befindet sich in diesem Fall ein Skimmer.

An den Schrittmotoren ist zudem jeweils ein Potentiometer<sup>4</sup> angebracht. Das Potentiometer gibt einen Spannungswert aus, der ein Maß für die Position von Skimmer und Kollimator ist. Dabei bedeutet eine Spannung von 5 V, dass sich Skimmer und Kollimator auf der Strahlachse befinden und eine Differenz von 1 V entspricht wiederum einer Bewegung von **0,5 mm**. Der Zusammenhang zwischen Bewegung, Schritten des Motors und angezeigtem Spannungswert ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

Der Schrittmotor kann über eine Computersoftware angesteuert werden, die von A. Täschner entwickelt wurde. Dabei kann die Schrittzahl angegeben werden, die der Motor fahren soll, um Skimmer oder Kollimator an eine bestimmte Position zu bringen.



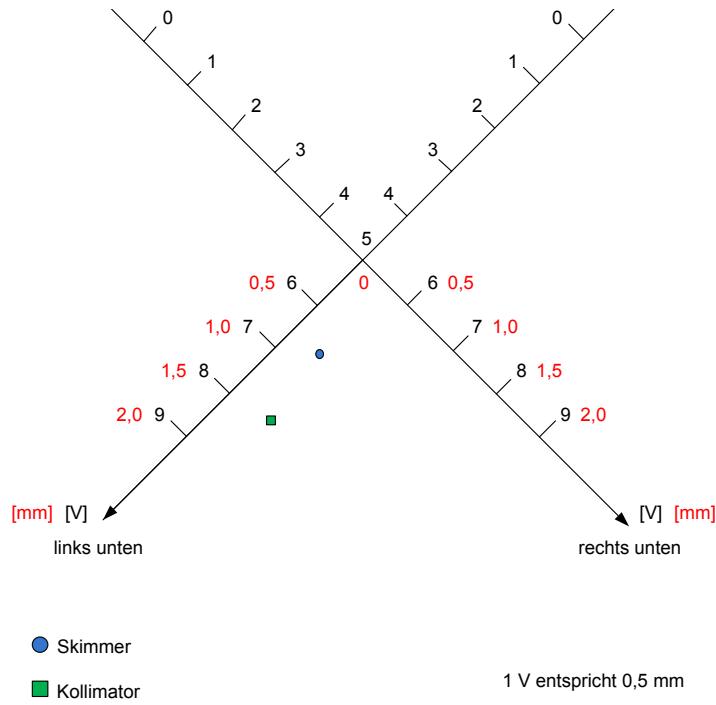
**Abbildung 4.8:** Zusammenhang zwischen Bewegungsweite, Schrittzahl des Schrittmotors und Potentiometerspannung.

<sup>4</sup>Elektronischer Widerstand, dessen Widerstandswerte durch einen sogenannten Schleifer mittels Drehen oder Schieben eingestellt werden können.

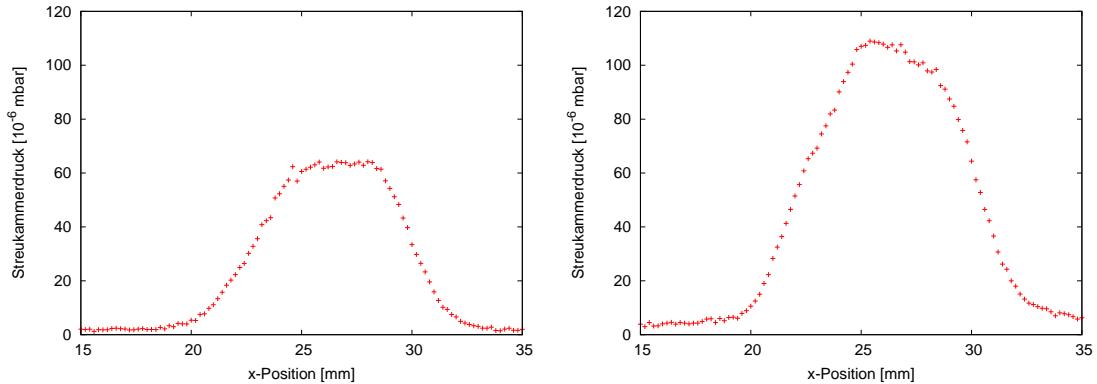
### Optimierung der Schiebedurchführung von Skimmer und Kollimator

Potentiometer und Schrittmotor sind wie beim Monitorsystem der Streukammer über einen Wellbalg miteinander verbunden. Damit im Vorfeld das Lösen der Verschraubungen von Welle und Wellbalg vermieden werden kann, wurden sämtliche Madenschrauben durch Sechskantschrauben mit Kontermutter ersetzt. Dafür mussten die Schiebedurchführungen ausgebaut und nach den Änderungen erneut eingebaut werden. Skimmer und Kollimator wurden zur Strahlachse hin ausgerichtet und die Potentiometer auf 5 V eingestellt. Skimmer und Kollimator wurden auf die zuvor ermittelten Positionen mit dem höchsten Druckanstieg gebracht. Dabei konnten die gewohnten Druckanstiege nicht reproduziert werden.

Durch schrittweise Veränderung der Position von Skimmer und Kollimator um jeweils 0,1 V, was einer Positionsänderung von 0,05 mm entspricht, wurde systematisch die Einstellung mit maximalem Druckanstieg bei Durchfahren der Monitorstäbe in der Streukammer gesucht. Die Einstellung von Skimmer und Kollimator zueinander, an der im Rahmen der aktuellen Messungen ein maximaler Druckanstieg erzielt wurde, war ungewöhnlich. Skimmer und Kollimator befanden sich nicht auf einer senkrechten Achse. In Abbildung 4.9 ist diese Einstellung zueinander dargestellt. Weiterhin konnten die maximalen Druckanstiege in der Streukammer nach Verschieben von Skimmer und Kollimator bei gleicher Einstellung zueinander nicht reproduziert werden. Außerdem waren die aufgenommenen Profile nicht symmetrisch. In Abbildung 4.10 sind zwei Clusterstrahlprofile bei gleicher Einstellung von Skimmer und Kollimator nach Verschieben gezeigt. Es wurde vermutet, dass Skimmer oder Kollimator durch die Drehung des Schrittmotors nicht verschoben wurden oder die Bewegung nicht den erwarteten Verschiebungen entsprach. Auf Grund des Einsatzes von neuen Sechskantschrauben mit Kontermuttern konnte das Ablösen der Welle aus dem Wellbalg ausgeschlossen werden.



**Abbildung 4.9:** Stellung von Skimmer und Kollimator bei maximalem Druckanstieg durch die Bewegung der Monitorstäbe in der Streukammer.



**Abbildung 4.10:** Vergleich zweier horizontaler Profile des Clusterstrahls in der Streukammer bei vermeintlich gleicher Stellung von Skimmer und Kollimator. Der maximale Druckanstieg in der Streukammer ist bei gleichen Clusterstrahlbedingungen nicht gleich.

Der Betrieb der Schrittmotoren ist im eingebauten Zustand unter Vakuum schwergängiger, da sich ein Teil der Schiebedurchführung im Vakuum und ein Teil unter Luftdruck befindet. Verbunden werden beide Bereiche durch einen zweiten Wellbalg. Dieser wird während des Targetbetriebs auseinander gedrückt und übt somit beim Zurückziehen der Kreuztische eine höhere Kraft aus (vgl. Abbildung 4.13). Daher wurde vermutet, dass das Gewinde der Gewindestangen durch die häufigen Drehungen Schaden genommen haben könnte. Auf Grund dessen wurden alle Schrittmotoren und die Gewindestangen aus den Kreuztischen ausgebaut und auf Abnutzung überprüft. Eine Schädigung des Gewindes konnte nicht festgestellt werden. Auch eine ausreichende Schmierung durch Fett war vorhanden, sodass eine Drehung der Gewindestangen leicht möglich war.

Um die Bewegung von Skimmer und Kollimator unter Vakuumbedingungen genau beobachten zu können, wurde das Strahlrohr zwischen Streukammer und Auffänger herausgenommen und durch ein Vakuumfenster ersetzt. Es sollte getestet werden, ob sich Skimmer und Kollimator nach mehrmaligen Verschiebungen wieder an der Ausgangsposition befinden. Dazu wurde an Stelle von Skimmer und Kollimator ein Plexiglasplättchen mit einem eingearbeiteten Punkt, der die Stelle der Skimmer- bzw. Kollimatoröffnung markiert, eingesetzt und durch eine Leuchtdiode beleuchtet. Mit einem Theodoliten wurde die Positionsveränderung beobachtet. Nach mehrmaligen Verschiebungen um jeweils 400 Schritte, also um 1 V, in mehrere Richtungen und dann zurück in die Mittenposition konnte festgestellt werden, dass die Position von Skimmer und Kollimator richtig war, die Spannungsanzeige des Potentiometers, das den Kollimator von links unten nach rechts oben verschiebt, aber nicht den eingestellten Werten entsprach. Daraufhin wurde überprüft, ob das Potentiometer bei einer kompletten Umdrehung des Schrittmotors bzw. 400 Schritten, eine Differenz von 1 V anzeigt. Dies wurde zum einen manuell und zum anderen PC-gesteuert durchgeführt. Dabei zeigte das Potentiometer jeweils bei einer Umdrehung bzw. 400 Schritten keine Differenz von 1 V. In Tabelle 4.1 sind die angezeigten Spannungswerte für die unterschiedlichen Umdrehungen bzw. Schritte gezeigt.

Umdrehungen	Spannung/V (PC)	Spannung/V (manuell)	Sollwerte/V
0	5,99	5,99	6,00
1	4,88	4,87	5,00
2	4,40	4,35	4,00
3	3,39	3,34	3,00

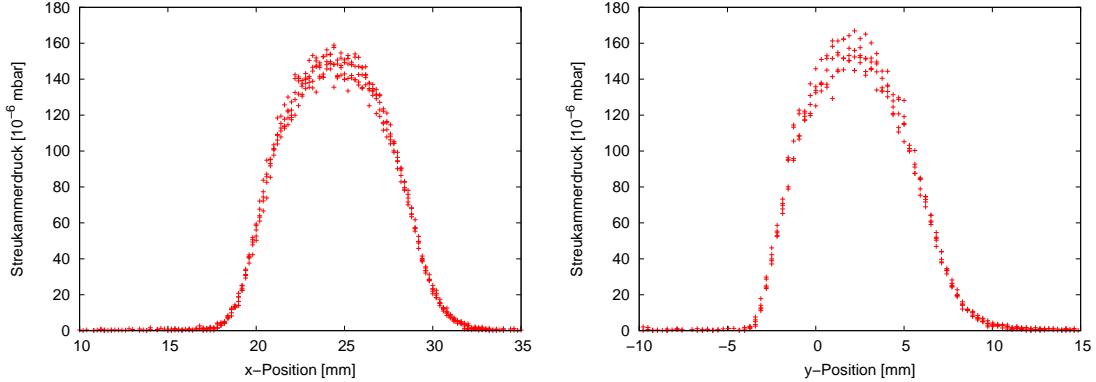
**Tabelle 4.1:** Angezeigte Spannungswerte am Potentiometer bei Drehung des Schrittmotors. Die Drehungen wurden einmal computergesteuert durchgeführt und dann manuell wiederholt. Bei einer kompletten Umdrehung des Motors gibt das Potentiometer keine Spannungsdifferenz von 1 V aus.

Da der Schrittmotor durch die PC-Steuerung exakt 400 Schritte macht, und bei der manuellen Steuerung darauf geachtet wurde, die Gewindestange genau einmal komplett zu drehen, konnte nur ein defektes Potentiometer für die abweichenden Spannungswerte verantwortlich sein. Das Potentiometer wurde daraufhin ausgetauscht und das neue Potentiometer zeigte dann bei 400 Schritten des Schrittmotors eine Spannungsdifferenz von 1 V an.

Da das Potentiometer ein Maß für die Bewegungsweite ist, muss dies der Grund dafür sein, dass eine Reproduzierbarkeit des maximalen Druckanstieges in der Streukammer nicht gegeben war. Bei der Drehung des Motors wurde zwar ein Spannungsunterschied von zum Beispiel 0,1 V angezeigt, eine Verschiebung von 0,05 mm wurde jedoch nicht realisiert. Daher konnte der Kollimator nach mehrmaligem Hin- und Zurückschieben um einen bestimmten Spannungswert nicht wieder in der Ausgangsstellung sein und es war nicht möglich den maximalen Druckanstieg in der Streukammer zu reproduzieren.

Nach diesen Überprüfungen und Änderungen der Schiebedurchführungen war es möglich eine Einstellung von Skimmer und Kollimator zu finden, bei der ein maximaler Druckanstieg beim Durchfahren der Monitorstäbe in der Streukammer erreicht werden konnte, der mit früheren Drücken vergleichbar ist. Ein solches Strahlprofil ist in Abbildung 4.11 abgebildet. Diese Einstellung von Skimmer und Kollimator wird belassen, um einen Kollimator mit schlitzförmiger Öffnung einzusetzen und die Eigenschaften des dadurch geformten Clusterstrahls zu untersuchen. Der Einsatz des Schlitzkollimators wird in

Kapitel 5 vorgestellt.



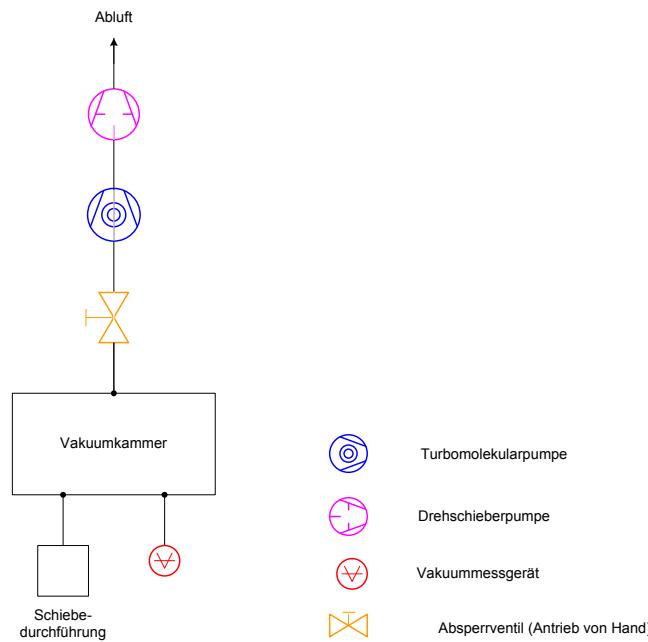
**Abbildung 4.11:** Profil des Clusterstrahls in der Streukammer. Links: horizontales Profil, recht: vertikales Profil.

### 4.1.3 Belastungstest der Schiebedurchführung

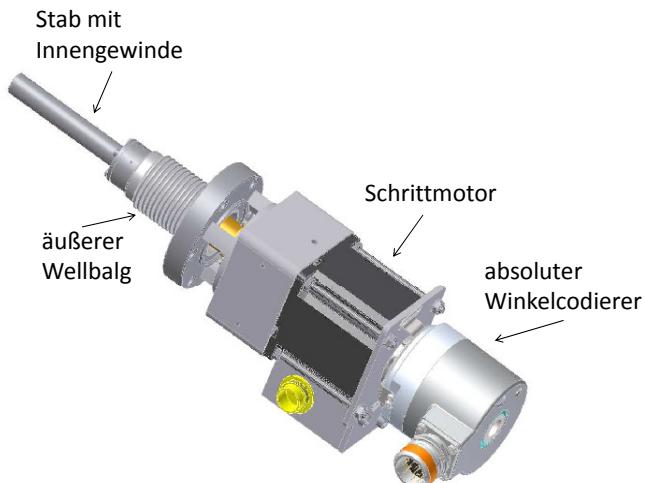
Beim zukünftigen  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment ist es wichtig, dass ein optimaler Betrieb des Cluster-Jet Targets gewährleistet ist. Dazu gehört auch, dass jederzeit die Positionen von Skimmer und Kollimator verändert werden können, um den Clusterstrahl optimal durch die Strahlrohre hindurchzuführen. Die Verschiebung von Skimmer und Kollimator erfolgt über eine Schiebedurchführung (vgl. Abbildung 4.7). Um während des  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experimentes einen Defekt dieser Steuerung auf Grund von Verschleiß auszuschließen, wurde ein Belastungstest der beim MCT2 verwendeten Schiebedurchführungen vorgenommen. Dazu wurde die Schiebedurchführung, die den Kollimator von rechts unten nach links oben verschiebt, aus dem Target ausgebaut und in einen Testvakuumpumpstand eingebaut. Der Testvakuumpumpstand dient dazu, die Bedingungen zu schaffen, unter denen die Schiebedurchführung während des Targetbetriebs arbeitet. Das Vakiumsystem des Testpumpstandes ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Die Vakuumkammer des Testpumpstandes wird durch eine Turbomolekularpumpe mit einem Saugvermögen von  $150 \frac{\ell}{s}$  evakuiert. Als Vorpumpe wird eine Drehschieberpumpe (Saugvermögen  $16 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ ) eingesetzt. Für den Belastungstest wurde der Schrittmotor jeweils 1600 Schritte in beide Bewegungsrichtungen gefahren. Das entspricht einer Anzahl von vier Umdrehungen und der

maximalen Auslenkung des Kreuztisches von 2 mm. Diese Bewegung wurde insgesamt 10000 mal computergesteuert wiederholt. 10000 Verschiebungen entsprechen großzügig der Anzahl an Verschiebungen, die während des Betriebes des  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experimentes durchgeführt werden. Es wurde dabei beobachtet, ob der Motor ruhig und ohne Auffälligkeiten läuft. Abschließend wurde die Schrittmotorsteuerung auseinander gebaut und vor allem die Gewindestange und das Innengewinde des Stabes auf Abnutzungerscheinungen hin untersucht, die nicht beobachtet werden konnten. Der Schrittmotor lief während des gesamten Belastungstests ruhig und ohne Auffälligkeiten. Auf Grund dieses Belastungstests kann die Schiebedurchführung für Skimmer und Kollimator für das endgültige Cluster-Jet Target für das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment verwendet werden.

Eine Änderung der Schiebedurchführung ist trotz des positiv ausgefallenen Belastungstest geplant. Neben einigen Verbesserungen, was die Halterung und Lage der einzelnen Elemente betrifft, werden die Potentiometer, die zur Überprüfung der Position von Skimmer und Kollimator dienen, durch einen absoluten Winkelcodierer ersetzt. Der Winkelcodierer speichert zu jeder Zeit über einen vierstelligen Code die absolute Position von Skimmer bzw. Kollimator. Dadurch entfällt eine indirekte Positionsüberprüfung über die Spannungswerte des Potentiometers. In Abbildung 4.13 ist die geplante Schiebedurchführung mit dem absoluten Winkelcodierer dargestellt.



**Abbildung 4.12:** Testvakuumpumpenstand. Für den Belastungstest ist die Schiebedurchführung in eine Vakuumkammer eingebracht. Die Vakuumkammer wird durch eine Turbomolekularpumpe, die durch eine Drehschieberpumpe vorgepumpt wird, evakuiert.



**Abbildung 4.13:** Geplante Schiebedurchführung für Skimmer und Kollimator. Das Potentiometer wird durch einen absoluten Winkelcodierer ersetzt, der über eine Hohlwelle mit eingearbeiteter Klemme mit der Welle des Schrittmotors verbunden ist.

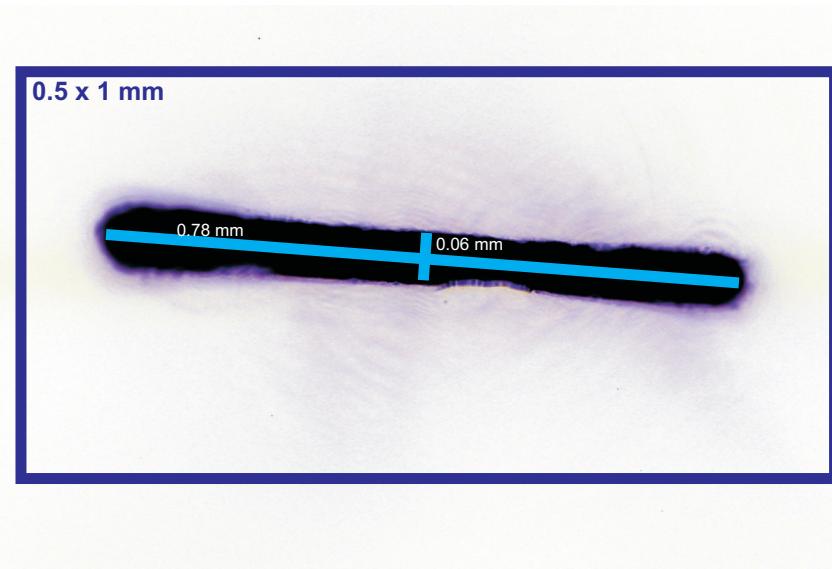


## 5 Systematische Untersuchungen des schlitzförmigen Clusterstrahls

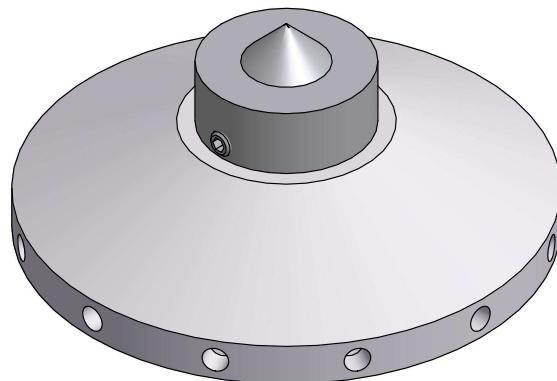
Der Antiprotonenstrahl, mit dem der Clusterstrahl beim  $\bar{P}$ ANDA-Experiment wechselwirkt, hat eine minimale Ausdehnung von etwa  $100\text{ }\mu\text{m}$ . Um den Clusterstrahl soweit zu formen, dass er im Wesentlichen nur noch die Ausdehnung des späteren Überlappbereiches hat, kann ein Kollimator mit schlitzförmiger Öffnung eingesetzt werden. Dieser schneidet alle Bereiche des Clusterstrahls aus, die nicht mit dem Antiprotonenstrahl überlappen und somit nicht zu einer Wechselwirkung beitragen. Außerdem wird durch den Einsatz eines Schlitzkollimators der Untergrund in der Streukammer reduziert, was beim  $\bar{P}$ ANDA-Experiment zu einer Minimierung der Untergrundreaktionen führt. Zudem erhöht sich dadurch die Lebensdauer des Antiprotonenstrahls im Beschleunigerring. Im Folgenden werden die ersten Untersuchungsergebnisse des so geformten Clusterstrahls vorgestellt.

## 5.1 Erste Messungen des Clusterstrahls in der Streukammer

Im Münsteraner Cluster-Jet Target wird zur Zeit ein Schlitzkollimator verwendet, der eine Länge von 0,78 mm und eine Breite von 0,06 mm besitzt. Eine vergrößerte Aufnahme der Öffnung des Schlitzkollimators ist in Abbildung 5.1 gezeigt. Der Schlitz ist in einen Hohlkegel aus Edelstahl eingelasert (vgl. Abbildung 5.2).

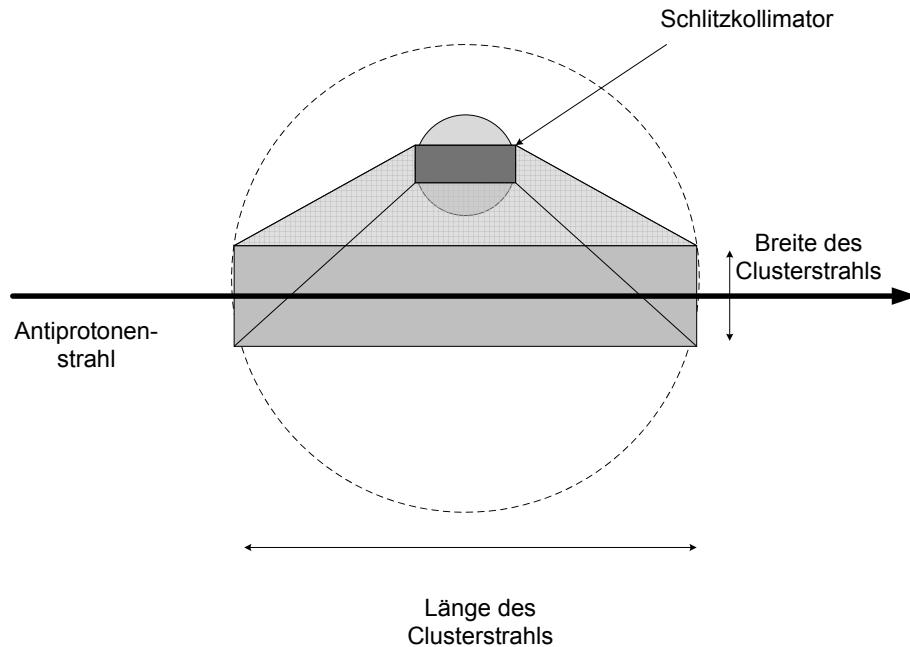


**Abbildung 5.1:** Vergrößerte Aufnahme des Schlitzkollimators durch ein Lichtmikroskop.



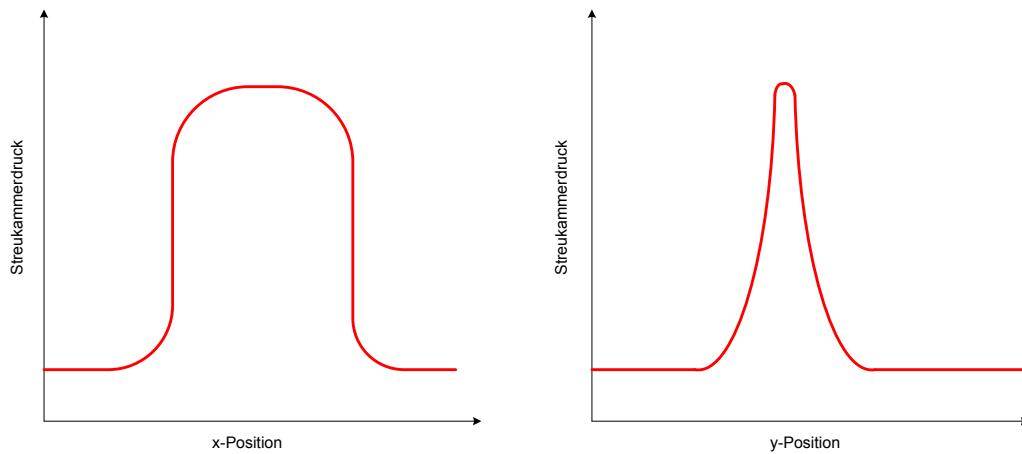
**Abbildung 5.2:** Abbildung des Schlitzkollimators. Der Schlitz ist in einen Hohlkegel aus Edelstahl eingelasert (oben).

Durch den Schlitzkollimator wird der Clusterstrahl soweit geformt, dass er im Wesentlichen in der Streukammer die Abmessungen des späteren Überlappbereiches besitzt, um mögliche Untergrundreaktionen beim zukünftigen Experiment zu minimieren. Vereinfacht ist dieser Zuschnitt in Abbildung 5.3 dargestellt.



**Abbildung 5.3:** Vereinfachte Darstellung des durch den Schlitzkollimator geformten Clusterstrahls. Durch den Schlitzkollimator werden die innerhalb des Kreises weiß gezeichneten Bereiche weggeschnitten, sodass sie nicht mehr zum Untergrund am Wechselwirkungspunkt beitragen.

Der Schlitzkollimator kann senkrecht oder waagerecht in das Cluster-Jet Target eingesetzt werden; aktuell befindet sich der Schlitzkollimator in waagerechter Position. Bei horizontalem Durchfahren des Monitorstabes ist ein breit verteilter Druckanstieg mit einem Plateau zu erwarten, da dabei die Längsseite des Clusterstrahls abgefahrt wird (vgl. Abbildung 5.7). In vertikaler Richtung ist ein scharfer Druckanstieg zu erwarten, da mit dem Monitorstab die schmale Breite des Clusterstrahls durchfahren wird (vgl. Abbildung 5.8). In Abbildung 5.4 sind die erwarteten Strahlprofile dargestellt.



**Abbildung 5.4:** Erwartete Profile des durch den Schlitzkollimator geformten Clusterstrahls. Allgemein sind Rechteckfunktionen für den Druckanstieg erwartet. Auf Grund von Kanteneffekten werden die Profile jedoch abgerundet. Links: horizontales Profil. Erwartet wird eine breite Verteilung des Druckanstieges mit einem Plateau. Rechts: vertikales Profil. Erwartet wird ein scharfer Anstieg des Druckes.

Erste Messungen des Druckanstieges durch das Monitorsystem in der Streukammer bei Einstellung von Skimmer und Kollimator mit höchstem Druckanstieg ergaben Profile des Clusterstrahls, wie sie in Abbildung 5.6 gezeigt sind. Den Erwartungen entsprechend ergibt die horizontale Messung eine breite Verteilung und ein Plateau. Die vertikale Messung zeigt einen scharfen Druckanstieg, da der Schlitzkollimator waagerecht in das Target eingesetzt wurde. Aus diesen Profilen kann die Breite und Länge des Clusterstrahls in der Streukammer abgeschätzt werden. Der Strahl hat demnach eine Breite von etwa 1 – 2 mm und eine ungefähre Länge von 14 – 15 mm.

An Hand dieser Profile ist aufgefallen, dass das horizontale Profil kein glattes Plateau aufweist. Es ist eine deutliche Einbuchtung und ein Abfall des Druckanstieges zu erkennen, der in allen aufgenommen Profilen reproduzierbar ist. Als Grund dafür wurde zunächst ein Zufrieren von Skimmer bzw. Kollimator angenommen. Daher wurden Skimmer und Kollimator durch Schließen eines Shutters zwischen Lavaldüse und Skimmer

auf Raumtemperatur gebracht, ohne die Gaszufuhr zu schließen. Dies zeigte keinen Effekt in den anschließend aufgenommenen Profilen.

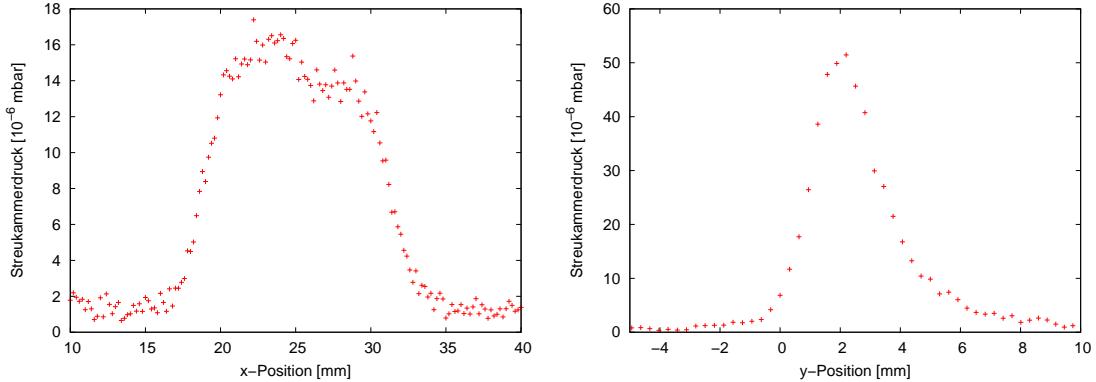


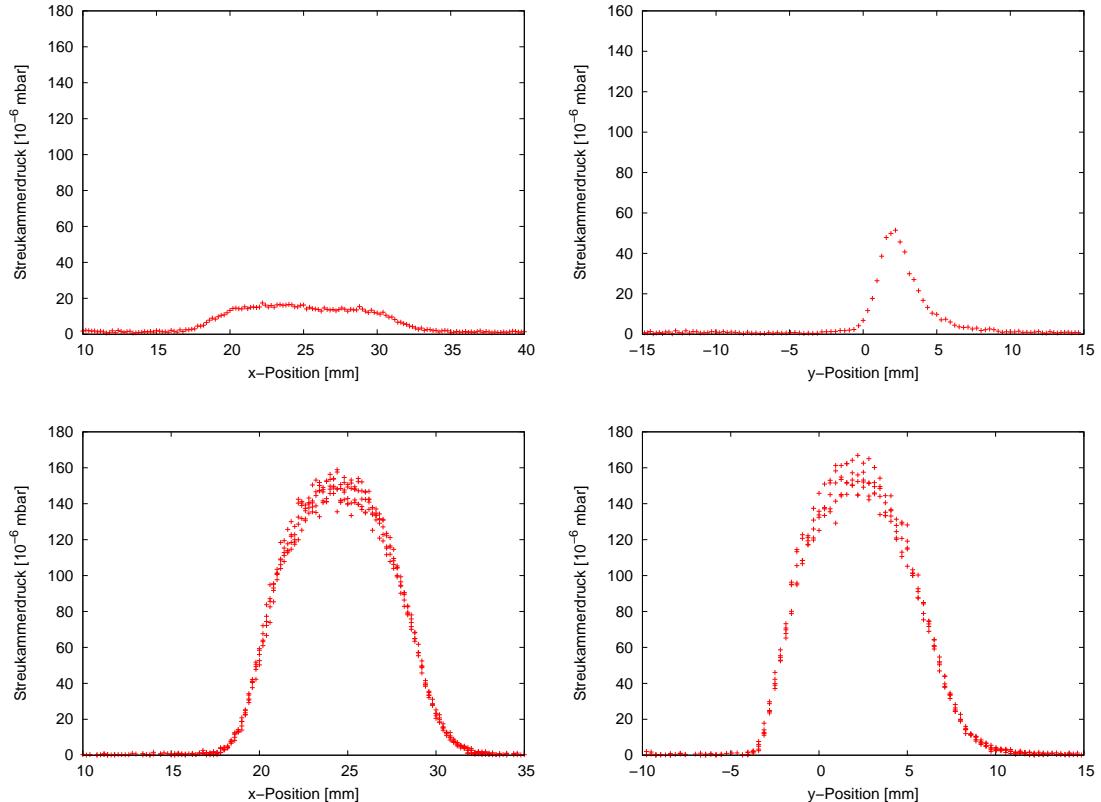
Abbildung 5.5: Clusterstrahlprofile in der Streukammer.

Bei genauerer Betrachtung der Aufnahme des Schlitzkollimators, ist festzustellen, dass auf Grund der geringen Schlitzbreite der eingearbeitete Schlitz nicht absolut gleichmäßig gelasert ist und einige Unebenheiten aufweist. Etwa in der Mitte des Schlitzes ist die Breite deutlich geringer (einige  $\mu\text{m}$ ) als an den Seiten und zudem ist die linke Seite breiter als die rechte. Werden diese Unebenheiten mit dem aufgenommenen Profil verglichen, so stimmt die Position der Einbuchtung des Plateaus in etwa mit der engsten Stelle des Schlitzkollimators überein. Damit kann dieser Effekt mit der Form des Schlitzkollimators erklärt werden. Auch der Abfall des Druckanstieges im rechten Bereich des Clusterstrahls ergibt sich aus der Geometrie der Schlitzform des Kollimators.

Somit zeigt sich, dass der Clusterstrahl leicht formbar ist und die Form des eingesetzten Kollimators in der Streukammer genau reproduziert werden kann.

Auffällig an den ersten aufgenommen Clusterstrahlprofilen ist zudem, dass der maximale Druckanstieg in der Streukammer bei Durchfahren der Monitorstäbe nicht mit dem des runden Clusterstrahls vergleichbar ist. Dieser Effekt wird im folgenden Abschnitt näher untersucht.

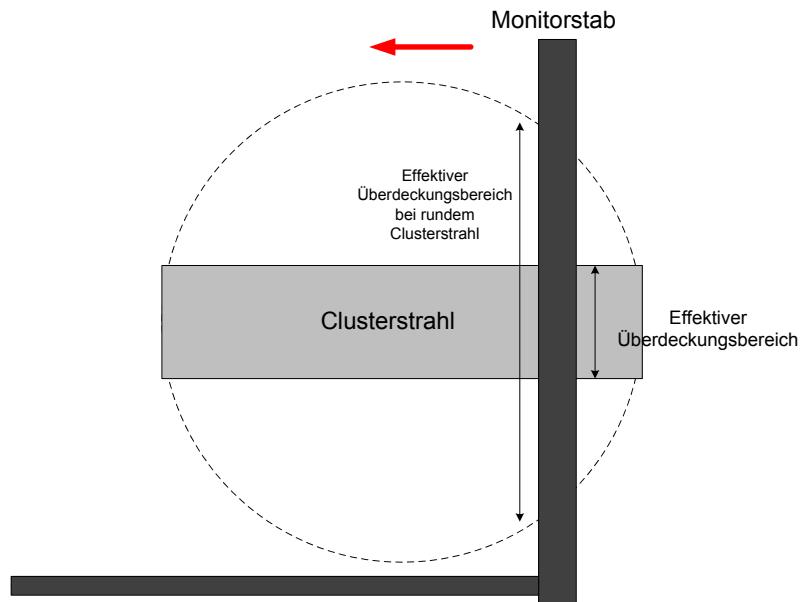
## 5.2 Untersuchungen des maximalen Druckanstieges in der Streukammer



**Abbildung 5.6:** Vergleich des maximalen Druckanstieges bei Schlitz- und rundem Kollimator. Oben: Clusterstrahlprofil bei Einsatz des Schlitzkollimators, unten: Clusterstrahlprofil bei Einsatz des runden Kollimators.

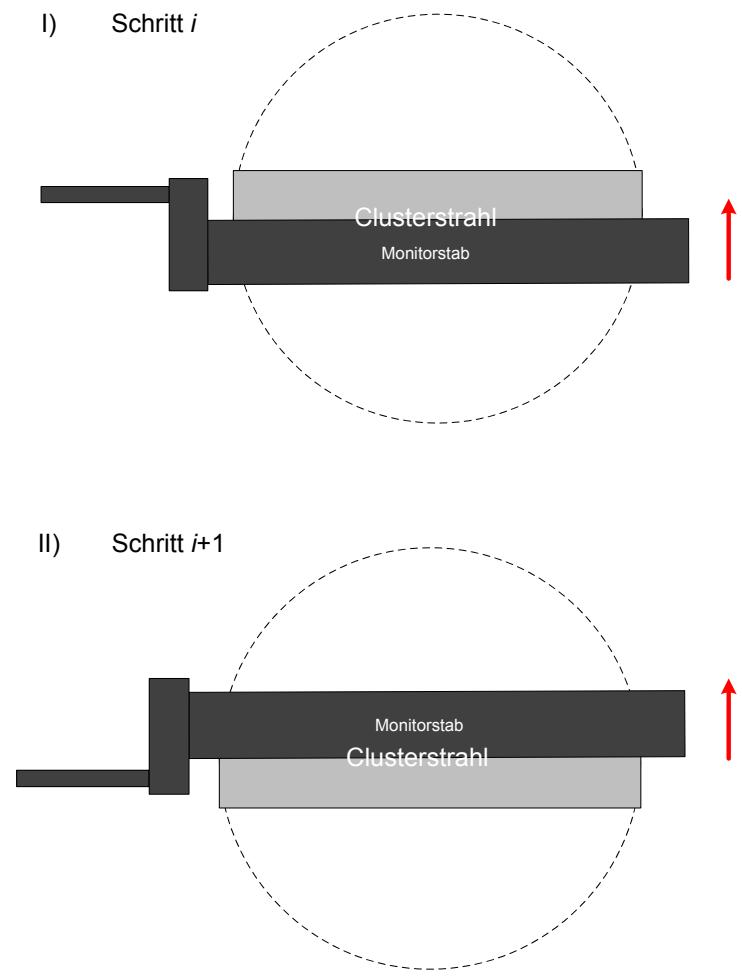
An den Profilen des Clusterstrahls in der Streukammer ist zu erkennen, dass der maximale Druckanstieg in beiden Richtungen viel niedriger ist als bei Messungen mit dem runden Kollimator. In der horizontalen Richtung ist etwa ein Faktor sieben vorhanden und in vertikaler Richtung ergibt sich ein Unterschied um einen Faktor von etwa drei.

Bei dem horizontalen Profil entspricht dieser Effekt den Erwartungen, da durch den Schlitzkollimator nur ein kleiner Teil des ursprünglichen Clusterstrahls ausgeschnitten wird und daher durch den Monitorstab weniger Cluster aufgebrochen werden, die zu einem Druckanstieg führen. Dies ist in Abbildung 5.7 vereinfacht dargestellt.



**Abbildung 5.7:** Vereinfachte Darstellung des Überdeckungsbereiches von Clusterstrahl und Monitorstab. Die im Kreis weiß gezeichneten Bereiche sind durch den Schlitzkollimator aus dem Clusterstrahl ausgeschnitten und tragen nicht mehr zu einem Druckanstieg durch den Monitorstab in der Streukammer bei.

Der geringere Druckanstieg in vertikaler Richtung entspricht nicht den Erwartungen. Als Grund dafür wurde vermutet, dass Clusterstrahl und Monitorstab in etwa dieselbe Breite besitzen. Daher deckt der Stab, der schrittweise durch die Streukammer gefahren wird, vermutlich bei keinem Schritt den Clusterstrahl vollständig ab, was in Abbildung 5.8 gezeigt ist.

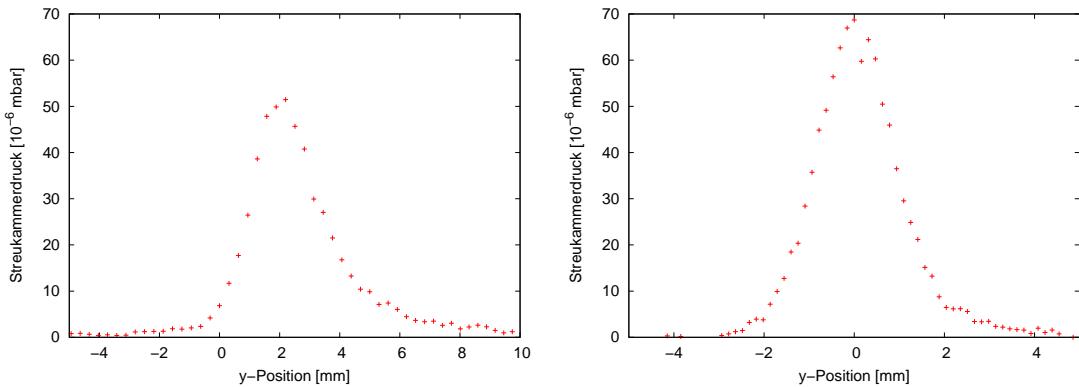


**Abbildung 5.8:** Vereinfachte Darstellung des Überdeckungsbereiches von Clusterstrahl und Monitorstab in vertikaler Richtung. Die beiden Darstellungen entsprechen einer Differenz von einem Schritt des Monitorstabes. Es ist zu erkennen, dass der Clusterstrahl nie vollständig vom Monitorstab überdeckt wird.

### Maßnahmen zur Verbesserung des Auflösungsvermögens in der Streukammer

Um zu überprüfen, ob der Monitorstab bei den Messungen den Clusterstrahl nicht vollständig überdeckt, kann die Schrittweite des Schrittmotors verringert werden.

Die bisherige Schrittweite der Schrittmotoren betrug 0,3 mm. Diese Weite ist halbiert worden und beträgt aktuell 0,15 mm. Durch die Verkleinerung der Schrittweite ist eine höhere Auflösung des Clusterstrahls erreicht. In Abbildung 5.9 sind zwei vertikale Profile des Clusterstrahls mit unterschiedlicher Schrittweite dargestellt. Man erkennt, dass durch die Verkleinerung der Schrittweite mehr Messpunkte erfasst werden, wodurch im Bereich des Maximaldruckes eine bessere Auflösung gegeben ist. Außerdem ist eine geringe Erhöhung des maximalen Druckanstieges erkennbar.



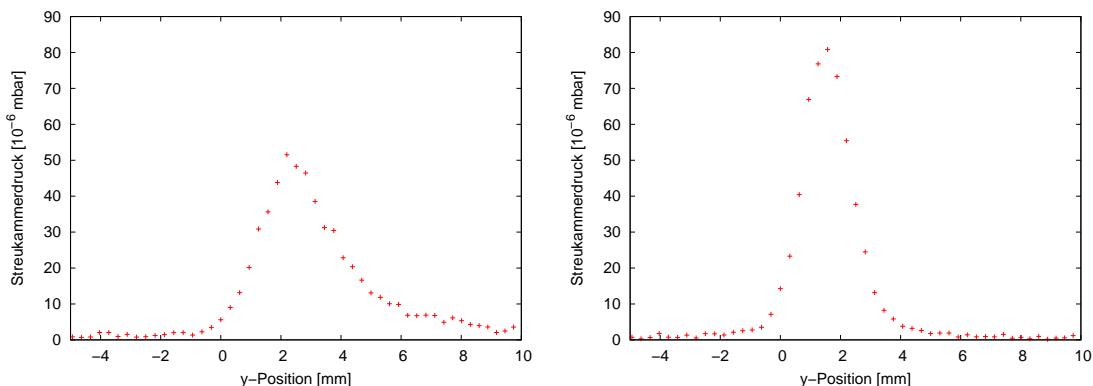
**Abbildung 5.9:** Vergleich der vertikalen Profile des Clusterstrahls bei unterschiedlichen Schrittweiten. Links: Schrittweite 0,3 mm, rechts: Schrittweite 0,15 mm.

Des Weiteren wurde vermutet, dass das Vakuummessgerät ein schnelles und kurzzeitiges Ansteigen des Druckes nicht schnell genug registrieren kann, sodass im Bereich des Clusterstrahls ein niedrigerer Druckanstieg angezeigt werden würde.

Um diese Vermutungen zu überprüfen, wurde die Wartezeit zwischen den Schritten des Schrittmotors vergrößert.

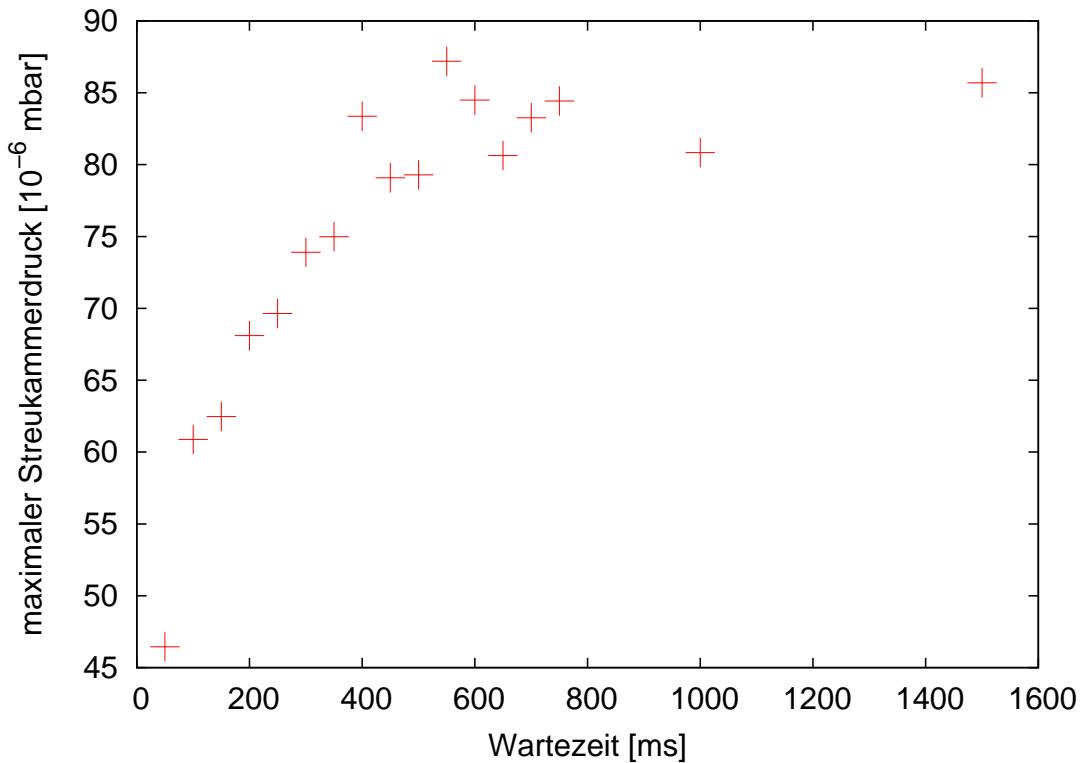
### Vergrößerung der Wartezeiten zwischen den einzelnen Schritten des Schrittmotor

Die Wartezeit zwischen den Schritten des Schrittmotors wurde von 50 ms bis auf 750 ms in Schritten von 50 ms erhöht und jeweils ein vertikales Profil unter gleichen Clusterstrahlbedingungen (25 K, 17 bar) aufgenommen. Zusätzlich wurden noch Strahlprofile bei einer Wartezeit von 1000 ms und 1500 ms gemessen. Die Schrittweite betrug in allen Messungen 0,3 mm. In Abbildung 5.10 sind die Profile für eine Wartezeit von 50 ms und 1000 ms gezeigt. Es ist deutlich ein Unterschied der maximalen Druckanstiege zu erkennen. Für eine Wartezeit von 50 ms liegt der maximale Druck bei etwa  $55 \cdot 10^{-6}$  mbar gegenüber einem Maximaldruck von etwa  $85 \cdot 10^{-6}$  mbar bei 1000 ms Wartezeit zwischen den einzelnen Schritten.



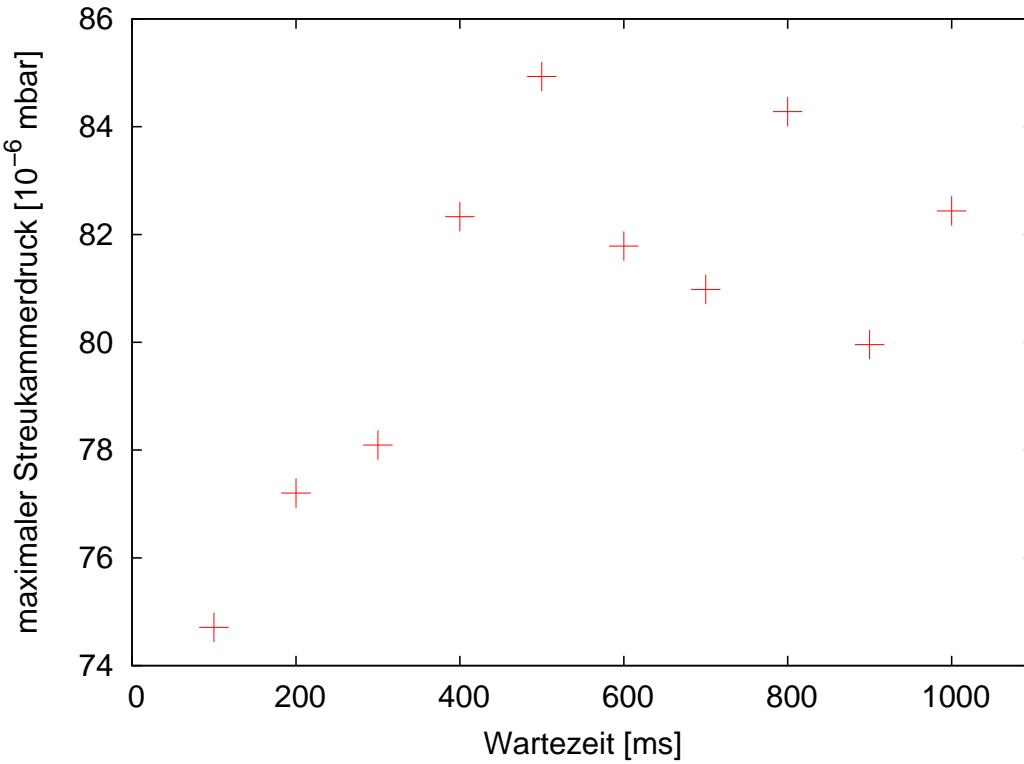
**Abbildung 5.10:** Vertikale Profile des Clusterstrahls in der Streukammer. Links: Profil bei einer Wartezeit von 50 ms zwischen den Schritten des Schrittmotors, rechts: Profil bei einer Wartezeit von 1000 ms zwischen den Schritten des Schrittmotors.

Zudem wurden die maximalen Druckanstiege der einzelnen Profile gegen die jeweilige Wartezeit aufgetragen, was in Abbildung 5.11 dargestellt ist. Daraus ist ersichtlich, dass der Maximaldruck bis zu einer Wartezeit von 400 ms ansteigt und danach annähernd konstant bleibt. Die erkennbaren Schwankungen bei Bedingungen von 17 bar und 25 K sind auf geringfügige Temperatur- und Druckschwankungen zurückzuführen.

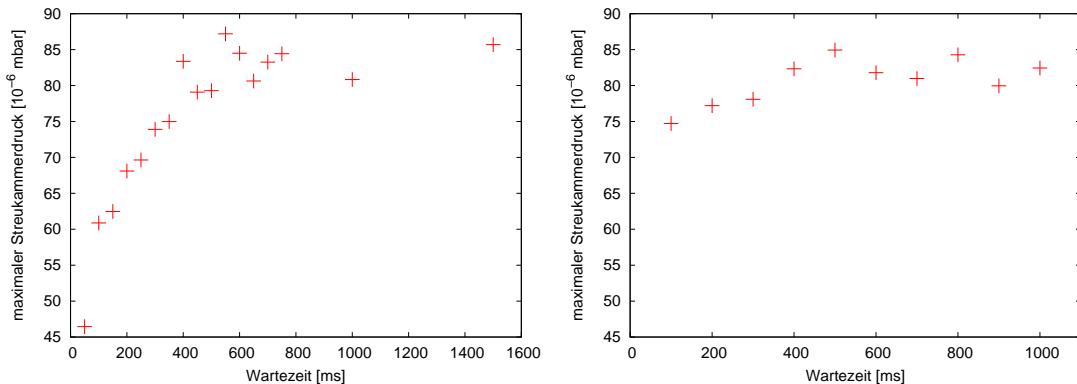


**Abbildung 5.11:** Zusammenhang zwischen der Wartezeit zwischen den Schritten des Schrittmotors und dem maximalen Druckanstieg in der Streukammer. Mit zunehmender Wartezeit erhöht sich der maximale Druck, bis er ab einer Wartezeit von etwa 400 ms und höher etwa konstant bleibt. Leichte Temperatur- und Druckschwankungen sind im Plateau ersichtlich.

Zusätzlich wurden auch die Wartezeiten bei der halbierten Schrittweite (0,15 mm) sukzessiv vergrößert und jeweils ein Profil aufgenommen. In Abbildung 5.12 ist der maximale Druckanstieg gegen die Wartezeit aufgetragen. Auch hier ist zu erkennen, dass der Maximaldruck bis zu einer Wartezeit von etwa 400 ms ansteigt und dann ein Plateau erreicht. Bei kleinen Wartezeiten liegt der maximale Druckanstieg bei halber Schrittweite immer über dem der einfachen Schrittweite, was in Abbildung 5.13 dargestellt ist. Die maximal erreichbaren Druckanstiege liegen bei beiden Schrittweiten aber im selben Bereich.



**Abbildung 5.12:** Zusammenhang zwischen der Wartezeit zwischen den Schritten des Schrittmotors und dem maximalen Druckanstieg in der Streukammer bei halbierter Schrittweite (0,15 mm). Mit zunehmender Wartezeit erhöht sich der maximale Druck in der Streukammer, bis er ab einer Wartezeit von etwa 400 ms nahezu konstant bleibt.

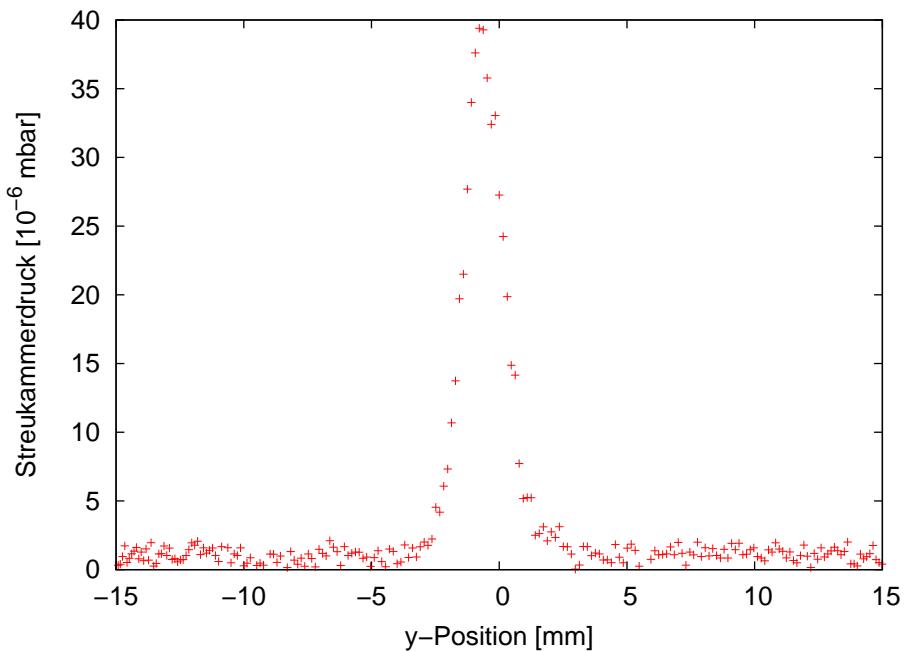


**Abbildung 5.13:** Maximaler Druckanstieg bei verschiedenen Wartezeiten für unterschiedliche Schrittweiten. Links: Schrittweite 0,3 mm, rechts: Schrittweite 0,15 mm. Es ist zu erkennen, dass bei kleinen Wartezeiten der Maximaldruck bei einer Schrittweite von 0,15 mm über dem der doppelten Schrittweite liegt. Für Wartezeiten ab 400 ms liegen die Maximaldrücke im selben Bereich.

### Einsatz eines dünneren Stabes

Um das Auflösungsvermögen des Monitorsystems weiter zu verbessern, wurde ein dünnerer Stab eingesetzt. Dieser Monitorstab hat einen Durchmesser von 0,5 mm (früher 1 mm). Mit diesem Stab wurden Clusterstrahlprofile in der Streukammer aufgenommen, was in Abbildung 5.14 gezeigt ist. Dabei wurde eine Schrittweite von 0,15 mm und eine Wartezeit von 500 ms eingestellt.

Der maximale Druckanstieg liegt im Bereich von etwa  $40 \cdot 10^{-6}$  mbar. Dies liegt vermeintlich unterhalb des mit dem breiteren Stab erzielten Druckanstieges. Da der Monitorstab aber nur noch den halben Durchmesser besitzt und dadurch nur noch etwa die Hälfte der Cluster aufbrechen können, ergibt sich daher ein Faktor zwei im maximalen Druckanstieg. Multipliziert man den gemessenen Maximaldruck mit zwei, ergibt sich ein Druckanstieg von etwa  $80 \cdot 10^{-6}$  mbar. Dieser Wert entspricht keiner weiteren Erhöhung des maximalen Druckanstieges in der Streukammer.



**Abbildung 5.14:** Profil des Clusterstrahls in der Streukammer bei einer Schrittweite von 0,15 mm, einer Wartezeit von 500 ms. Dabei wurde ein Stab mit einem Durchmesser von 0,5 mm verwendet.

Der maximale Druckanstieg in vertikaler Richtung in der Streukammer konnte durch die Verkleinerung der Schrittweite und der Vergrößerung der Wartezeiten verbessert werden. Der Einsatz eines dünneren Stabes brachte keine weiteren Verbesserungen. Der erzielte Druckanstieg liegt nicht im Bereich des Druckanstieges, der mit dem runden Kollimator erzielt werden konnte. Er liegt etwa um einen Faktor zwei unter den früheren Druckwerten. Vermutet wird, dass dies auf einen Blendeneffekt des Schlitzkollimators zurückzuführen sein könnte.

Um dies näher zu untersuchen, ist der Einsatz von Kollimatoren mit unterschiedlichen Schlitzbreiten bereits geplant.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

An der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster wurde im Jahr 2008 ein Prototyp eines Cluster-Jet Targtes für das  $\bar{P}$ ANDA-Experiment aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden einige Optimierungsarbeiten an den Schrittmotorsystemen des Monitorsystems und der Schiebedurchführung von Skimmer und Kollimator vorgenommen. Außerdem wurde ein Schlitzkollimator in das Target eingesetzt und der so geformte Clusterstrahl näher untersucht.

Die Stäbe des Monitorsystems in der Streukammer werden über Schrittmotoren gesteuert. In der Vergangenheit kam es dazu, dass sich die Wellen bzw. der Wellbalg, die die Verbindung zwischen Schrittmotor und Monitorstab darstellen, gelöst haben. Um ein Lösen zu vermeiden, wurden die Querschnitte der Wellen und dem Wellbalg verändert. Die Welle des Schrittmotors, die in den Wellbalg führt, wurde abgeflacht und der Querschnitt des Wellbalges durch Einfügen einer kleinen Platte entsprechend angepasst. Die Welle, die den Wellbalg mit der Mikrometerschraube verbindet, wurde speziell angefertigt und hat eine Dreiecksform. Der Querschnitt des Wellbalges wurde dementsprechend verändert, sodass ein Durchdrehen der Welle im Wellbalg nicht mehr möglich ist. Die Verbindung zur Mikrometerschraube hin wurde verstiftet. Außerdem wurden die Madenschrauben, mit denen der Wellbalg auf den Wellen befestigt war, gegen Sechskantschrauben mit Kontermuttern ausgetauscht, wodurch ein Lösen der Schrauben verhindert wird.

An der Schiebedurchführung von Skimmer und Kollimator, die wie beim Monitorsystem über Verbindungen mit einem Wellbalg verfügen, wurden ebenfalls die Madenschrauben

durch Sechskantschrauben mit Kontermutter ersetzt. Dadurch wurde im Vorfeld ein Lösen der Verschraubungen von Welle und Wellbalg vermieden.

Nach Wiedereinbau der Schiebedurchführung konnte ein gewohnter maximaler Druckanstieg von etwa  $200 \cdot 10^{-6}$  mbar durch das Monitorsystem in der Streukammer bei der zuvor ermittelten Einstellung von Skimmer und Kollimator nicht reproduziert werden. Durch systematisches Verschieben von Skimmer und Kollimator wurde die Einstellung mit maximalem Druckanstieg gesucht. Die gefundene Einstellung führte dennoch nicht zu dem gewünschten maximalen Druckanstieg in der Streukammer. Außerdem konnten die maximalen Druckanstiege nach Verschiebung von Skimmer und Kollimator bei gleicher Einstellung nicht reproduziert werden. Daher wurde vermutet, dass Skimmer und Kollimator nicht den vorgegebenen Bewegungen gefolgt waren. Daraufhin wurde die Gewindestange der Schiebedurchführung auf Abnutzung überprüft, was nicht der Fall war. Bei Beobachtung der Bewegung von Skimmer und Kollimator unter Vakuumbedingungen konnte festgestellt werden, dass sie der vorgegebenen Bewegung entsprach. Die Spannungswerte des Potentiometers, das den Kollimator von links unten nach rechts oben verschiebt, entsprachen aber nicht den eingestellten Positionen. Das Potentiometer wurde daraufhin ausgetauscht. Dadurch konnte eine Einstellung von Skimmer und Kollimator mit vergleichbarem maximalen Druckanstieg gegenüber früheren Werten gefunden werden.

Für das  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment ist ein optimaler und kontinuierlicher Betrieb des Cluster-Jet Targets wichtig. Auf Grund dessen wurde ein Belastungstest der Schiebedurchführung von Skimmer und Kollimator durchgeführt, um zu überprüfen, ob sie den Anforderungen des  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experimentes entspricht. Der Belastungstest verlief positiv und es waren keine Abnutzungserscheinungen an der Schiebedurchführung zu erkennen.

Dennoch sind Verbesserungen an den Halterungen und der Lage der einzelnen Elemente der Schiebedurchführung geplant. Außerdem ist geplant das Potentiometer, das zur Überprüfung der Position von Skimmer und Kollimator dient, gegen einen absoluten Winkelcodierer auszutauschen.

---

Im letzten Teil dieser Arbeit wurde der bisherige Kollimator mit runder Öffnung gegen einen Kollimator mit schlitzförmiger Öffnung ausgetauscht. Durch den Einsatz des Schlitzkollimators soll erreicht werden, dass der Clusterstrahl im Wesentlichen nur noch den Abmessungen des späteren Überlappbereiches mit dem Antiprotonenstrahls entspricht. Außerdem soll dadurch der Untergrund in der Streukammer verringert werden, sodass eine Minimierung der Untergrundreaktionen beim  $\bar{P}$ ANDA-Experiment gegeben ist.

Erste Messungen des Clusterstrahls in der Streukammer zeigten, dass die Form den Erwartungen entspricht und der Clusterstrahl durch einen Kollimator leicht formbar ist. Ein vergleichbarer Druckanstieg in der Streukammer im Vergleich zu Werten mit dem runden Kollimator konnte in horizontaler (Faktor sieben geringer) sowie in vertikaler Richtung (Faktor drei geringer) nicht erreicht werden. In horizontaler Richtung entsprach dies den Erwartungen, da der Überdeckungsbereich von Stab und Clusterstrahl im Vergleich zum runden Clusterstrahl geringer ist, sodass weniger Cluster am Stab aufbrechen und zu einem Druckanstieg führen können. In vertikaler Richtung entspricht der effektive Überdeckungsbereich von Stab und Clusterstrahl denen des runden Clusterstrahls, sodass ein geringerer Druckanstieg nicht zu erwarten war. Es wurde vermutet, dass der Monitorstab den Clusterstrahl auf Grund der geringen Breite nicht vollständig bei einem Durchlauf überdeckt. Um das Auflösungsvermögen zu verbessern, wurde die Schrittweite zwischen den Schritten des Schrittmotors von 0,3 mm auf 0,15 mm verringert. Dies führte zum einen zu mehr Messpunkten im Bereich des Clusterstrahls und zum anderen zu einer geringen Erhöhung des maximalen Druckanstieges.

Des Weiteren wurde vermutet, dass das Vakuummessgerät den schnellen und kurzzeitigen Druckanstieg nicht schnell genug registrieren kann. Daher wurde die Wartezeit zwischen den einzelnen Schritten des Schrittmotors zwischen 50 ms und 1500 ms variiert. Dadurch konnte ab einer Wartezeit von etwa 400 ms zwischen den Schritten ein Druckanstieg um mehr als 70 % erreicht werden. Größere Wartezeiten führten dabei zu keinem besseren Ergebnis. Die Vergrößerung der Wartezeiten wurde bei beiden Schrittweiten (0,3 mm und

0,15 mm) durchgeführt, was zu dem selben Ergebnis führte.

Durch die Vergrößerung der Wartezeiten konnte der maximale Druckanstieg in der Streukammer verbessert werden. Er ist dennoch um einen Faktor zwei geringer als bei rundem Clusterstrahl. Als letztes wurde noch ein dünnerer Monitorstab verwendet. Dieser besitzt einen Durchmesser von 0,5 mm. Der Einsatz des dünneren Stabes brachte keine weitere Verbesserung des maximalen Druckanstieges in der Streukammer.

Um zu überprüfen, ob der niedrigere Druckanstieg in der Streukammer ein Blendeneffekt des Schlitzkollimators ist, ist geplant, Kollimatoren mit unterschiedlicher Schlitzgröße einzusetzen.

# A Anhang

## A.1 Luminosität und Flächendichte

Die Luminosität  $\mathcal{L}$  beschreibt einen Zusammenhang zwischen einer geeigneten Ereignisrate und der dafür passenden Flächendichte des Cluster-Jet Targets. Sie ist bei internen Targets gegeben durch die Rate der Beschleunigerteilchen, die mit dem Target wechselwirken  $\dot{N}_{interact}$  und der Flächendichte der Targetteilchen  $\rho_T$ :

$$\mathcal{L}_{intern} = \dot{N}_{interact} \cdot \rho_T . \quad (A.1)$$

Die Ereignisrate  $\dot{N}_{interact}$ , die mit dem Target wechselwirken, ergibt sich aus der Zahl der Teilchen, die im Beschleunigerring umlaufen  $N_{beam}$  und deren Umlauffrequenz  $f_{beam}$ :

$$\dot{N}_{interact} = N_{beam} \cdot f_{beam} . \quad (A.2)$$

Durch Einsetzen von Gleichung A.2 in Gleichung A.1 ergibt sich die Luminosität für Experimente mit internen Targets zu:

$$\mathcal{L}_{intern} = N_{beam} \cdot f_{beam} \cdot \rho_T . \quad (A.3)$$

Die Gesamtereignisrate  $\dot{N}_{Exp}$  eines Experiments ist das Produkt des totalen Wirkungsquerschnittes  $\sigma_{tot}$  der Reaktion und der Luminosität  $\mathcal{L}$ . Formt man dies nach  $\mathcal{L}$  um,

$$\dot{N}_{Exp} = \sigma_{tot} \cdot \mathcal{L} \quad (\text{A.4})$$

$$\Leftrightarrow \mathcal{L} = \frac{\dot{N}_{Exp}}{\sigma_{tot}} \quad (\text{A.5})$$

kann mit bekannter Gesamtereignisrate und bekanntem Wirkungsquerschnitt eine Aussage über die maximale Luminosität des  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiments getroffen werden. Beim  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment entspricht die Gesamtereignisrate der maximalen Antiprotonenproduktionsrate von etwa  $2 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$  [FAI06] und der Wirkungsquerschnitt für die Proton-Antiproton-Abschaffung liegt etwa bei 100mb [A<sup>+</sup>08]. Daraus ergibt sich eine maximale Luminosität im Bereich von  $\mathcal{L}_{max} = 2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Setzt man dieses Ergebnis in Gleichung A.3 ein und formt diese nach der Flächendichte  $\rho_T$  um, ergibt sich mit einer maximalen Anzahl an gespeicherten Antiprotonen von  $N_{beam} = 1 \cdot 10^{11}$  und maximaler Umlauffrequenz von  $f_{beam} = 443 \text{ kHz}$  die zu erreichende Flächendichte des Targets zu  $\rho_T = 4 \cdot 10^{15} \frac{\text{Atome}}{\text{cm}^2}$ .

## A.2 Funktionsweise der verwendeten Vakuumpumpen

Das Münsteraner Cluster-Jet Target verfügt zur Zeit über vier unterschiedliche Arten von Vakuumpumpen, um den verschiedenen Druckanforderungen innerhalb des Targets gerecht zu werden. Es werden dafür Drehschieber-, Roots-, Turbomolekular- und Kryopumpen verwendet. Das aktuelle Vakuumsystem ist noch nicht optimal für den Einsatz am  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment ausgerichtet. In der aktuellen Planung sind lediglich Drehschieber-, Roots- und Turbomolekularpumpen vorgesehen. Das hat den Vorteil, dass die Regenerationsphasen<sup>1</sup> der Kryopumpen entfallen und so Wartungsarbeiten am  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment schneller durchgeführt werden können. Im Folgenden wird die Funktionsweise der vier beim MCT2 verwendeten Vakuumpumpen näher erläutert.

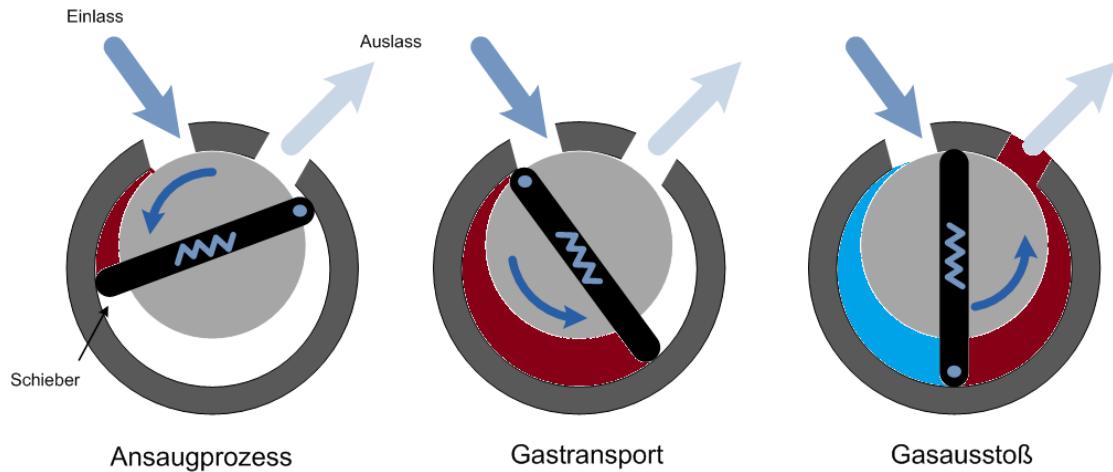
### Die Drehschieberpumpe

Die Drehschieberpumpe besteht aus einem zylinderförmigen Gehäuse, in dem ein exzentrisch gelagerter Rotor eingebracht ist (vgl. Abbildung A.1). Der Rotor verfügt wiederum über zwei oder mehr Schlitze in denen Schieber gelagert sind [Wut06]. Eine Feder verbindet die Schieber mit dem Rotor. Durch die Federn und die Zentripetalkraft werden die Schieber bei der Rotation an die Gehäusewand gedrückt und gleiten dort entlang. Bei einer Rotation entsteht eine Volumenvergrößerung, sodass an der Saugöffnung des Gehäuses eine Sogwirkung entsteht und Gas in das Gehäuse eindringen kann. Die Schieber drängen das Gas vor sich her und verdichten es durch die exzentrische Lagerung des Rotors und der damit verbundenen Volumenverkleinerung zwischen zwei Schiebern. Das so verdichtete Gas wird schließlich durch den Auslass ausgestoßen. In Abbildung A.1 ist die Arbeitsweise der Drehschieberpumpe schematisch dargestellt. Da zwischen Schieber und Gehäusewand immer ein kleiner Zwischenraum besteht, sind viele Drehschieberpumpen ölgedichtet, um eine Verminderung des Saugvermögens zu vermeiden. Dazu gelangt über kleine Kanäle und Bohrungen ein Ölfilm auf die Stirnseiten

---

<sup>1</sup>Durch den Einsatz von Kryopumpen kann das Target erst belüftet werden, wenn die Kaltbleche auf Raumtemperatur erwärmt werden. In der Regel ist dies erst nach 24 Stunden der Fall.

der Schieber und der Gehäusedeckel, sodass die Schieber bei der Rotation einen Ölfilm vor sich herschieben [Wut06]. Dabei wird eine gute Dichtung zwischen Schieber und Gehäuse und zusätzlich eine Schmierung des Rotors erreicht. Drehschieberpumpen besitzen in der Regel ein Saugvermögen zwischen  $2,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  und  $630 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ . Dabei können sie einen Enddruck im Bereich von  $10^{-3}$  mbar erzielen [VAC]. Drehschieberpumpen können als Vorpumpen für Roots- und Turbomolekularpumpen eingesetzt werden.

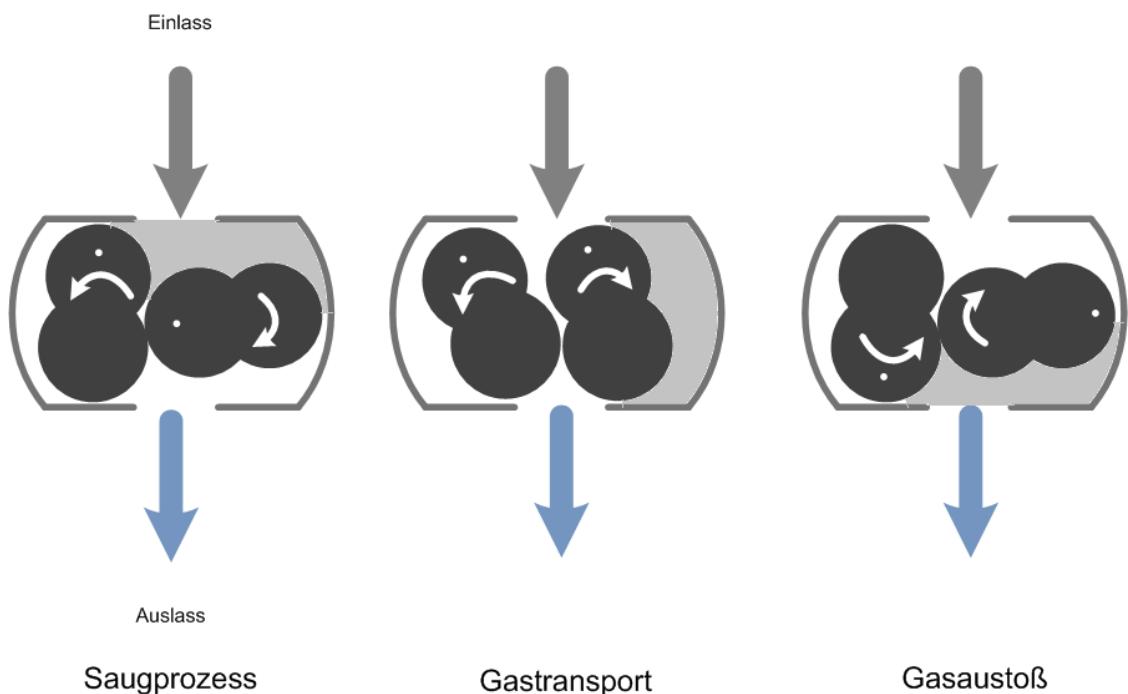


**Abbildung A.1:** Schematischer Aufbau und Wirkweise der Drehschieberpumpe. Durch den exzentrisch gelagerten Rotor und die durch Federn variabel gelagerten Schieber entsteht bei Drehung eine Volumenänderung, die zum Ansaugprozess führt. Bei weiterer Drehung wird das Volumen wieder verkleinert, sodass das Gas verdichtet und schließlich ausgestoßen wird.

## Die Rootspumpe

Die Roots- oder auch Wälzkolbenpumpe arbeitet mit zwei achtförmigen Wälzkolben, die sich synchron, dabei aber berührungslos in einem Gehäuse gegenläufig drehen. Diese synchrone, berührungslose Bewegung wird durch die Verlängerung der Wellenenden ermöglicht, an denen sich ein Zahnradpaar mit gleicher Anzahl an Zähnen befindet [VAC]. Die schematische Wirkweise ist in Abbildung A.2 gezeigt. Durch die gegenläufige Rotation der Wälzkolben entstehen Räume, die vollständig zwischen Gehäusewand und den beiden Wälzkolben abgeschlossen sind. Bei der Rotation verändert sich das Volumen dieser Räume. Am Einlass wird es zunächst vergrößert, sodass eine Sogwirkung eintritt, bevor

bei weiterer Drehung ein abgeschlossenes Volumen entsteht (vgl. Abb. A.2), das durch die Kolben zum Auslass hingeführt und dort ausgestoßen wird. Dieses Volumen entsteht bei einer Umdrehung insgesamt viermal, sodass mit hohen Drehzahlen ein hohes effektives Saugvermögen erzielt werden kann [Wut06]. Die Drehzahlen von Rootspumpen liegen im Bereich von  $1500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  bis  $3000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  [Wut06]. Diese Drehzahlen sind möglich, da im Gehäuse selbst keine Reibung auftritt (Daher entfällt auch eine Schmierung). Durch den berührungsfreien Betrieb der beiden Wälzkolben verbleiben immer kleine Spalte zwischen den Kolben selbst und auch zwischen Kolben und Gehäusewand in der Größenordnung von 0,1 mm. Da die Pumpe im Gehäuse aber trocken läuft (keine Schmierung durch z. B. Öl) wird durch die kleinen Spalte das Saugvermögen verringert. Dennoch sind mit einer Rootspumpe Drücke von unter  $10^{-3}$  mbar möglich [Wut06].



**Abbildung A.2:** Schematischer Aufbau und Wirkweise der Rootspumpe. Durch zwei aufeinander gegenläufig abrollender, achtförmiger Wälzkolben entstehen im Innern der Pumpe Volumina. Im Bereich des Einlasses vergrößert sich bei Drehung der Wälzkolben zunächst dieses Volumen, wodurch ein Ansaugprozess ermöglicht wird. Im weiteren Verlauf wird das Gas verdichtet und schließlich ausgestoßen.

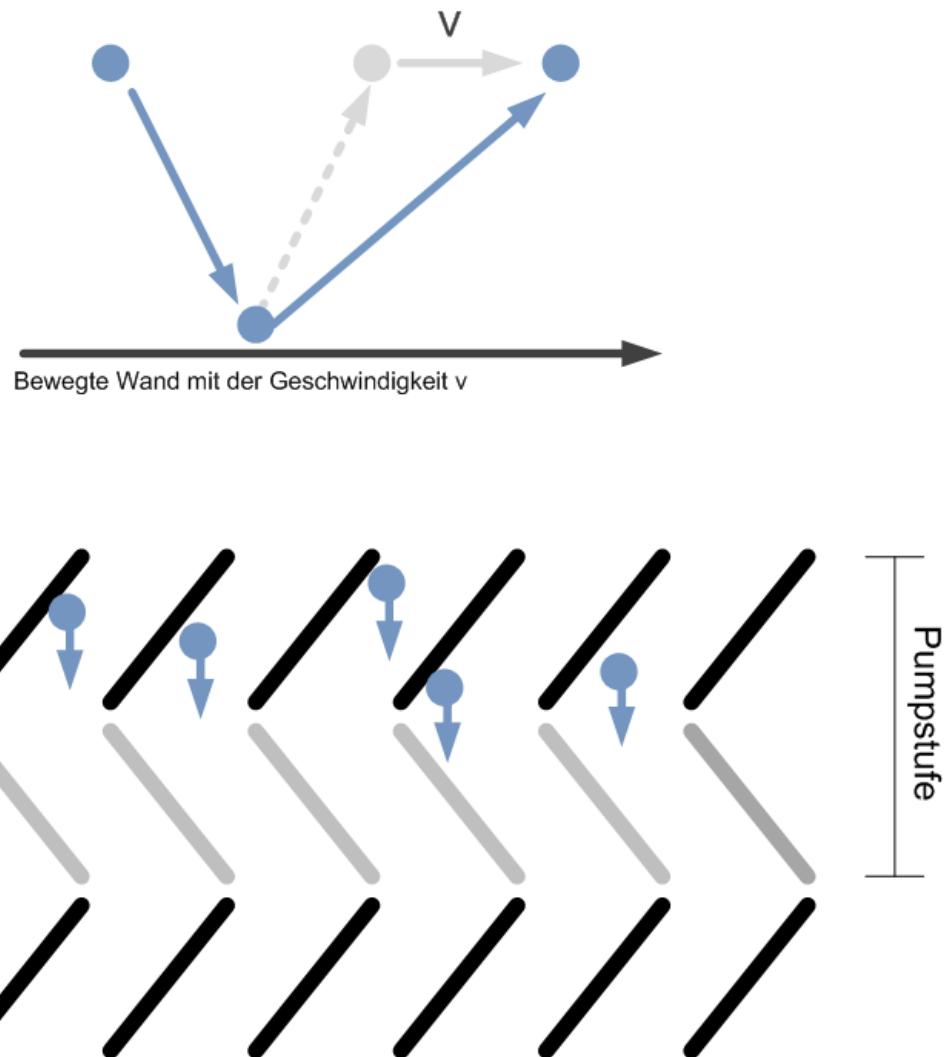
## Die Turbomolekularpumpe

Trifft ein Gasteilchen auf eine bewegte Fläche, so bekommt es einen Impuls in deren Bewegungsrichtung. Befindet sich gegenüber der bewegten Fläche eine weitere, so wiederholt sich der Vorgang. Aus der ungerichteten Teilchenbewegung entsteht eine gerichtete. Dieses Prinzip machen sich Turbomolekularpumpen zu Nutze. Wie der Name schon aussagt, ähnelt die Bauweise einer Turbine. Die Turbomolekularpumpe besteht im Wesentlichen aus schnell bewegten Rotoren, die sich mit sogenannten Statoren abwechseln, deren angeschrägte Flächen spiegelsymmetrisch zu denen der Rotoren angeordnet sind. Die Wirkweise der Turbomolekularpumpe ist in Abbildung A.3 vereinfacht dargestellt. Treffen nun Teilchen auf die Flächen der Rotoren, bekommen sie einen Impuls in die Drehrichtung und werden auf die Statoren abgelenkt. Von dort gelangen die Teilchen wieder auf einen Rotor, der eine zweite Pumpstufe bildet; das Prinzip wiederholt sich. Die Gasteilchen werden schließlich durch einen Auslass abgeführt. Die Turbomolekularpumpe kann erst sinnvoll ab einem Druckbereich stattfinden, in der molekulare Gasströmung vorliegt, also wenn die mittlere freie Weglänge der Teilchen größer ist als die Abstände der Rotor- und Statorflächen. Da im laminaren Strömungsbereich noch Stöße unter den Gasteilchen stattfinden, verringern diese den Pumpeffekt durch die zusätzliche Geschwindigkeitskomponente (ausgelöst durch die Rotoren). Der Übergangsbereich von laminarer zu molekularer Strömung liegt zwischen  $10^{-1}$  mbar und  $10^{-3}$  mbar; die mittlere freie Weglänge der Gasteilchen entspricht ab einem Druck von etwa  $10^{-2}$  mbar den Abständen der Leitbleche von Rotor und Stator [VAC], sodass ein effektiver Betrieb ab diesem Druckbereich erst möglich ist. Turbomolekularpumpen arbeiten mit sehr hohen Drehzahlen und sind sehr empfindlich gegenüber Temperaturänderungen, die zur Verminderung der Lebensdauer der Pumpe führen können. Auch daher ist es wichtig, diese Pumpe erst bei geringen Drücken zu betreiben, um Temperaturanstiege durch Gasreibung zu vermeiden [Wut06]. Die erreichbaren Enddrücke liegen im Bereich von unter  $10^{-8}$  mbar<sup>2</sup> [Wut06]. Turbomolekularpumpen haben meistens geringe Abmessungen und können je nach Bauart in jeder Position, auch über Kopf, eingesetzt werden,

---

<sup>2</sup>noch niedrigere Drücke können durch ein Ausheizen der Pumpe erreicht werden [Wut06]

was sie zu einer vielseitig verwendbaren Vakuumpumpe macht. Als Vorpumpe für die Turbomolekularpumpe können Drehschieberpumpen eingesetzt werden.



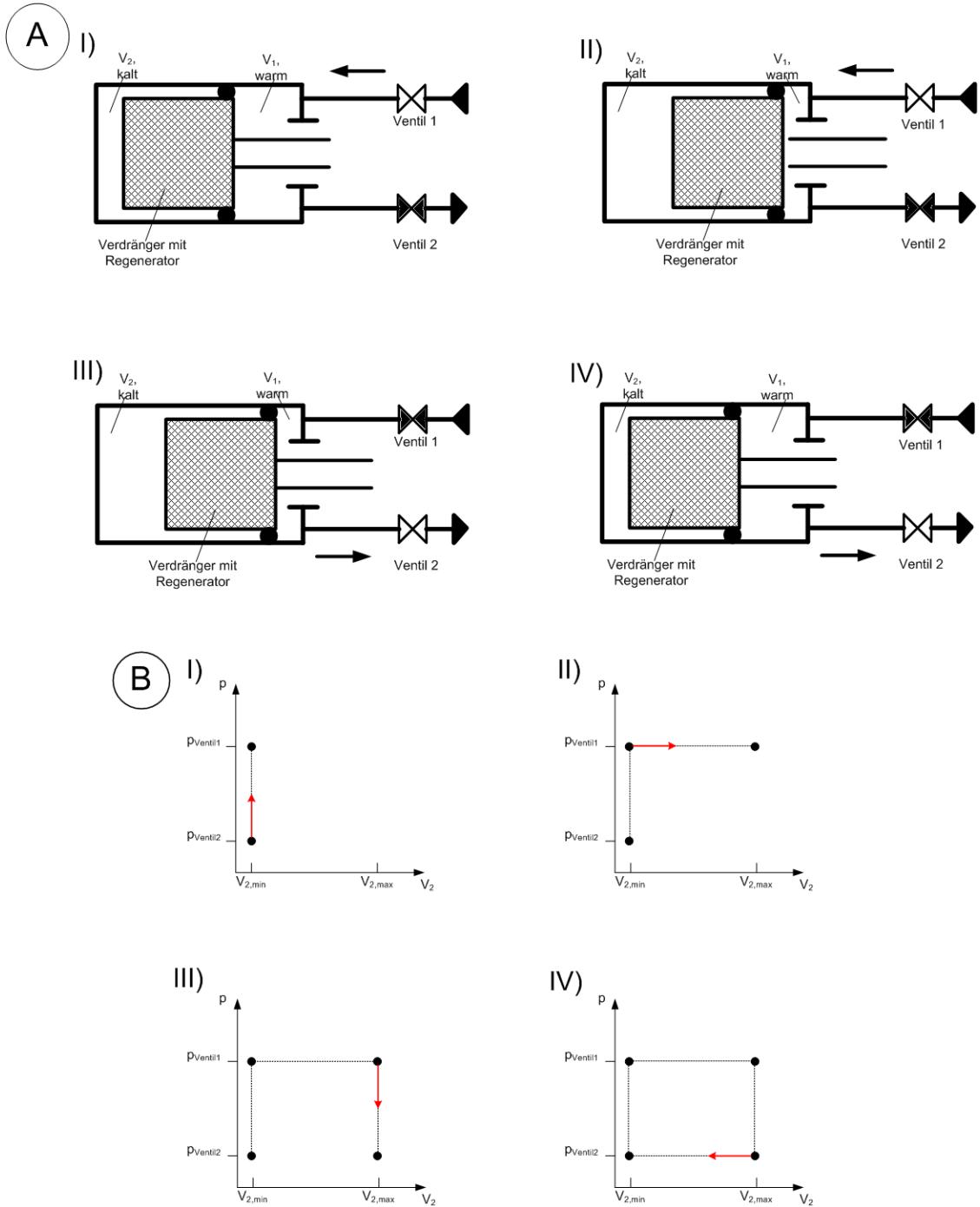
**Abbildung A.3:** Schematischer Aufbau und Wirkweise der Turbomolekularpumpe. Die Pumpstufe der Turbomolekularpumpe wird aus einem sich schnell drehenden Rotor und einem spiegelsymmetrisch angeordneten Stator gebildet. Durch die Bewegung der Rotoren bekommen die Gasteilchen einen Impuls in deren Bewegungsrichtung und können dadurch abgepumpt werden.

## Die Kryopumpe

Gase werden an gekühlten Flächen gebunden. Im Alltag begegnet man diesem Mechanismus zum Beispiel bei gekühlten Getränkeflaschen, an deren Außenseite sich kleine Wassertropfen bilden. Kryopumpen machen sich genau diesen Effekt zu Nutze. Sie arbeiten mit tiefgekühlten Flächen, an denen Gase entweder kondensieren oder an tiefgekühlten Adsorbaten durch Kryosorption<sup>3</sup> gebunden werden. Die Kryopumpen des MCT2 arbeiten bei einer Temperatur im Bereich von 15 K. Heute werden zumeist Refrigerator-Kryopumpen eingesetzt, deren Arbeitsweise dem eines Kühlschranks ähnelt [Umr97]. Dabei wird Helium als Kältemittel eingesetzt und in einem geschlossenen thermodynamischen Kreisprozess verdichtet und wieder entspannt, wobei eine Temperaturerniedrigung stattfindet. Der häufigste zu Grunde liegende Kreisprozess ist der Gifford-McMahon Prozess, dessen Vorteil in der räumlichen Trennung von Kompressoreinheit und der Einheit, in der die Gasentspannung stattfindet, liegt [Umr97]. Die Kälteerzeugung findet in einem sogenannten Kaltkopf statt. Dort werden durch einen Displacer (Verdrängerkolben) zwei voneinander getrennte Volumina erzeugt, von denen während des Betriebs eines warm und eines kalt ist. Der Displacer ist mit einem Regeneratormaterial gefüllt, durch dessen Bewegung das einströmende Heliumgas durch den Displacer gedrängt wird. Der Regenerator übernimmt die Funktion eines Wärmetauschers. Der gesamte Prozess der Kälteerzeugung nach dem Gifford-McMahon Prozess ist in Abbildung A.4 gezeigt. Die meisten Refrigerator-Kryopumpen arbeiten heute mit einem zweistufigen Kaltkopf. Dabei sind zwei Stufen hintereinander geschaltet, die das Helium schrittweise abkühlen. Beim MCT2 senkt zum Beispiel die erste Stufe des Kaltkopfes an der Quelle die Temperatur des Heliums auf etwa 80 K ab, die zweite danach auf 20 K. An der zweiten Stufe des Kaltkopfes können nun Kaltflächen angeschlossen werden, die dessen Temperatur annehmen und an denen sich das zu pumpende Gas anlagern kann.

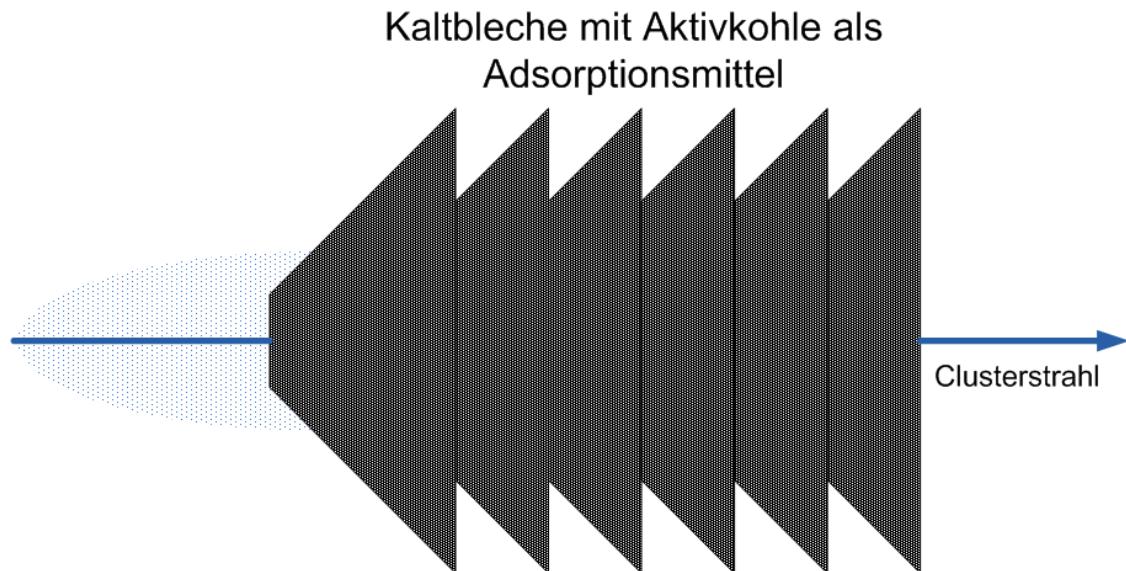
---

<sup>3</sup>Physikalisch, reversible Bindung von Gasmolekülen durch Van-der-Waals Kräfte an hinreichend kalten, artfremden Unterlagen [Umr97].



**Abbildung A.4:** Kälteerzeugung nach dem Gifford-McMahon Prozess. I) Gas mit Druck  $p_{\text{Ventil}1}$  strömt vom Kompressor durch Ventil 1 ein und gelangt in das Volumen  $V_1$  und durch den Regenerator in das Volumen  $V_2$ . Ventil 2 ist geschlossen. II) Ventil 1 bleibt offen. Der Verdränger bewegt sich nach rechts und schiebt das Gas durch den Regenerator aus  $V_1$  in  $V_2$ , wobei es sich am Regenerator abkühlt. III) Ventil 1 wird geschlossen und Ventil 2 geöffnet. Das Gas expandiert von  $p_{\text{Ventil}1}$  auf  $p_{\text{Ventil}2}$  und kühlt sich dabei ab. Der Umgebung wird dabei Wärme entzogen. IV) Ventil 2 bleibt offen und der Verdränger bewegt sich nach links. Das Gas strömt durch den Regenerator, kühlt weiter ab und gelangt durch Ventil 2 zurück in den Kompressor. Der Kreislauf ist beendet.

Für das Münsteraner Cluster-Jet Target wurden zylinderförmige Kaltbleche mit einer Öffnung entwickelt. Diese Kaltbleche sind aus Kupfer gefertigt und mit Aktivkohle besetzt, die als Adsorptionsmittel dient. Durch die Öffnung der Kaltbleche fliegt nun der Clusterstrahl; das ihn umgebende Restgas kann eingefangen werden. Eine schematische Zeichnung der Kaltbleche ist in Abbildung A.5 gezeigt.



**Abbildung A.5:** Kaltbleche der Kryopumpen des MCT2. Die aus Kupfer gefertigten Kaltbleche sind mit Aktivkohle als Adsorptionsmittel besetzt. Der Clusterstrahl fliegt durch eine Öffnung in den Kaltblechen, sodass sich das umgebende Restgas an den Kaltblechen absetzen kann.

Allgemein lässt sich Vakuum in verschiedene Druckbereiche von Grob- bis Ultrahochvakuum einteilen. In Tabelle A.1 sind die Vakuumdruckbereiche und die Einsatzgebiete der beim MCT2 verwendeten Vakuumpumpen angegeben.

Druckbereich	Druck/mbar	Vakuumpumpen
Großvakuum	$10^3 - 10^0$	Drehschieberpumpe, Rootspumpe
Feinvakuum	$10^0 - 10^{-3}$	Drehschlieberpumpe, Rootspumpe
Hochvakuum	$10^{-3} - 10^{-7}$	Turbomolekularpumpe, Kryopumpe
Ultrahochvakuum	$< 10^{-7}$	Turbomolekularpumpe, Kryopumpe

**Tabelle A.1:** Vakuumdruckbereiche und Einsatzgebiete der Vakuumpumpen.

## Literaturverzeichnis

- [A<sup>+</sup>08] AMSLER, C. .: *Physics Letters B*667,1. Particle Data Group, 2008.
- [BP08] B. POVH, K. RITH, C. SCHOLZ F. ZETSCH: *Teilchen und Kerne*. Springer, 8. Auflage , 2008.
- [Dem04] DEMTRÖDER, WOLFGANG: *Experimentalphysik 3*. Springer, 2004.
- [FAI05] FAIR: *Statusbericht*, 2005.
- [FAI06] FAIR: *Baseline Technical Report*, 2006.
- [Hin08] HINTERBERGER, FRANK: *Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik*. Springer, 2. Auflage , 2008.
- [Köh10] KÖHLER, E.: *Das Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2, ein Prototyp für das  $\bar{P}$ ANDA-Experiment, & die Analyse der Eigenschaften des Clusterstrahls*, 2010.
- [KTB05] K.-T. BRINKMANN, P. GIANOTTI, I. LEHMANN: *Exploring the Mysteries of Strong Interactions- The  $\bar{P}$ ANDA-Experiment*. Nuclear Phys. News, 2005.
- [Kuc04] KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik*. Fachbuchverlag Leipzig, 2004.
- [oC05] COLLABORATION  $\bar{P}$ ANDA: *Technical Progress Report*, 2005.

- [oC09] COLLABORATION  $\bar{P}$ ANDA: *Physics Peformance Report for:  $\bar{P}$ ANDA*, März 2009.
- [Ott07] OTTE, J.: *Messung der Clustergeschwindigkeit und der Teilchendichte am Münsteraner Cluster-Jet Target*, 2007.
- [pC09] COLLABORATION  $\bar{P}$ ANDA: *Technical Design Report for the  $\bar{P}$ ANDA Solenoid and Dipole Spectrometer Magnets*, Februar 2009.
- [Umr97] UMRATH, DR. WALTER: *Grundlagen der Vakuumtechnik*, 1997.
- [VAC] VACUUM, PFEIFFER: *Einführung in die Grob- und Feinvakuum-Erzeugung*.
- [WDP06] *Die neue Beschleunigeranlage von FAIR*. Welt der Physik, 2006.
- [Wut06] WUTZ, MAX: *Wutz Handbuch Vakuumtechnik*. Vieweg, 2006.

# **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich möchte mich herzlich bei Prof. Dr. A. Khoukaz für die freundliche Aufnahme in seine Arbeitsgruppe, die sehr interessante Aufgabenstellung und die aufmerksame Betreuung bedanken.

Ich danke Prof. Dr. J. Wessels für die Übernahme des Koreferats.

Als nächstes möchte ich mich bei ☺Esperanza Köhler☺ bedanken für die tolle Betreuung, die Hilfe bei allen Fragestellungen, der Unterstützung jeglicher Art und die Korrektur meiner Arbeit. Besonders bedanken möchte ich mich aber für die lustige Zeit im Labor.

Alexander Täschner möchte ich danken für die Hilfe bei Fragestellungen, Umbauarbeiten, Umprogrammierungen und sonstigen Hilfestellungen.

Für die freundliche Aufnahme und die tolle Atmosphäre innerhalb der Arbeitsgruppe möchte ich Florian Bergmann, Ingo Burmeister, Paul Goslawski, Esperanza Köhler, Malte Mielke, Andrea Nustede, Michael Papenbrock, Annika Passfeld, Tobias Rausmann, Alexander Täschner und Alexander Winnemöller danken.

Bedanken möchte ich mich auch besonders bei Kay. Ohne deine Unterstützung und Hilfe bei allem wäre ich nicht bis hierher gekommen.

Ich möchte mich aber vor allem bei meinen Eltern bedanken. Danke, dass ihr mich immer unterstützt und bei allen Unternehmungen hinter mir steht.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Alle Textstellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, wurden unter der Angabe der Quelle deutlich gekennzeichnet.

Münster, Juli 2010

.....  
(Ann-Katrin Hergemöller)