

Bachelorarbeit

*Inbetriebnahme und Test wesentlicher Produktions-,
Justage- und Detektionskomponenten des \bar{P} ANDA
Cluster-Jet Targets*

*Implementation and test of fundamental production,
adjustment, and detection components of the \bar{P} ANDA
cluster-jet target*

vorgelegt von

Alessandro Zannotti

im August 2012

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Das Beschleunigerzentrum FAIR und das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$-Experiment	5
2.1. Aufbau des FAIR Beschleunigerkomplexes	5
2.2. Forschungsschwerpunkte von $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$	8
2.3. Der $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor	9
2.4. Anforderungen an ein internes Target für $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$	10
3. Das Cluster-Jet Target	13
3.1. Der Aufbau des Cluster-Jet Targets	13
3.1.1. Die Clusterquelle	13
3.1.2. Die Streukammer	18
3.1.3. Der Auffänger	19
3.2. Das Vakuumsystem des Cluster-Jet Targets	21
4. Die Inbetriebnahme des Kaltkopfes der $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ Cluster-Jet Targetquelle	25
4.1. Der Kaltkopf 10MD und die Installation am Testpumpstand	25
4.1.1. Funktionsweise des Kaltkopfes 10MD	26
4.1.2. Der Testaufbau	30
4.2. Die Kühlleistung des Kaltkopfes	33
4.2.1. Die Kühlkurve	33
4.2.2. Bestimmung der Kühlleistung	34
4.3. Untersuchungen zur Stabilität der Temperatur	40
4.3.1. Einstellung einer konstanten Temperatur	40
4.3.2. Einfluss der Kaltkopfmotorgeschwindigkeit auf den Setpoint	42
4.3.3. Langzeitstabilität und der Einfluss des Setpoints	44
4.3.4. Oszillationen aufgrund der Kaltkopfmotorfrequenz	46
4.3.5. Verteilung der Temperaturmesswerte	47

4.4.	Einfluss des Displacerwechsels auf die Endtemperatur	48
4.4.1.	Erster Funktionstest	49
4.4.2.	Erste Ergebnisse der Kühlleistung	49
5.	Die Untersuchung des schrittmotorbetriebenen Justagesystems	51
5.1.	Der mechanische Aufbau des Justagesystems	51
5.2.	Die Elektronik und computergestützte Steuerung	55
5.3.	Räumliche Auflösung und Verfahrengenauigkeit des Kreuztisches	58
5.3.1.	Erste Abschätzung der räumlichen Auflösung	58
5.3.2.	Messung der Positionsgenauigkeit	59
5.3.3.	Messungen zur Positionsreproduzierbarkeit	63
5.4.	Die Drehbewegung des Targetstrahls	70
6.	Die MCP als Detektionskomponente des Clusterstrahls	73
6.1.	Funktionsweise und Aufbau des MCP-Detektors	73
6.1.1.	Funktionsprinzip und Herstellung von MCP-Detektoren	74
6.1.2.	Eigenschaften von MCP-Detektoren	75
6.1.3.	Der Aufbau und die Montage eines MCP-Detektors für das Cluster-Jet Target	79
6.2.	Darstellung des Clusterstrahls mittels des MCP-Detektors	82
6.2.1.	Erste Aufnahmen	82
6.2.2.	Intensitätsprofil des Clusterstrahls	85
6.2.3.	Justagekontrolle des Clusterstrahls über den MCP-Detektor	86
6.2.4.	Formbarkeit des Clusterstrahls	87
7.	Zusammenfassung und Ausblick	91
A.	Anhang	i
A.1.	Verkabelung des Kreuztisches	i
A.2.	Korrekturfunktion	ii

1. Einleitung

Auf der Suche nach den fundamentalen Bestandteilen der Materie wurden mit fortschreitender Forschungsgeschichte immer kleinere Substrukturen entdeckt. Nachdem die experimentellen Ergebnisse zunächst die Existenz der Elektronen, später auch die der Nukleonen, der Protonen und der Neutronen, verifizierten, motivierten vor allem die Entdeckung des Myons (1937) und des π -Mesons (1947) in der Höhenstrahlung dazu, Beschleuniger-Experimente durchzuführen, um mit immer höherer Energie neue Teilchen zu entdecken. Nach der Entwicklung erster Teilchenbeschleuniger um 1952 lieferte die systematische Suche mehr als 100 neue Teilchen [Dem09b]. Die rasante Entwicklung der experimentellen und theoretischen Erkenntnisse führte in den 1970er Jahren zur Bildung eines Modells der Grundbausteine der Materie und ihrer Wechselwirkung: dem Standardmodell der Elementarteilchen.

Es beschreibt die bisher bekannten Grundbausteine der Materie, die Elementarteilchen, und drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen durch eine relativistische Quantenfeldtheorie. Nach dem Standardmodell existieren zwölf verschiedene Materieteilchen, je sechs Quarks und sechs Leptonen, welche sich in drei Generationen gliedern lassen. Dazu gibt es jeweils das entsprechende Antiteilchen. Die uns umgebende Materie besteht ausschließlich aus Teilchen der ersten Generation. Die Wechselwirkungen werden durch zwölf Austauschteilchen vermittelt. Diese sind das Photon für die elektromagnetische, das W^{+-} , W^{-} und Z^0 -Boson für die schwache und acht Gluonen für die starke Wechselwirkung. Die Austauschteilchen koppeln an die entsprechenden Ladungen der Materieteilchen, demnach das Photon an die elektrische Ladung, die W - und Z -Bosonen an die schwache Ladung und die Gluonen an die Farbladung [Dem09b].

In dem Standardmodell nimmt das Higgs-Boson eine besondere Rolle ein. Die dem Standardmodell zu grunde liegende Eichtheorie erfordert masselose Austauschteilchen. Der 1964 von P. Higgs et al. vorgeschlagene Higgs-Mechanismus beschreibt, wie die masselosen W - und Z -Bosonen und die Materieteilchen durch Wechselwirkung mit einem das Universum durchziehenden Hintergrundfeld eine Masse erhalten. Das Higgs-Boson entspricht dabei einer Anregung des Hintergrundfeldes [Hig64b], [Hig64a]. Der experimentelle Nachweis wäre eine entscheidende Stütze für die Theorie des Standardmodells. Die im Juli 2012 dargestellten Ergebnisse der aktuellen Forschung beim LHC

(Large Hadron Collider) am europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf, weisen mit einer lokalen Signifikanz von 5σ auf den Fund eines neuen Teilchens mit einer Masse im Bereich von $125 - 126 \text{ GeV}/c^2$ hin, bei dem es sich um das Higgs-Boson handeln könnte [CER12].

Der sich stetig entwickelnde und wachsende Forschungsprozess ist also bei Weitem noch nicht abgeschlossen. Einen weiteren Forschungsschwerpunkt stellt aktuell die Untersuchung der starken Wechselwirkung dar. Ein Beschleunigerkomplex, das zukünftig in Darmstadt errichtete FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), eine Erweiterung des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung, soll tiefere Einblicke in die Struktur der Materie liefern. Hier wird es möglich sein, hochkomprimierte Materie zu erzeugen, um die Konditionen des frühen Universums oder in hochdichten Sternen zu simulieren. Des Weiteren können mit Beschleunigerstrahlen aus schweren Ionen wie Uran Prozesse untersucht werden, die eine Schlüsselrolle bei der Bildung der Elemente in Sternen einnehmen [FAI06].

Eines von vier Programmen des Beschleunigerkomplexes ist das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment. $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ steht dabei für AntiProton ANnihilation at DArmstadt. Die Annihilation von Antiprotonen an den Protonen eines internen Targets werden die Untersuchung der starken Wechselwirkung in einem bislang unerreichten Maß ermöglichen. Zu den geplanten Forschungsschwerpunkten des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiments zählen die Charmoniumspektroskopie (als Charmonium wird ein Teilchenverbund bezeichnet, bestehend aus einem Charm- und Anticharmquark), Erzeugung von Zuständen mit gluonischen Freiheitsgraden (z.B. Glueballs, Hybride), die Spektroskopie doppelter Hyperkerne sowie die Untersuchung von Charmzuständen in Kernen [PAN09]. Dazu werden Antiprotonen mit Strahlimpulsen von bis zu $15 \text{ GeV}/c$ an einem internen Target gestreut. Als erstes Target für das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment ist ein Cluster-Jet Target vorgesehen. Der Prototyp des Cluster-Jet Targets ist am Institut für Kernphysik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster konstruiert, aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen worden und wird im Folgenden ausführlich dargestellt. Parallel dazu erfolgt derzeit der Aufbau des endgültigen Cluster-Jet Targets für $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Untersuchung von drei zentralen Komponenten zur Produktion, Justage und Detektion des Clusterstrahls, die am $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ Cluster-Jet Target zukünftig eingesetzt werden. Zur Produktion hochdichter Clusterstrahlen strömt das Targetmaterial (vorgesehen sind zunächst Wasserstoff oder Deuterium) durch eine Düse. Der dortige Druck und die Temperatur haben einen großen Einfluss auf die Targetdichte am Wechselwirkungspunkt. Der vorgesehene Kaltkopf muss eine ausreichende Kühlleistung sowie Temperaturstabilität aufweisen. Die Inbetriebnahme und Untersuchung des Kaltkopfes als entscheidende Produktionskomponente ist ein wesentlicher Bestandteil dieser Bachelorarbeit.

Beim Durchströmen der Düse kondensiert nur ein kleiner Teil des Targetmaterials zu Clustern und wird anschließend durch eine Blende (dem Skimmer) vom Restgas separiert. Zur Justage des Clusterstrahls und der systematischen Extraktion der hochdichten Kernstrahlen wird ein neues, schrittmotorbetriebenes Justagesystem zum Einsatz kommen. Die dazugehörige Schrittmotorsteuerung wird im Rahmen dieser Arbeit erstmalig in Betrieb genommen und bezüglich ihrer Genauigkeit untersucht.

Ein MCP-Detektor (**M**icro**C**hannel **P**late) ermöglicht schließlich die Echtzeitdetektierung des Clusterstrahls. Das Targetmaterial wird dazu ionisiert, beschleunigt und trifft auf den Detektor. Die ausgelösten Signale werden verstärkt und auf einem Phosphorschirm abgebildet. Der MCP-Detektor dient somit als Visualisierungskomponente zur Justagekontrolle und ermöglicht die direkte Beobachtung des Clusterstrahls.

Während der Hauptteil dieser Bachelorarbeit sich ausführlich und detailliert mit dem Aufbau, Einsatz am Cluster-Jet Target und systematischen Untersuchungen der drei Komponenten befasst, wird zunächst das Beschleunigerzentrum FAIR, das \bar{P} ANDA-Experiment sowie das Cluster-Jet Target dargestellt.

2. Das Beschleunigerzentrum FAIR und das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment

Das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment ist eines der wesentlichen Experimente an dem neuen internationalen Forschungs- und Beschleunigerzentrum FAIR. FAIR steht für **F**acility for **A**ntiproton and **I**on **R**esearch und ist eine Erweiterung des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung. Bis 2016 sollen die ersten Teilmodule in Betrieb genommen werden [FAI09]. Für das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment wurde am Institut für Kernphysik an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster ein Prototyp des internen Cluster-Jet Targets in kompletter $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Geometrie konstruiert, aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen. Parallel dazu erfolgt außerdem der Aufbau des endgültigen $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ Cluster-Jet Targets.

Im Rahmen systematischer Untersuchungen am Prototypen und an zentralen Komponenten des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Targets ist diese Bachelorarbeit entstanden. Neben der Beschreibung der FAIR-Beschleunigeranlage und des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experimentes, werden in diesem Kapitel die Anforderungen an ein internes Target dargestellt.

2.1. Aufbau des FAIR Beschleunigerkomplexes

Das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung wurde 1969 in Darmstadt errichtet. Sein Schwerpunkt liegt in der Atom- und Kernphysik, der Plasmaphysik und Materialforschung. Die größten Erfolge verzeichnet die GSI in der Entdeckung sechs neuer chemischer Elemente sowie der Entwicklung eines Behandlungsverfahrens für Tumore mittels der Schwerionentherapie.

Ende 2007 wurde der Ausbau des Forschungszentrums zu einem internationalen Beschleunigerzentrum für die Forschung mit Ionen- und Antiprotonenstrahlen FAIR gestartet [FAI09].

Das Beschleunigerzentrum FAIR soll unter anderem neue Kenntnisse über die Struktur der Materie und die Evolution des Universums liefern und grundlegende Fragen über die Wechselwirkung zwischen den elementaren Bausteinen der Materie klären.

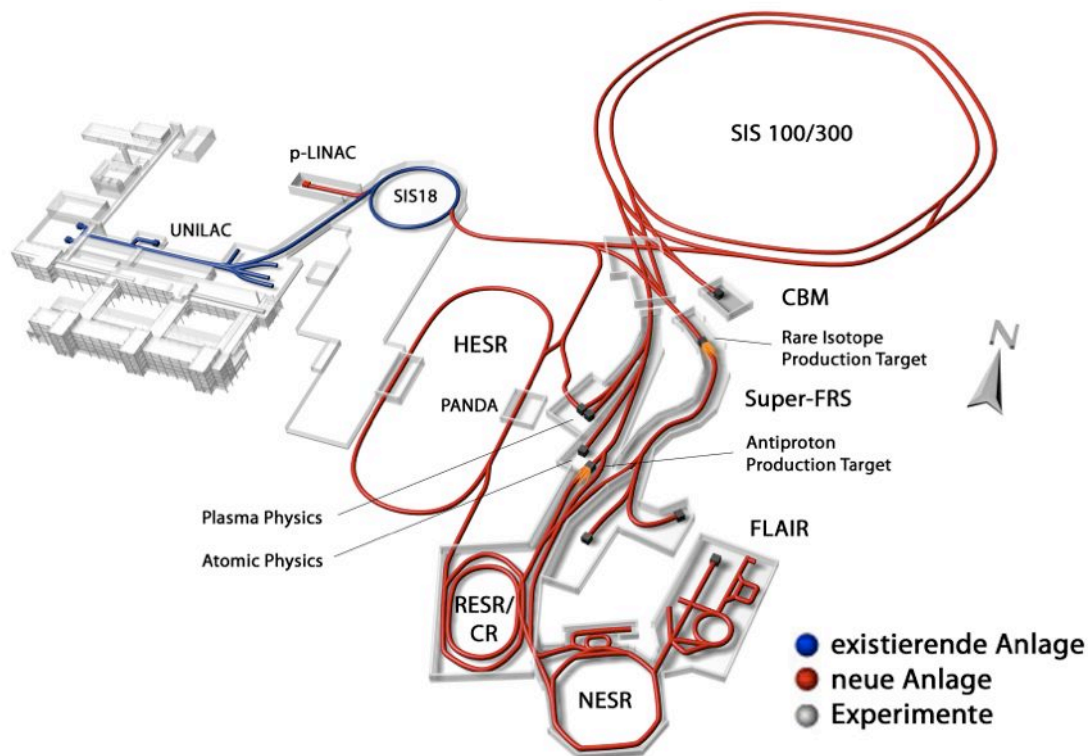


Abbildung 2.1.: Der Aufbau des FAIR (rot) als Erweiterung der bestehenden GSI (blau). Das \bar{P} ANDA-Experiment am HESR soll frühestens 2016 in Betrieb genommen werden, ebenso wie der Linearbeschleuniger p-LINAC, das Synchrotron SIS 100 und der Collector Ring CR [FAI09].

Das bestehende GSI Zentrum (blau) und die Bestandteile des geplanten Beschleunigerzentrums FAIR (rot) sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Ab 2016 wird die Inbetriebnahme des Protonen Linearbeschleunigers p-LINAC, Synchrotrons SIS 100, Collector Ring CR und High Energy Storage Ring HESR erfolgt sein [FAI09]. In weiterer Planung befinden sich das Synchrotron SIS 300, der Recycled Experimental Storage Ring RESR und der New Experimental Storage Ring NESR. Über das Synchrotron SIS 100 wird der Anschluss zum bestehenden GSI-Komplex geschaffen. Die GSI wird dabei um den Protonen Linearbeschleuniger p-LINAC erweitert, um Protonen vorbeschleunigt in den SIS 18 zu injizieren. Das Synchrotron SIS 100 dient als zentrale Beschleunigereinheit und wird von allen wissenschaftlichen Programmen am FAIR genutzt. Diese Programme lassen sich in vier Schwerpunkte aufteilen [FAI09]:

APPA: Atomic, Plasma Physics and Applications (u.a. FLAIR),
Atom- und Plasmaphysik sowie angewandte Wissenschaft in Biologie, Medizin und Materialphysik

- CBM:** Compressed **B**aryonic **M**atter,
Physik der Hadronen und Quarks in verdichteter Kernmaterie und Hyperkernmaterie
- NuSTAR:** **N**uclear **S**tructure, **A**strophysics and **R**eactions (u.a. Super-FRS),
Struktur der Kerne, nukleare Astrophysik und radioaktive Ionenstrahlen
- PANDA:** Anti**P**roton **A**nnihilation at **D**armstadt,
Struktur und Spektroskopie von Hadronen, Strange- und Charmphysik, Hyperkernphysik mit Antiprotonenstrahlen

Das PANDA-Experiment nutzt die zur Verfügung stehende Energie von Proton-Antiproton-Annihilationen, um vor allem neue Erkenntnisse über die starke Wechselwirkung zu gewinnen.

Zur Produktion von Antiprotonen werden in dem neuen Linearbeschleuniger p-LINAC Protonen auf 70 MeV beschleunigt und einige Umläufe im bestehenden Synchrotron SIS18 gespeichert. Ihre Energie erreicht 2 GeV bei einer Repetitionsrate von 5 Hz. Die Beschleunigung auf 29 GeV mit einer Rampenrate von 4 T/s erfolgt anschließend im Synchrotron SIS100. Bis zu 2×10^{13} Protonen, zu einem Strahl von weniger als 50 ns Länge komprimiert, werden auf ein Nickel-Target von 60 mm Länge gelenkt [PAN12a]. Mit einer Repetitionsrate von 10 s wird dieser Zyklus der Protonenbeschleunigung wiederholt [PAN12a].

Auf diese Weise werden rund 10^8 Antiprotonen erzeugt, magnetisch separiert und im Collector Ring (CR) vorgekühlt. Nach der Übergabe der Antiprotonen an den Speicherring RESR erreicht der Strahl durch stochastische Kühlmechanismen, entsprechend der Kühlgeschwindigkeit im CR, sehr hohe Intensitäten. Der Antiprotonenstrahl mit einem Impuls von 3,8 GeV/c wird anschließend in den Hochenergie Speicherring HESR (High Energy Storage Ring) gelenkt, an dem sich das PANDA-Experiment befindet [PAN12a].

Der HESR verfügt über zwei verschiedene Strahlkühlmechanismen, die Elektronenkühlung und die stochastische Kühlung, um die Impulsverschmierung des Strahls zu reduzieren. Er liefert Strahlpulse zwischen 1,5 GeV/c und 15 GeV/c [PAN12a]. Sowohl Protonen als auch Antiprotonen können im HESR beschleunigt werden. Für das PANDA-Experiment werden Antiprotonen genutzt, die an den Protonen eines internen Target gestreut werden. Dazu sind ein Cluster-Jet Target und ein Pellettarget vorgesehen. Diese Bachelorarbeit konzentriert sich lediglich auf das Cluster-Jet Target, das in Kapitel 3 im Detail beschrieben wird.

Die Antiprotonen annihilieren mit den Protonen des Targets und bieten mit der freiwerdenden Energie die Möglichkeit neue Teilchen zu erzeugen, die mit dem PANDA Detektor nachgewiesen werden können. Im Vergleich zur reinen Teilchenkollision hat diese Methode den Vorteil, dass neben der kinetischen Energie auch die Ruheenergie der Teilchen für die Gesamtenergie der entstehenden

Teilchen zur Verfügung steht. Ausschließlich die Ruheenergie die bei der Annihilation frei wird beträgt hierbei etwa 1,8 GeV.

2.2. Forschungsschwerpunkte von $\bar{\text{PANDA}}$

Eines der wichtigsten Ziele der aktuellen Forschung ist es, eingehendere Einblicke in die starke Wechselwirkung zu erlangen. Diese wirkt auf alle farbladungstragende Teilchen: die Quarks, farbneutrale Quarksysteme (Hadronen) und Gluonen. Quarks sind Fermionen mit Spin 1/2 und können die Farbladungen rot, grün und blau tragen. Als Confinement wird das Phänomen bezeichnet, dass Quarks nicht einzeln beobachtbar sind. Bei dem Versuch zwei Quarks zu separieren muss so viel Energie aufgebracht werden, dass ein neues Quark-Antiquark-Paar entsteht. Die masselosen Austauschteilchen der starken Wechselwirkung sind die Gluonen. Zur experimentellen Überprüfung der zu Grunde liegenden Theorie, der Quantenchromodynamik (QCD), befasst sich das $\bar{\text{PANDA}}$ -Experiment mit folgenden Schwerpunkten.

Die Charmonium Spektroskopie: Als Charmonium werden gebundene Zustände mit einem Charm- und Anticharmquark bezeichnet. Das Charmonium kann über e^+e^- -Kollisionen mit Schwerpunktsenergien von beispielsweise 3 – 4,5 GeV erzeugt werden [Dem09b].

$$e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow c\bar{c} \quad (2.1)$$

Die Charmoniumproduktion läuft dabei in erster Ordnung über die Erzeugung eines virtuellen Photons ab, so dass sie auf die Quantenzahl des Photons beschränkt ist. Beim $\bar{\text{PANDA}}$ -Experiment kann die Erzeugung sämtlicher Charmoniumzustände direkt aus der Reaktion [Bet09]

$$p\bar{p} \rightarrow c\bar{c} \rightarrow \text{Endzustand} \quad (2.2)$$

erfolgen. Durch die Charmoniumspektroskopie kann das effektive Wechselwirkungspotential und die Kopplungsstärke der starken Wechselwirkung untersucht werden. Dabei ermöglicht $\bar{\text{PANDA}}$ erstmalig eine präzise Studie der bereits entdeckten Zustände unterhalb der doppelten Masse der D-Mesonen sowie oberhalb dieser eine Überprüfung der theoretisch vorhergesagten Zustände.

Des Weiteren wird aktuell die Struktur der neu erzeugten Teilchenzustände X(3872), Y(4260), Z(4430) sowie weiterer kontrovers diskutiert. Mit der Erzeugung dieser Teilchenzustände bei $\bar{\text{PANDA}}$ könnten die Teilchenzustände grundlegend untersucht werden [PAN09].

Zustände mit gluonischen Freiheitsgraden: Die QCD erlaubt neben den Baryonen (qqq) und Mesonen ($q\bar{q}$) auch farbneutrale Zustände wie exotische Hadronen, Hybride und Glueballs. Exotische Hadronen zeichnen sich durch Quantenzahlen aus, die durch qqq - und $q\bar{q}$ -Zuständen nicht erreicht werden können. Unter Hybriden versteht man Quark-Antiquark-Paare mit einem weiteren angeregten Gluon, so dass ein zusätzlicher gluonischer Freiheitsgrad und eine höhere Masse vorhanden ist. Glueballs stellen farbneutrale Zustände aus Gluonen dar, die keine Quarks enthalten. Sie zerfallen nur über die starke Wechselwirkung. Da die $\bar{p}p$ -Annihilation ein gluonenreicher Prozess ist, bietet das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment eine hervorragende Möglichkeit für die Suche nach Zuständen mit gluonischen Freiheitsgraden.

Die Spektroskopie doppelter Hyperkerne: Als Hyperon wird ein Baryon mit mindestens einem Strange-Quark bezeichnet. Ersetzt ein Hyperon ein Nukleon, spricht man von einem Hyperkern. Bei dem $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment können doppelte Hyperkerne erzeugt werden, um die Nukleon-Hyperon- sowie Hyperon-Hyperon-Wechselwirkung genauer studieren zu können [PAN09].

Die Untersuchung von Charmzuständen in Kernen: Zwischen freien Hadronen und Hadronen in Kernverbänden existiert eine Massendifferenz. Bisher konnten nur Mesonen bestehend aus den drei leichtesten Quarks up, down und strange bezüglich der Massenverschiebung untersucht werden. $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ ermöglicht darüber hinaus die Untersuchung von Charm-Mesonen im Kernmedium. Vor allem von Zuständen oberhalb der Schwelle der doppelten D-Meson Masse werden große Massenverschiebungen erwartet.

Abbildung 2.2 gibt einen Überblick über die möglichen Teilchen die bei der Annihilation von Antiprotonen und Protonen erzeugt werden können. Frühere Experimente, wie beispielsweise LEAR (Low Energy Antiproton Ring) am CERN erreichten Schwerpunktsenergien von 2,55 GeV [FAI06]. Mit $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ können zukünftig Schwerpunktsenergien von über 5,5 GeV realisiert werden.

2.3. Der $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor

Die durch Annihilation entstehenden Teilchen werden mit dem in Abbildung 2.3 dargestellten Detektor nachgewiesen. Bei dem $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment handelt es sich um ein Fixed-Target-Experiment mit internem Target. Eine nahezu volle 4π -Akzeptanz ist gewährleistet, da ein internes Target im Abstand von 2,1 m zum Detektor installiert wird.

Wie in Abbildung 2.3 dargestellt ist, setzt sich der Detektor aus zwei Spektrometern zusammen,

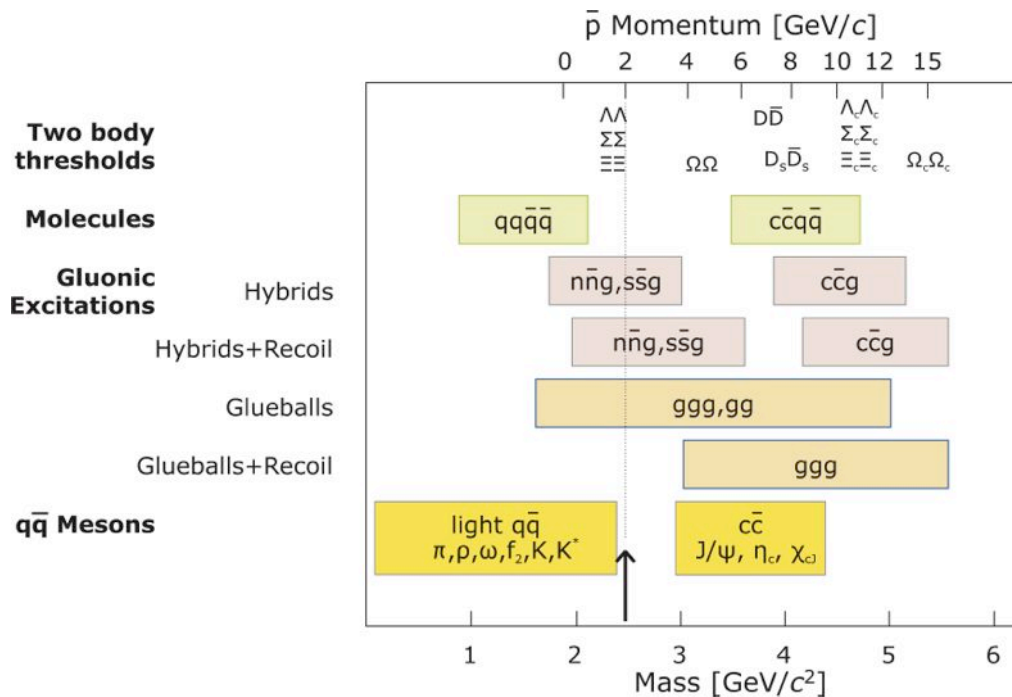


Abbildung 2.2.: Überblick über die erzeugbaren Teilchen durch die $\bar{p}p$ -Annihilation beim \bar{P} ANDA-Experiment. Auf der oberen Abszisse ist der Antiprotonenstrahlimpuls aufgetragen, die untere Abszisse zeigt die Masse der entstehenden Teilchen [PAN12a]. Der Pfeil markiert die maximale Schwerpunktsenergie an LEAR.

dem Targetspektrometer und dem Vorwärtsspektrometer. Während das Targetspektrometer den Interaktionspunkt von Antiprotonenstrahl und Target umgibt dient das Vorwärtsspektrometer der Detektion von Teilchen, die unter einem horizontalen Winkel von bis zu 5° und einem vertikalen Winkel von bis zu 10° vom Wechselwirkungspunkt aus emittiert werden. Die Detektoren in beiden Spektrometern sind in einem zwiebelartigen Schalensystem aufgebaut, um zu gewährleisten, dass möglichst alle entstehenden Teilchen bzw. ihre Zerfallsprodukte detektiert werden können und eine Vertexrekonstruktion möglich ist [PAN04], [PAN09].

2.4. Anforderungen an ein internes Target für \bar{P} ANDA

Am Wechselwirkungspunkt reagiert nur ein geringer Teil des Beschleunigerstrahls mit dem Target, so dass der restliche Teil beim nächsten Umlauf erneut zur Verfügung steht. Auf diese Weise können die Antiprotonen 10 – 30 Minuten im HESR gespeichert werden. Bei jedem Durchgang nimmt die Impulsverschmierung des Beschleunigerstrahls, abhängig von der Wahl der Targetdichte, durch die Wechselwirkung mit dem Target zu. Die Kühlmechanismen des HESR können dies kompensieren,

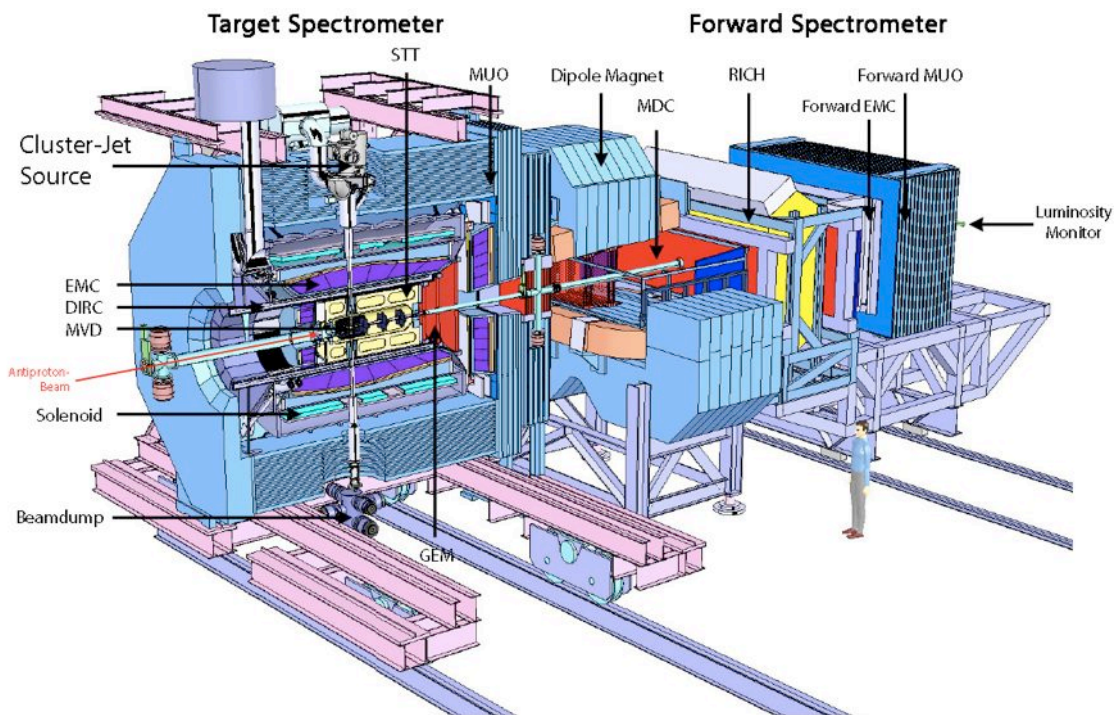


Abbildung 2.3.: Der \bar{P} ANDA-Detektor besteht aus zwei magnetischen Spektrometern.

Das Targetspektrometer (links) umgibt den Wechselwirkungspunkt schalenförmig: **MVD** (Micro-Vertex-Detector) zur Identifizierung von Nebenvertices und zur Rekonstruktion von Zerfällen extrem kurzlebiger Teilchen, **STT** (Straw Tube Tracker) zur Detektion geladener Partikel, **GEM** (Gas Electron Multiplier) als erstes Vorwärtsspektrometer zur Spurrekonstruktion von Teilchen, **EMC** (ElectroMagnetic Calorimeter) zur Detektion von Photonen aus Zerfällen neutraler Teilchen und Elektronen, **supraleitender Solenoid** der ein homogenes magnetisches Feld mit 2 T zur Separation geladener Teilchen erzeugt, **DIRC** (Detector for Internally Reflected Cherenkov Light) zur Identifikation geladener Teilchen, **MUO** (MUOn Detector) zur Myonenidentifikation.

Das Vorwärtsspektrometer (rechts) besteht aus folgenden Bestandteilen: **Dipole Magnet** mit einer magnetischen Steifigkeit von 2 Tm zur Separation geladener Teilchen, **MDC** (Mini-Drift Chamber) zur Spurrekonstruktion geladener Sekundärteilchen, **RICH** (Ring Imaging Cherenkov) zur Identifikation geladener Teilchen, **Forward EMC** zur Detektion von Photonen und Elektronen mit hoher Energieauflösung, **Forward MUO** zur Myonenidentifikation, **Luminosity Monitor** zur Bestimmung der integrierten Luminosität von Reaktionen im Wechselwirkungspunkt [PAN12b].

jedoch muss ein Kompromiss zwischen hoher Ereignisrate und niedriger Impulsverschmierung gewählt werden.

Der Zusammenhang zwischen der gewünschten Ereignisrate und der eingestellten Targetdichte wird durch die Luminosität \mathcal{L} beschrieben. Dabei ist die Luminosität definiert als Quotient aus Ereignisrate und Wirkungsquerschnitt, bei einer Detektoreffizienz von $\epsilon = 1$. Für das PANDA-Experiment wurde die maximale Luminosität zu $\mathcal{L} = 2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ berechnet, so dass sich für das Target eine maximale Flächendichte von mehr als $4 \times 10^{15} \text{ Atome/cm}^2$ ergibt [PAN04].

Die Targetquelle wird sich in einem Abstand von etwa 2,1 m zum Wechselwirkungspunkt befinden. Die Herausforderungen an der Konstruktion eines internen Cluster-Jet Targets bestehen demnach nicht nur in der Erzeugung extrem hoher Flächendichten, sondern auch darin, diese in der benötigten Entfernung $r \approx 2,1 \text{ m}$ zu realisieren, wobei die Flächendichte mit $1/r^2$ abfällt [TKOK11]. Des Weiteren muss die räumliche Ausdehnung des Targets am Wechselwirkungspunkt klein gehalten werden. Dies ist zum einen zur präzisen Vertexrekonstruktion unumgänglich, zum anderen werden Untergrundreaktionen mit dem Beschleunigerstrahl minimiert. Die Clusterstrahlgröße wird durch den sogenannten Kollimator definiert. Die bisher höchsten Dichten wurden mit einem Kollimator mit rundem Querschnitt und einem Strahldurchmesser von etwa 10 mm am Wechselwirkungspunkt realisiert. Aktuelle Untersuchungen im Rahmen der Masterarbeit von A.-K. Hergemöller sollen den Strahl auf eine Größe von ($< 2 \times 10$) mm reduzieren. Der Einfluss auf die Targetdichte steht bei diesen Untersuchungen im Fokus [Her12].

Je nach den Anforderungen des Experiments ist eine variable Dichte notwendig. Durch Veränderung von Temperatur bzw. Druck an der Lavaldüse kann dies bei der Clusterproduktion realisiert werden. Zudem muss die Targetdichte zeitlich konstant sein, um eine gleich bleibende Luminosität zu gewährleisten. Bei einem Targetdurchmesser von etwa 10 mm sind bisher Dichten von mehr als $2 \times 10^{15} \text{ Atomen/cm}^2$ erreicht worden, die keinerlei zeitliche Strukturen aufwiesen [Köh10].

Um auszuschließen, dass Fremdatome im Targetmaterial zu vermehrten Untergrundreaktionen führen, weist das Targetmaterial eine sehr hohe Reinheit auf (Reinheit 9.0 bei Wasserstoff).

Das Cluster-Jet Target erfüllt nahezu alle Anforderungen und wird als erstes Target am PANDA-Experiment eingesetzt.

3. Das Cluster-Jet Target

Am Institut für Kernphysik der Westfälischen-Wilhelms Universität Münster wurde im Jahr 2008 der Prototyp des Cluster-Jet Targets für das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen. Durch kontinuierliche Untersuchungen und Verbesserungen konnte in den letzten Jahren die Flächendichte des Targets in 2,1 m Entfernung von der Clusterquelle auf mehr als 2×10^{15} Atome/cm² gesteigert werden. Aktuell wird der Einsatz schlitzförmiger Kollimatoren zur Minimierung der Targetstrahlausdehnung und zur Verminderung des Untergrundes untersucht [Her12].

In diesem Kapitel wird der Aufbau des bestehenden Cluster-Jet Targets dargestellt. Dabei wird neben den einzelnen Komponenten das Vakuumsystem näher beschrieben.

3.1. Der Aufbau des Cluster-Jet Targets

Die drei wichtigsten Bestandteile des Cluster-Jet Targets stellen die Clusterquelle, die Streukammer und der Auffänger dar. Abbildung 3.1 zeigt die Querschnittzeichnung des Prototypaufbaus: Die Clusterquelle wird derzeit von zwei Pumpständen mit einem nominellen Gesamtsaugvermögen von 5050 m³/h (für Luft) flankiert. In 2,1 m Entfernung befindet sich entsprechend der vorgesehenen Geometrie bei $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ die Streukammer. Diese entspricht dem zukünftigen Wechselwirkungspunkt zwischen Antiprotonenstrahl und Target. Am Ende des Aufbaus treffen die Cluster auf einen Auffänger mit differentiellm Pumpsystem. Ein Reflektieren der Cluster und eine damit einhergehende Vergrößerung des Untergrundes wird dadurch vermindert. Die Clusterquelle wurde von H.-W. Ortjohann und A. Täschner konstruiert und der Auffänger des Targets stammt von dem bereits abgeschlossenen Experiment COSY-11.

3.1.1. Die Clusterquelle

Der Clusterproduktionsprozess spielt sich in der Clusterquelle ab, die somit das entscheidende Bauteil des Targets darstellt. Sie ist in drei Kammern unterteilt: Stützvakuums-, Skimmer- und Kollimator-kammer.

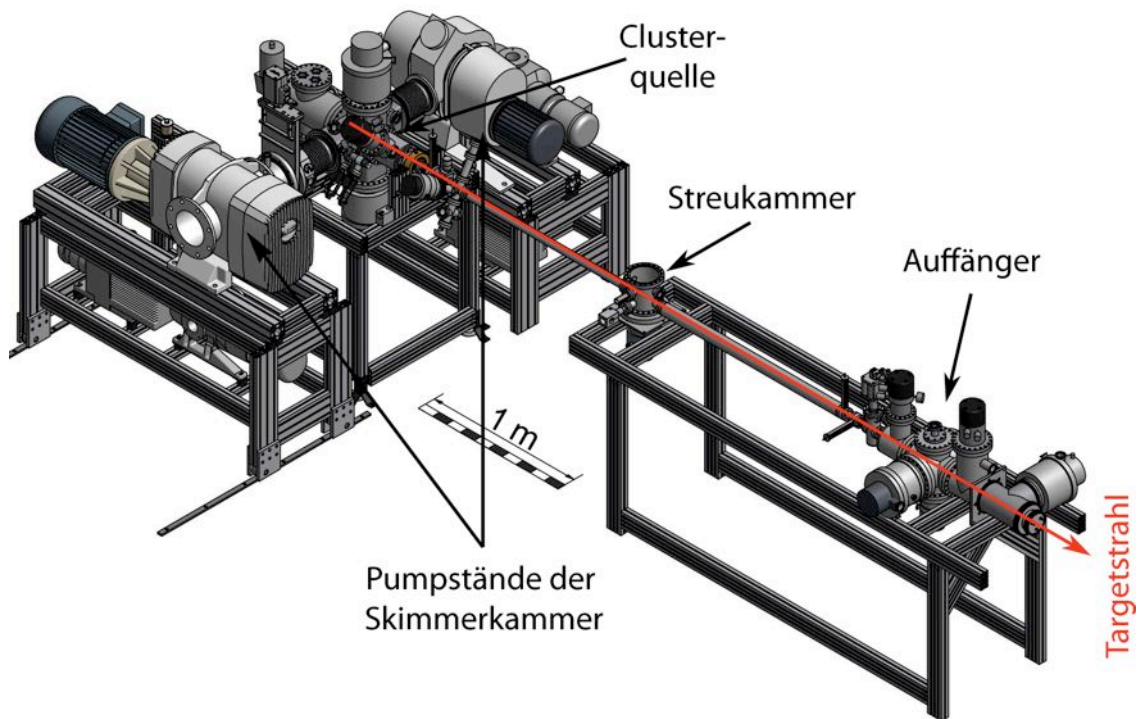


Abbildung 3.1.: Der elementare Aufbau des Cluster-Jet Target Prototypen: In der Clusterquelle werden hochdichte Clusterstrahlen erzeugt. Die Streukammer in 2,1 m Entfernung zur Quelle entspricht dem zukünftigen Wechselwirkungspunkt zwischen Beschleunigerstrahl und Clusterstrahl. Im Anschluss an die Streukammer befindet sich ein Auffänger mit differentiellm Pumpsystem in dem die Cluster aufbrechen und abgepumpt werden.

Wasserstoffgas der Reinheit 5.0 (99,9990%) wird von einem Wasserstoffreiniger mittels einer Palladiummembran der Firma Johnson Matthey gereinigt und gelangt mit einer Reinheit von 9.0 (99,99999990%) in das Gassystem des Cluster-Jet Targets. Ein Zufrieren der für die Clusterproduktion notwendigen Lavaldüse wird somit vermieden. Damit nach dem Durchströmen der engsten Stelle der Lavaldüse mit einem Durchmesser von $28\ \mu\text{m}$ die hoch dichten Kernstrahlen entstehen können, muss das Wasserstoffgas von einem Kaltkopf auf eine Betriebstemperatur im Bereich von 22 K abgekühlt werden [PAN12a]. Zu diesem Zweck wird der zweistufige Kaltkopf 10MD mit einem Kompressor der Firma Leybold eingesetzt. Die genaue Kenntnis der Eigenschaften des Kaltkopfes, insbesondere seiner Kühlkurven, Kälteleistungen sowie zeitlichen Stabilität sind von besonderer Wichtigkeit. Aus diesem Grund ist ein wesentlicher Aspekt dieser Bachelorarbeit die Untersuchung des zukünftigen Kaltkopfes für das PANDA-Experiment (siehe Kapitel 4).

Der Kaltkopf Coolpower 10MD der Firma Leybold besteht aus einer warmen und einer kalten

3.1 Der Aufbau des Cluster-Jet Targets

Stufe, die Kälteleistungen von 110 W bei 80 K bzw. 18 W bei 20 K liefern. Die tiefsten erreichbaren Temperaturen betragen laut Herstellerangaben 28 K bzw. 8 K [Ley05]. Durch den Kompressor wird dem Kaltkopf über einen geschlossenen Heliumkreislauf Wärme entzogen. Die Kaltkopfmotorgeschwindigkeit ist hierbei in einem Bereich zwischen 20 und 160 Umdrehungen pro Minute einstellbar. Durch Gasleitungen aus Kupfer wird das Wasserstoffgas mehrfach zunächst um die warme und anschließend um die kalte Stufe geführt. Damit ein möglichst effizienter Wärmeaustausch im Bereich der zwei Stufen erfolgen kann, werden hier Kupferrohrleitungen eingesetzt. Die Zufuhr zum Kaltkopf sowie die Verbindung der warmen und kalten Stufe stellen Edelstahlleitungen dar, deren Wärmeleitfähigkeit kleiner als die von Kupfer ist [Kuc94]. Ein Querschnitt der Clusterquelle, des darin enthaltenen Kaltkopfes und der Anschluss an die Skimmer- und Kollimator-kammer ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

Auf der kalten Stufe befindet sich ein Kupferblock mit Düsenverlängerung, auf der die Lavaldüse mittels einer Indiumdichtung montiert werden kann. Zur Temperaturerfassung und -regulierung sind ebenfalls eine Temperaturdiode und eine Heizpatrone (max. 50 W) in den Block eingelassen,

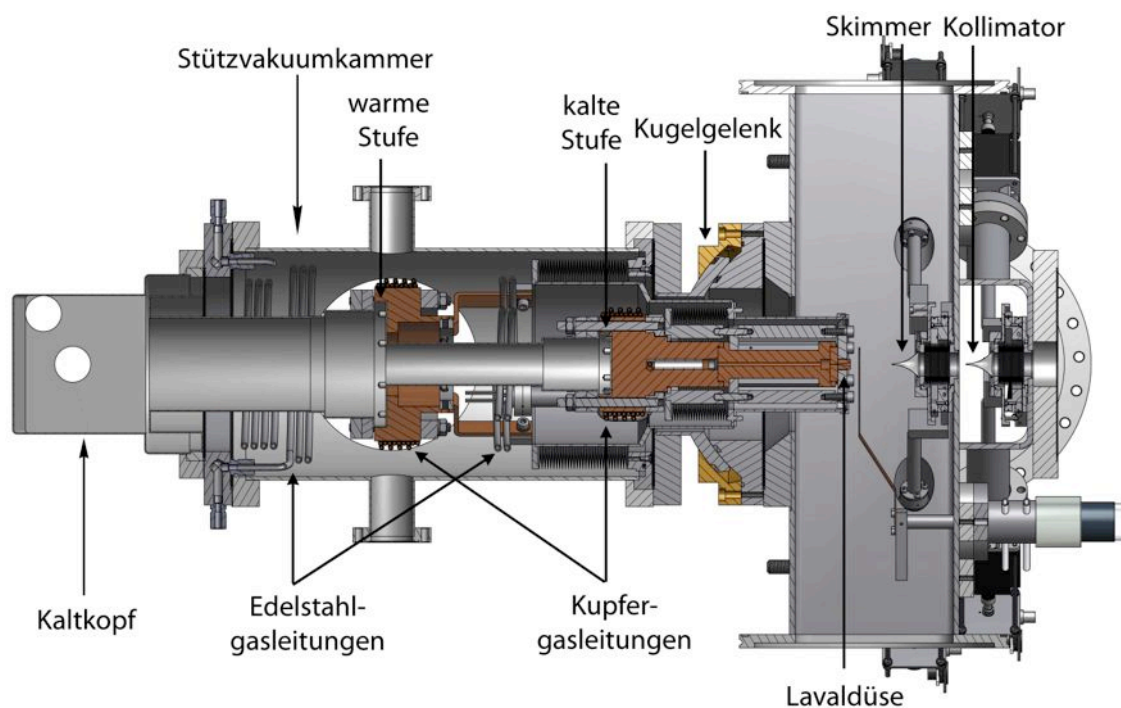


Abbildung 3.2.: Die Querschnittszeichnung der Clusterquelle zeigt die Stützvakuunkammer, in der sich der Kaltkopf befindet. Das Wasserstoffgas umströmt die warme und kalte Stufe durch Kupferrohrleitungen. Hinter der Lavaldüse bilden sich Cluster, die durch den Skimmer vom Restgas getrennt werden. Der Kollimator definiert die Form und Größe des Clusterstrahls.

deren Auslese und Steuerung durch einen externen Temperaturregler (Modell 331) der Firma Lakeshore übernommen wird. Für die Clusterproduktion wird somit die Temperatur des Kaltkopfes konstant gehalten. Zur Erfassung des statischen Drucks an der Düse wird ein Kapazitätsvakuummeter (Baratron) eingesetzt. Um den Wärmeaustausch nach außen so gering wie möglich zu halten, befindet sich der Kaltkopf in der evakuierten Stützvakuummkammer.

Die Lavaldüse kann in zwei Bereiche aufgeteilt werden: dem kürzeren, konvergenten Teil und dem längeren, divergenten (siehe Abb. 3.3). An der engsten Stelle besitzt die Lavaldüse einen Durchmesser von $28\ \mu\text{m}$. Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt in dem konvergenten Abschnitt bis zur engsten Stelle immer weiter zu, während Druck und Temperatur sinken. Der divergente Teil ist in Hinblick auf Länge und Öffnungswinkel so konzipiert worden, dass Reibungsverluste minimiert werden und die Strömung erhalten bleibt. Da ein Einlassdruck von $\geq 7\ \text{bar}$ und ein Auslassdruck von maximal $1 \times 10^{-1}\ \text{mbar}$ vorliegen, erreicht das Wasserstoffgas an der engsten Stelle Schallgeschwindigkeit und wird beim Durchströmen des divergenten Teils weiter beschleunigt [Dem09a].

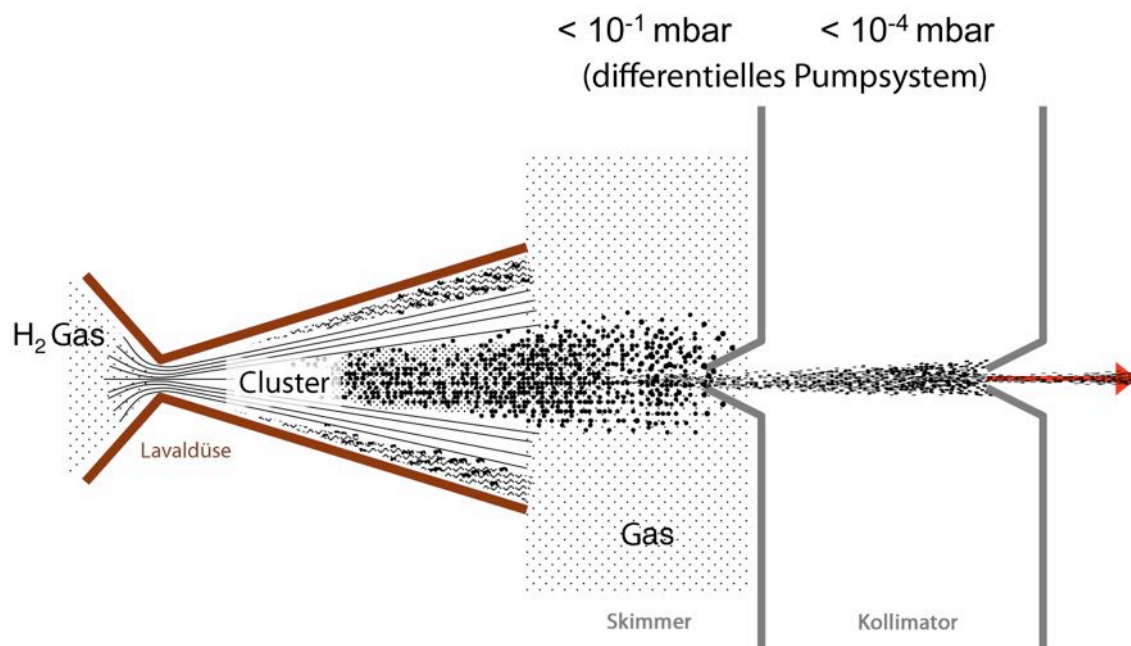


Abbildung 3.3.: Schematische Darstellung des klassischen Clusterproduktionsprozesses. Wasserstoffgas bildet nach Passieren der engsten Stelle der Lavaldüse Cluster, welche mittels des Skimmers vom Restgas separiert werden. Die weitere Extraktion, Formgebung und Definition der Strahlgröße am Wechselwirkungspunkt wird vom Kollimator übernommen.

Kurz hinter der engsten Stelle findet die Clusterbildung statt: Aufgrund des Effektes der adiabatischen Expansion besitzen die Wasserstoffmoleküle nahezu die gleiche Geschwindigkeitsverteilung und somit sehr niedrige Relativgeschwindigkeiten. Zwei Moleküle können unter Abführung der Energie an einen dritten Stoßpartner miteinander wechselwirken und einen Kondensationskeim bilden. Die Bindung erfolgt mittels der Van-der-Waals-Kraft. Weitere Moleküle können sich anlagern und größere Cluster aus einigen hundert bis hin zu 10^6 Teilchen erzeugen [Dem09a].

Da nur ein kleiner Teil des Wasserstoffgases zu Clustern kondensiert, wird durch den Skimmer der Clusterstrahl vom Restgas separiert. Das hohe Saugvermögen der Pumpstände an der Skimmerkammer ermöglicht diesen Vorgang. Die anschließende Formgebung und Definition der Strahlgröße am Wechselwirkungspunkt des Clusterstrahls geschieht durch den Kollimator. Der klassische Clusterproduktionsprozess ist in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt.

Die Stützvakuunkammer ist aktuell über ein bewegliches Kugelgelenk mit der Skimmerkammer verbunden. Da der Clusterstrahl hinter der Lavaldüse im Betrieb mit flüssigem H_2 hochdichte Kernstrahlen aufweist, besteht durch Verkippen der Stützvakuunkammer zur Skimmerkammer die Möglichkeit, diese Strahlen mit dem Skimmer zu extrahieren [Köh12]. Um sehr hohe Flächendichten in der Streukammer zu realisieren, ist diese Einstellung unumgänglich. Der derzeitige Prototyp zur Einstellung eines Winkelversatzes wird zukünftig bei dem finalen Cluster-Jet Target für \bar{P} ANDA durch ein schrittmotorbetriebenes Justagesystem übernommen, dessen Ansteuerung über einen Computer möglich ist. Der Aufbau und die Funktionsweise, die Inbetriebnahme des Justagesystems sowie erste Tests wurden im Rahmen dieser Bachelorarbeit durchgeführt und werden in Kapitel 5 im Detail beschrieben.

Bei dem Skimmer handelt es sich um eine aus Nickel bestehende Blende mit konkaver Mantelfläche, hergestellt von der Firma Beam Dynamics Inc. Er besitzt eine Wandstärke von $10\ \mu\text{m}$ und hat an der schmalsten Öffnung einen Durchmesser von $0,5\ \text{mm}$.

Nachdem der Clusterstrahl den Skimmer passiert hat, wird er durch den Kollimator definiert (Form und Größe) und das verbliebene Restgas in der Kollimator-kammer abgepumpt. Mit einem Kollimator des Durchmessers $0,7\ \text{mm}$ wurden aktuell mehr als 2×10^{15} Atome/ cm^2 in der Streukammer erreicht. Derzeit werden im Rahmen der Masterarbeit von A.-K. Hergemöller Kollimatoren mit schlitzförmiger Öffnung eingesetzt, um den Untergrund bei gleich bleibendem Überlappbereich mit dem Beschleunigerstrahl zu reduzieren [Her12].

Da Skimmer und Kollimator auf Kreuztischen montiert sind und sie durch Schrittmotoren in einer Ebene senkrecht zum Clusterstrahl ($\pm 2\ \text{mm}$) verfahren werden können, kann das Eindringen des Clusterstrahls in die Streukammer optimiert werden.

3.1.2. Die Streukammer

Die Streukammer stellt den zukünftigen Wechselwirkungspunkt zwischen Beschleuniger- und Targetstrahl beim \bar{P} ANDA-Experiment dar. Entsprechend der \bar{P} ANDA-Geometrie befindet sich auch bei dem Prototyp die Streukammer in 2,1 m Entfernung zur Lavaldüse. Gewonnene Erkenntnisse können so direkt für das \bar{P} ANDA-Experiment verwendet werden. Um die Position, Ausdehnung und Dichte des Clusterstrahls in der Streukammer zu vermessen, wurde das in Abbildung 3.4 dargestellte Monitorsystem entwickelt.

Dabei wird die Kammer mit 1 mm breiten Stäben horizontal und vertikal abgefahren. Die auf die Stäbe treffenden Cluster brechen auf, was einen Druckanstieg in der Streukammer zur Folge hat. Wird der Druck in Abhängigkeit von der Stabposition gemessen, ergibt sich ein Profil, aus dem die Breite und Position des Clusterstrahls direkt bestimmt werden kann. Abbildung 3.5 zeigt ein typisches Profil, entstanden bei Verwendung eines runden Kollimators. Eine optimale Justage des Clusterstrahls bis zum Auftreffen auf den Auffänger ist durch die Positionsbestimmung möglich. Neben bekannter Geschwindigkeit der Cluster [Täs12], [Köh10] und dem Saugvermögen in der

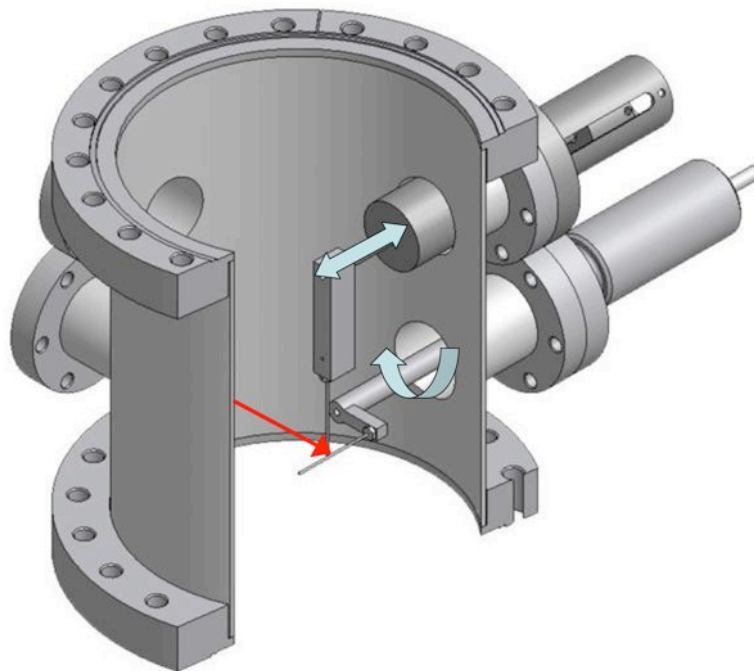


Abbildung 3.4.: Die Streukammer stellt den Wechselwirkungspunkt zwischen Beschleuniger- und Clusterstrahl dar. Die Ausbreitungsrichtung des Clusterstrahls ist mit einem roten Pfeil gekennzeichnet. Über Schrittmotoren kann das Monitorsystem gesteuert werden.

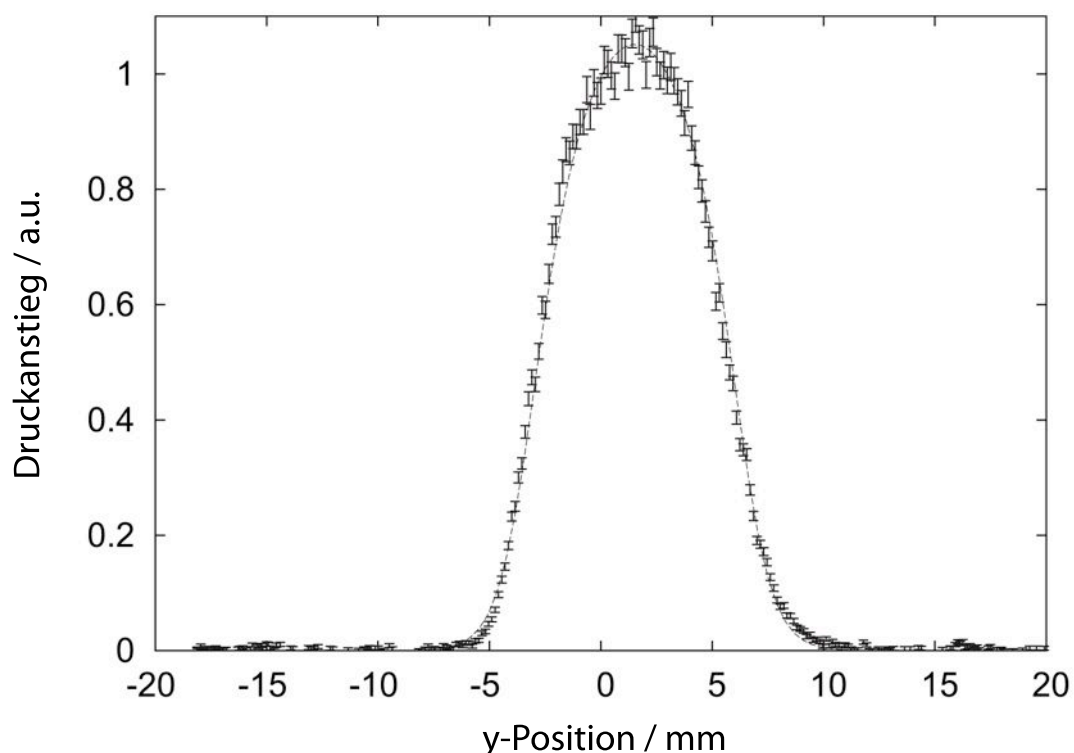


Abbildung 3.5.: Typisches Druckprofil bei Verwendung eines runden Kollimtors. Bewegen sich die Stäbe des Monitorsystems durch die Streukammer bzw. durch den Clusterstrahl, brechen die auftreffenden Cluster auf und der Druck in der Streukammer steigt an.

Kammer kann aus dem Druckanstieg bzw. der Höhe eines aufgenommenen Profils die Dichte des Clusterstrahls berechnet werden [TKOK11].

3.1.3. Der Auffänger

Durch den Einsatz eines Auffängers mit differentiellem Pumpsystem werden die Cluster nach Durchlaufen der Streukammer aufgebrochen und abgesaugt. Dadurch wird der Untergrund in der Streukammer minimiert, so dass am späteren Experiment weniger Untergrundreaktionen erwartet werden. Für den derzeitigen Prototypen wird der Auffänger des bereits abgeschlossenen Experiments COSY-11 eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein differentielles Pumpsystem bestehend aus vier Stufen, dessen Aufbau in Abbildung 3.6 gezeigt wird. Eine Kryopumpe bildet jeweils die erste und dritte Stufe des Auffängers. Sie sind in Münster speziell für den Einsatz an Cluster-Jet Targets gebaut worden und weisen in ihrem Inneren Kaltbleche mit einer Öffnung auf, die der Clusterstrahl passieren kann [DGH⁺97]. An die mit Aktivkohle besetzten Kaltbleche kann Restgas kondensieren und während des Clusterbetriebs mit höchsten Dichten Drücke im Bereich von

10^{-5} mbar ermöglichen. Die zweite und vierte Stufe bilden insgesamt drei Turbomolekularpumpen. Der frontale Abschluss des Auffängers kann durch eine weitere Turbomolekularpumpe erfolgen, um direkte Rückreflektionen der Cluster zu vermeiden. Zur Visualisierung des Clusterstrahls und als wichtige Justagekontrolle für den zukünftigen Einsatz bei PANDA kann ebenfalls ein MCP-Detektor (microchannel plate-Detektor) angebracht werden. Die Inbetriebnahme eines MCP-Detektors am derzeitigen Prototypen des Cluster-Jet Targets und die damit ermöglichte Visualisierung des Clusterstrahls ist wesentlicher Bestandteil dieser Bachelorarbeit und wird in Kapitel 6 näher beschrieben.

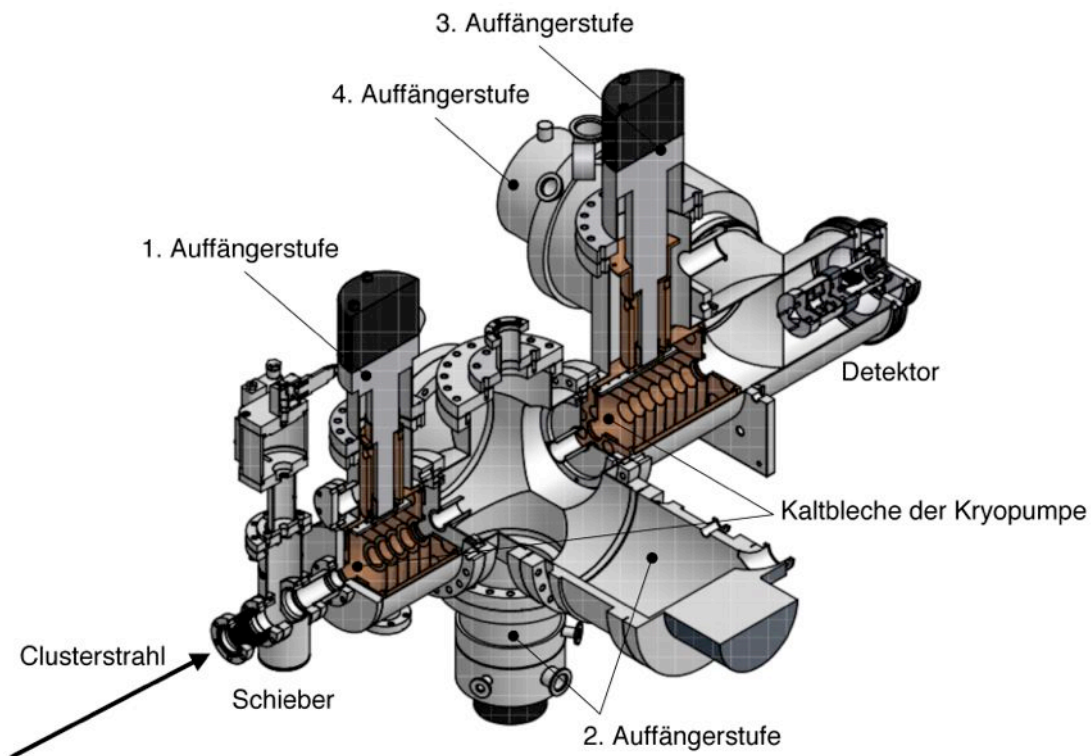


Abbildung 3.6.: Ein differentielles Pumpsystem bildet den Auffänger des Cluster-Jet Targets. Der eingezeichnete Pfeil deutet die Richtung des Clusterstrahls an. Die erste und dritte Stufe des vierstufigen Systems bilden zwei Kryopumpen. Insgesamt drei Turbomolekularpumpen werden als zweite und vierte Stufe eingesetzt. Als Abschluss des Auffängers kann wahlweise eine Turbomolekularpumpe oder ein Detektor (z.B. microchannel plate) eingesetzt werden.

3.2. Das Vakuumsystem des Cluster-Jet Targets

An dem Cluster-Jet Target werden verschiedene Vakuumpumpen eingesetzt, darunter Roots-, Turbomolekular- und Kryopumpen. Drehschieberpumpen werden als Vorpumpen eingesetzt und erzeugen das für die Benutzung der Roots- und Turbomolekularpumpen notwendige Vorvakuum. Abbildung 3.7 zeigt das derzeitige verwendete Vakuumsystem und die Gaszufuhr. Tabelle 3.1 gibt in Zusammenhang mit Abbildung 3.7 eine Übersicht der nominellen Saugleistung der verwendeten Pumpen. Parallel wird zur Zeit der neue Pumpstand für die PANDA-Clusterquelle aufgebaut. Im Gegensatz zum Pumpsystem des Prototypen wird lediglich ein einzelner Pumpstand eingesetzt mit einem nominellen Saugvermögen von $9800 \text{ m}^3/\text{h}$, der die ATEX-Bestimmungen¹ erfüllt.

Die Clusterquelle wird über ein differentielles Pumpsystem evakuiert. Die Skimmerkammer bildet die erste Stufe des Systems. Das dortige Vakuum wird symmetrisch von zwei Pumpständen geschaffen. Als Pumpen werden zunächst je eine Drehschieberpumpe (VP_1 und VP_2) eingesetzt. Jeweils zwei darauf folgende Rootspumpen (RP_1 , RP_2 , RP_3 und RP_4) ermöglichen nominelle Saugvermögen von 2000 bzw. $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ für Luft, für Wasserstoff entsprechend minimal geringere. Da während des Targetbetriebs bei höchsten Dichten der Gasfluss durch die Lavaldüse etwa 80 mbar l/s beträgt, liegen in der Skimmerkammer Drücke im Bereich von 10^{-1} mbar vor. Der Einsatz von Turbomolekularpumpen an der Skimmerkammer ist aufgrund des dortigen Druckbereichs nicht empfehlenswert. Die verwendeten Rootspumpen weisen für den vorhandenen Druckbereich ein ausreichend hohes Saugvermögen auf.

Das Vakuumsystem der Kollimatorkammer als zweite Stufe besteht aus zwei symmetrisch angeordneten Turbomolekularpumpen (TP_2 und TP_3) mit nominellen Saugvermögen von jeweils 2200 l/s (für Luft). Der Einsatz der Turbomolekularpumpen ist hier geeignet, da aufgrund des Skimmers das Restgas in der Skimmerkammer verblieben und abgepumpt worden ist und deshalb die Gaslast in der Kollimatorkammer deutlich geringer ist. Das Pumpsystem der Skimmerkammer dient dabei als Vorvakuumssystem.

Gleiches gilt für die Stützvakuunkammer mit enthaltenem Kaltkopf. Da keine Gaslast in der Stützvakuunkammer vorhanden ist, genügt der Einsatz einer Turbomolekularpumpe (TP_1) mit einem nominellen Saugvermögen von 360 l/s (für Luft). Bei hohen Clusterdichten liegen in der Kollimator- und Stützvakuunkammer Drücke im Bereich von 10^{-4} mbar und 10^{-5} mbar vor.

Die dritte Stufe des Pumpsystems der Clusterquelle bildet die Kryokammer. Durch den Einsatz einer Kryopumpe (KP_1) kondensiert vorwiegend Wasserstoffgas an den mit Aktivkohle besetzten

¹ATmosphère EXplosible: Richtlinien auf dem Gebiet des Explosionsschutzes.

Kaltblechen, so dass bei höchsten Dichten Drücke im Bereich von 10^{-5} mbar erreicht werden.

Die Streukammer wird derzeit von einer Turbomolekularpumpe (TP₅) mit einem nominellen Saugvermögen von 3601/s (für Luft) evakuiert. Vorgepumpt wird die Kammer durch eine Drehschieberpumpe (VP₄). Die Streukammer stellt den zukünftigen Wechselwirkungspunkt von Clusterstrahl und Beschleunigerstrahl dar. Da bei dem $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment aufgrund der Geometrie des Aufbaus und des umhüllenden Detektors nicht die Möglichkeit besteht das Pumpsystem zu installieren, muss der Gasfluss in die Streukammer vermindert werden und ein ausreichendes Saugvermögen am Auffänger gewährleistet sein.

Dazu wurde eine Zwischenstufe mit einer Turbomolekularpumpe (TP₄) installiert mit einem nominellen Saugvermögen von 1501/s (für Luft). Eine Drehschieberpumpe (VP₃) erzeugt das notwendige Vorvakuum.

Ein weiteres differentielles Pumpsystem bildet den Auffänger, um mögliche Reflexionen von Clustern zu unterdrücken. Die vier Stufen bestehen aus drei Turbomolekularpumpen (TP₆, TP₇ und TP₈) und zwei Kryopumpen (KP₂ und KP₃). Die Turbomolekularpumpen besitzen ein nominelles Saugvermögen von 360 bis 10001/s (für Luft). Als Vorpumpe dient auch hier eine Drehschieberpumpe (VP₅). Bei hohen Clusterdichten liegen an den ersten beiden Stufen Drücke im Bereich von 10^{-6} mbar und an den letzten beiden im Bereich von 10^{-5} mbar an.

An die letzte Stufe des Auffängers kann wahlweise eine weitere Turbomolekularpumpe oder wie im Rahmen dieser Bachelorarbeit ein MCP-Detektor installiert werden.

	Vorpumpe	Rootspumpe	Turbomolekularpumpe	Kryopumpe
n	VP _n [$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$]	RP _n [$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$]	TP _n [$\frac{1}{\text{s}}$]	KP _n [$\frac{1}{\text{s}}$]
1	175	505	360	22000
2	65	2050	2200	22000
3	25	600	2200	39000
4	25	3000	150	-
5	200	-	360	-
6	-	-	1000	-
7	-	-	360	-
8	-	-	1000	-

Tabelle 3.1.: Nominelles Saugvermögen der verschiedenen Pumpen des Cluster-Jet Target Prototypen für Luft. Die Pumpen sind über den Zählindex n durchnummeriert und können über Abbildung 3.7 zugeordnet werden [DGH⁺97].

3.2 Das Vakuumsystem des Cluster-Jet Targets

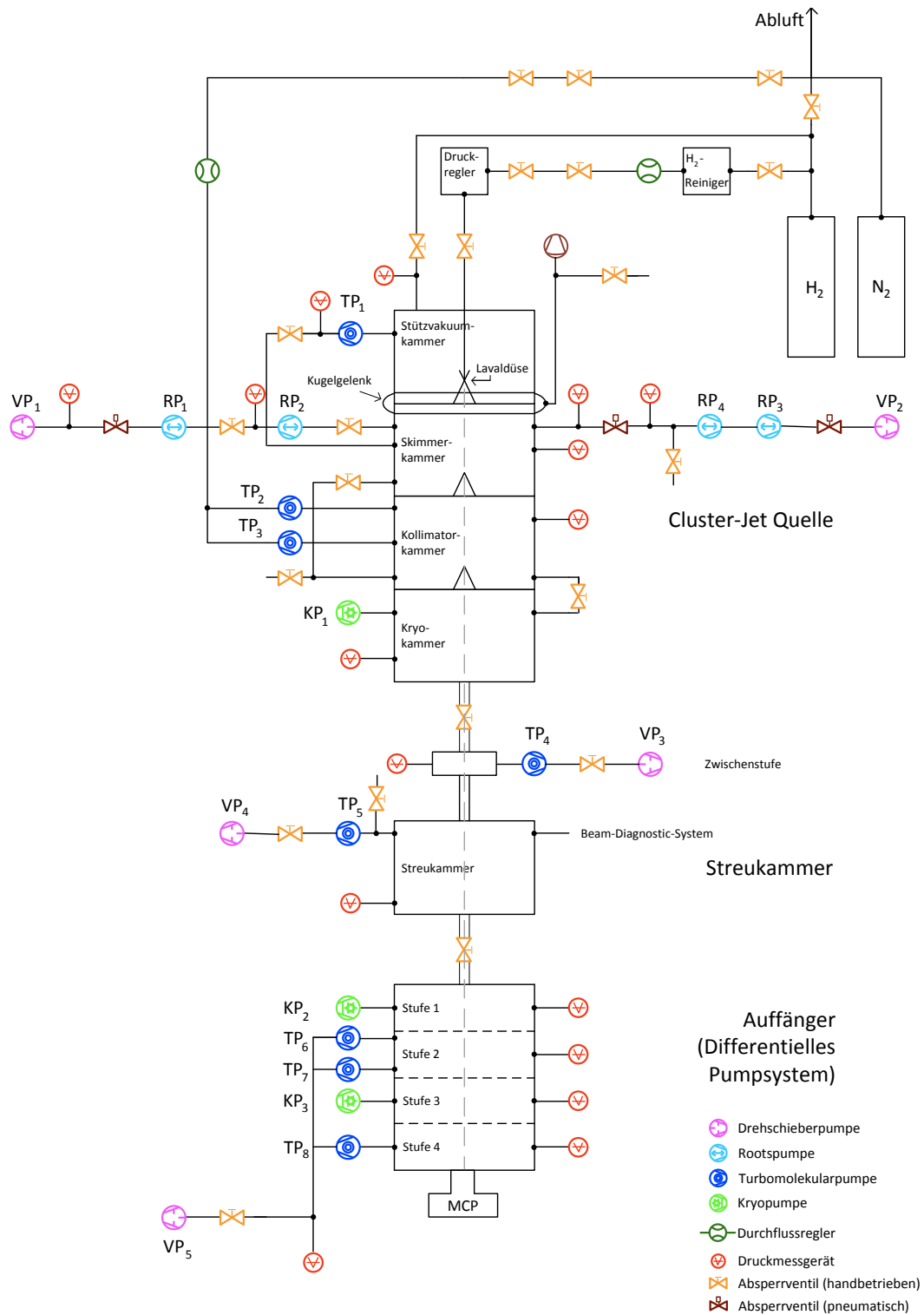


Abbildung 3.7.: Vakuumsystem des Cluster-Jet Target Prototypen. Bei der Clusterquelle und dem Auffänger werden differentielle Pumpsysteme verwendet. Die Streukammer stellt den zukünftigen Wechselwirkungspunkt zwischen Clusterstrahl und Beschleunigerstrahl dar.

Abbildung 3.7 zeigt neben dem Vakuumsystem des Cluster-Jet Targets auch das Gasleitungssystem. Wasserstoffgas strömt durch einen Reiniger und wird durch einen Kaltkopf gekühlt anschließend durch die Lavalldüse geleitet, um Cluster zu erzeugen. Die Inbetriebnahme und systematische Untersuchung des Kaltkopfes für das finale Cluster-Jet Target ist ein erster wesentlicher Bestandteil dieser Bachelorarbeit und wird im nachfolgenden Kapitel näher dargelegt.

Wird das Cluster-Jet Target ausgeschaltet, werden alle Kammern mit Stickstoff belüftet. Ein Kugelgelenk zwischen der Stützvakuum- und Skimmerkammer ermöglicht die Extraktion der hochdichten Kernstrahlen. Für \bar{P} ANDA wird ein neues schrittmotorbetriebenes Justagesystem zum Einsatz kommen, das in dieser Arbeit ebenfalls getestet und systematisch untersucht wurde (siehe Kapitel 5). Hinter dem Auffänger befindet sich aktuell ein MCP-Detektor. Seine Funktion als wichtige Justagekontrolle und als Visualisierungselement bildet den dritten Schwerpunkt dieser Arbeit und wird in Kapitel 6 näher erläutert.

4. Die Inbetriebnahme des Kaltkopfes der $\overline{\text{PANDA}}$ Cluster-Jet Targetquelle

Für den Betrieb mit maximaler Luminosität am $\overline{\text{PANDA}}$ -Experiment ist es wesentlich ein internes Target zu konstruieren, welches Flächendichten im Bereich von 10^{15} Atome/cm² in einem Abstand von 2,1 m zur Quelle zur Verfügung stellt.

Zur Erzeugung von Clusterstrahlen durchströmt hochreines Wasserstoffgas Kupferrohrleitungen entlang des Kaltkopfes, kühlt auf eine Temperatur im Bereich von $\leq 20\text{ K} - 50\text{ K}$ ab und passiert die Lavaldüse in der flüssigen Phase bei Drücken im Bereich von 17 bar.

Untersuchungen an den Münsteraner Cluster-Jet Targets MCT1 [Rau04], [Ott07], [Gen08] und MCT2 [Köh10] haben gezeigt, dass die Erzeugung hoch dichter Clusterstrahlen insbesondere von dem an der Lavaldüse anliegenden Druck und der dortigen Temperatur abhängt. Kleine Temperaturänderungen ($\leq 1\text{ K}$) können einen merklichen Effekt auf die Dichte ausüben. Somit ist eine Stabilität der Temperatur bzw. Dichte entscheidend für den Einsatz am $\overline{\text{PANDA}}$ -Experiment, um Luminositätsschwankungen bei der Datenaufnahme zu vermeiden. Aus diesem Grund befasst sich ein Schwerpunkt dieser Arbeit mit der Inbetriebnahme des Kaltkopfes für das zukünftige $\overline{\text{PANDA}}$ -Experiment. Neben dem in Kapitel 3 bereits beschriebenen Cluster-Jet Target Prototypen wird aktuell parallel die finale Cluster-Jet Targetquelle mit neuem Pumpstand aufgebaut. Im Vordergrund der anschließenden Untersuchungen werden die erreichbare Kühlleistung an der kalten Stufe sowie die zeitliche Stabilität bezüglich einer fest eingestellten Temperatur stehen.

4.1. Der Kaltkopf 10MD und die Installation am Testpumpstand

Bevor die Durchführung und die Ergebnisse der Untersuchungen des Kaltkopfes erläutert und diskutiert werden, wird im Folgenden zunächst ein Überblick über die Arbeitsweise und die verwendeten Komponenten des Kaltkopfes gegeben, um im Anschluss die Installation im verwendeten Testpumpstand zu erläutern.

4.1.1. Funktionsweise des Kaltkopfes 10MD

Bei dem zukünftigen Cluster-Jet Target für das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment wird zur Kühlung des Targetmaterials (aktuell Wasserstoff) der zweistufige Kaltkopf Coolpower 10MD der Firma Leybold eingesetzt. Die zugehörige Kompressoreinheit bildet der Coolpak 6000. Über einen abgeschlossenen Heliumkreislauf entzieht der an den Kühlwasserkreislauf angeschlossene Kompressor dem Kaltkopf Wärme. Der Kaltkopf 10MD zeichnet sich vor allem durch hohe Kühlleistungen aus: die warme Stufe liefert bei 80 K ca. 110 W, die kalte Stufe bei 20 K ca. 18 W. Die tiefsten erreichbaren Temperaturen liegen laut dem Hersteller bei weniger als 28 K bei der warmen und weniger als 8 K bei der kalten Stufe [UO07]. Über Hochdruckleitungen sind Kompressor und Kaltkopf miteinander verbunden. Der Heliumdruck beträgt im ausgeschalteten Zustand 15 bar. An dem Kompressor lassen sich Kaltkopfmotorgeschwindigkeiten von 20 rpm – 160 rpm in 10 rpm-Schritten einstellen.

Der Kaltkopf arbeitet mit Helium als Kältemittel, wobei der Gifford-McMahon Prozess als thermodynamischer Kreisprozess benutzt wird. Dieser Kreisprozess bietet unter anderem den Vorteil, dass der Kaltkopf von der Kompressoreinheit räumlich getrennt werden kann. Die Verbindung beider Komponenten entsteht durch flexible Druckleitungen. Die Kältequelle kann somit kompakt und vibrationsarm eingesetzt werden.

Im Inneren eines einstufigen Kaltkopfes befindet sich ein Verdrängerkolben (Displacer) und ein Regenerator. Der Verdrängerkolben teilt das zylinderförmige Volumen in zwei Arbeitsbereiche der Volumina V_1 und V_2 auf (siehe Abbildung 4.1). Über einen internen Motor wird der Verdränger pneumatisch gesteuert und der thermodynamische Kreisprozess durchlaufen. Im Betrieb sei V_2 der kalte Bereich direkt an der Innenwand, so dass V_1 die Wärme abtransportiert. Wird der Verdränger bewegt und damit V_2 verkleinert, strömt Helium durch den im Verdränger befindlichen Regenerator. Bei dem Regenerator handelt es sich um einen Wärmespeicher mit großer Austauschfläche und Kapazität. Über ihn wird der Wärmeaustausch im Kreislauf realisiert. Der Durchlauf des Gifford-McMahon Prozesses ist in Abbildung 4.1 schematisch und als pV-Diagramm dargestellt. Die einzelnen Arbeitsschritte werden kurz erörtert.

Schritt 1 Das Volumen V_2 ist minimal und der Verdränger befindet sich am linken Totpunkt. Während das Ventil N der Niederdruckheliumleitung geschlossen bleibt, wird das Hochdruckventil H geöffnet, so dass Helium durch den Regenerator in das Volumen V_2 einströmt. Der Druck in V_2 erhöht sich isochor von p_N zu p_H .

- Schritt 2** Die Ventile bleiben unverändert. Aufgrund der Druckänderung in V_2 verschiebt sich der Verdränger. Helium strömt von V_1 zu V_2 und wird dabei vom Regenerator abgekühlt. V_2 expandiert isobar und wird maximal.
- Schritt 3** Das Hochdruckventil H wird geschlossen und das Niederdruckventil N geöffnet. Der Druck in V_2 sinkt isochor von p_H zu p_N , was eine Abkühlung des Heliums in V_2 zur Folge hat. Das expandierende Gas transportiert die Umgebungswärme zum Kompressor.
- Schritt 4** Der Verdränger komprimiert das Volumen V_2 . Helium aus V_2 strömt durch den Regenerator nach V_1 und kühlt diesen ab. Mit einer im Vergleich zu Schritt 1 geringfügig höheren Temperatur gelangt das Helium aus V_1 in das Niederdruckreservoir.

Auf diese Weise kann dem Volumen V_2 stetig Wärme entzogen werden [U007].

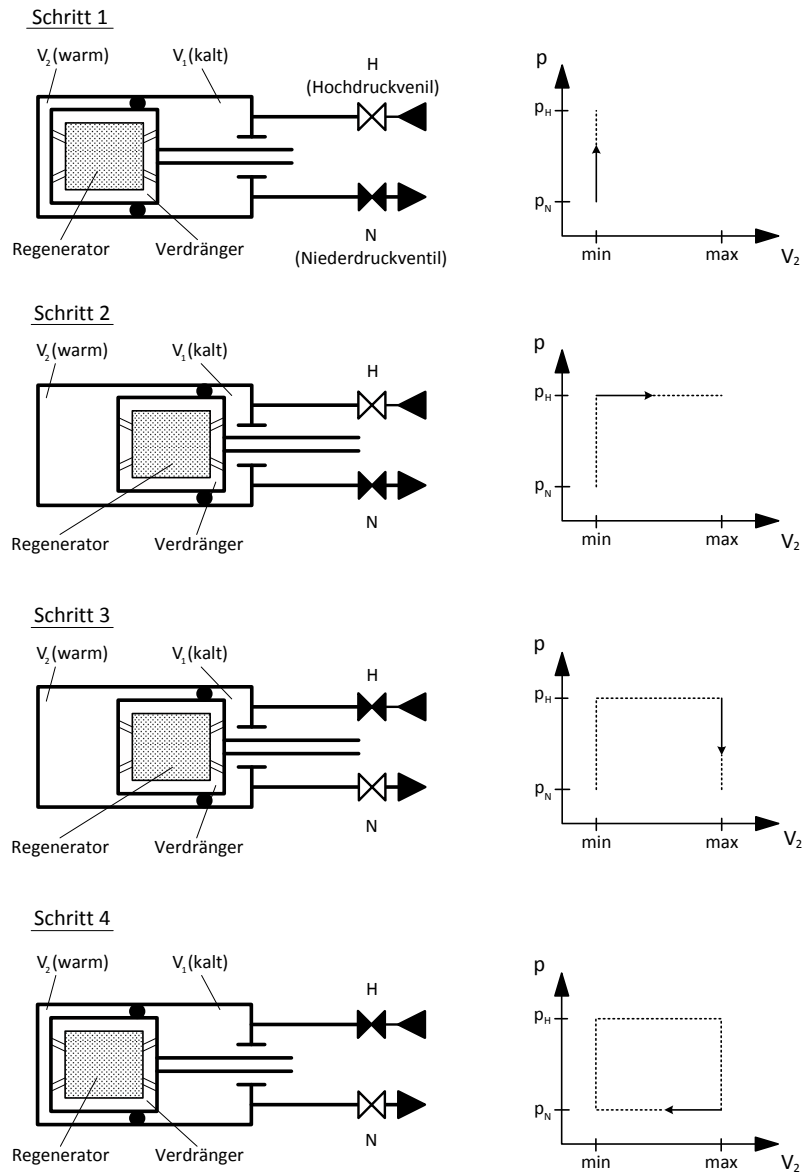


Abbildung 4.1.: Darstellung des Gifford-McMahon Prozesses für einen einstufigen Kaltkopf sowohl schematisch als auch im pV_2 -Diagramm. Mit V_1 und V_2 sind die beiden Volumina gekennzeichnet. H und N stehen für das Hoch- und Niederdruckventil. Dabei steht ein geschwärztes Ventil für geschlossen, ein geöffnertes ist dementsprechend weiß.

4.1 Der Kaltkopf 10MD und die Installation am Testpumpstand

Bei dem Kaltkopf 10MD werden zwei Stufen hintereinander geschaltet. Die Temperatur des Heliums in der warmen Stufe erreicht etwa 28 K, die in der kalten Stufe etwa 8 K [Ley05]. Die tatsächlich erreichbaren Temperaturen hängen von vielen weiteren Faktoren ab. In Abbildung 4.2 ist schematisch der Aufbau eines zweistufigen Kaltkopfes dargestellt. In den Zylindern der kalten und warmen Stufe befindet sich jeweils ein Verdrängerkolben und ein Regenerator. Über Steuerkolben synchronisiert ein Motor die Arbeitsschritte der Verdrängerkolben mit den Ventilen der Hoch- und Niederdruckleitungen.

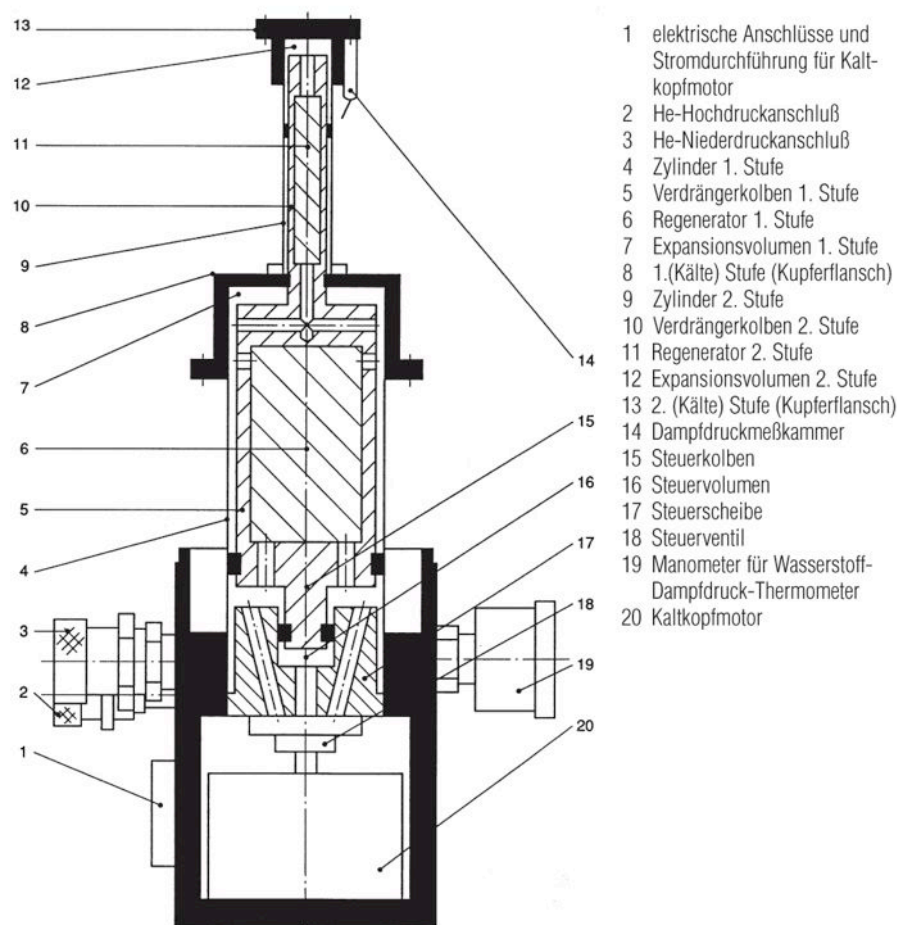


Abbildung 4.2.: Schematischer Aufbau eines zweistufigen Kaltkopfes [UO07]. In den Zylindern der warmen und kalten Stufe befinden sich jeweils ein Verdrängerkolben und der Regenerator. Über einen Motor erfolgt der Antrieb der Kolben und die Steuerung der Heliumdruckleitungen.

4.1.2. Der Testaufbau

Der Kaltkopf befindet sich zur Durchführung der Messungen in einer Vakuummkammer. Der allgemeine Aufbau, insbesondere der des Vakuumsystems ist in Abbildung 4.3 schematisch dargestellt. Eine Drehschieberpumpe erzeugt das notwendige Vorvakuum. Die Turbomolekularpumpe weist ein nominelles Saugvermögen von 145 l/s (für Luft) auf und kann Drücke in der Vakuummkammer im Bereich von 10^{-6} mbar erzeugen. Der Druck in der Kammer kann weiter auf 10^{-8} mbar verbessert werden, indem Drehschieber- und Turbomolekularpumpe nach Erreichen des tiefsten Druckes und herunter gekühltem Kaltkopf von der Vakuummkammer getrennt werden. In diesem Fall agiert der Kaltkopf selbst als Kryopumpe mit großem Saugvermögen.

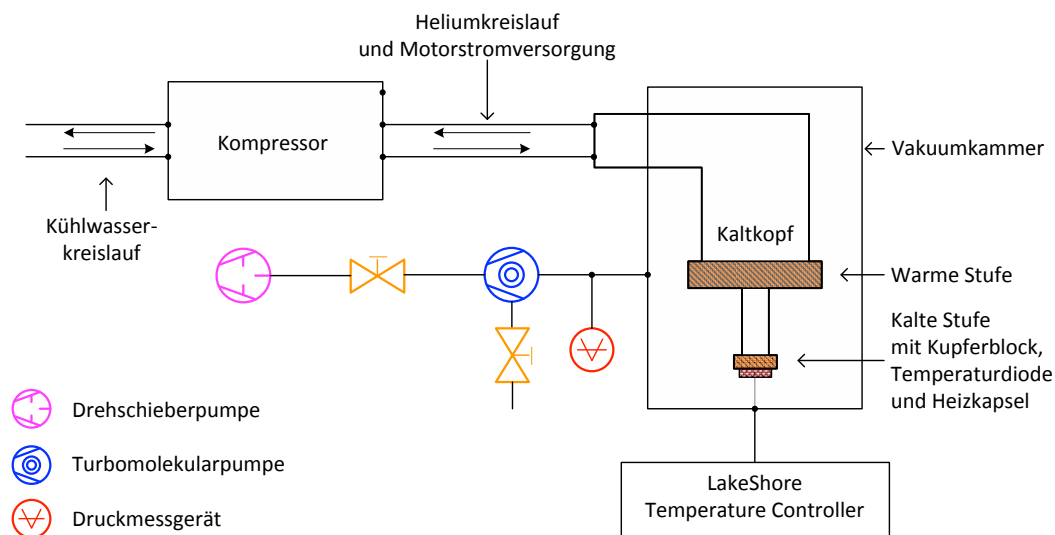


Abbildung 4.3.: Darstellung der wichtigsten Komponenten des Vakuumsystems der Kaltkopfkammer zur Untersuchung des Kaltkopfes.

Neben dem Wasserstoffdruck vor der Lavalldüse ist vor allem die Temperatur des Wasserstoffgases in der Lavalldüse entscheidend für den Clusterbildungsprozess. Aus diesem Grund befindet sich bei diesem Testaufbau auf der kalten Stufe - dem späteren Sitz der Lavalldüse - ein Kupferblock, in dem sowohl eine Diode zur Temperaturlauslese als auch eine Heizkapsel zur Temperaturregulierung eingelassen ist. Bei der Siliziumdiode handelt es sich um das Modell DT-670B-MT der Firma LakeShore Cryotronics, Inc. Sie zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit (Temperaturmessung bis auf $\pm 0,5$ K) und einer sehr guten Reproduzierbarkeit von ± 40 mK bei 77 K aus. Die Heizkapsel kann Leistungen bis zu 100 W erbringen. Die Auslese und Steuerung von Diode und Heizkapsel erfolgt über den Temperature Controller (Modell 336), ebenfalls der Firma LakeShore. Verschiedene Modi des Temperaturmessgerätes erlauben sowohl einen Betrieb mit konstanter Leistung der Heizkapsel

4.1 Der Kaltkopf 10MD und die Installation am Testpumpstand

und sich einstellender Temperatur des Kaltkopfes als auch mit konstanter Temperatur und sich anpassender Heizleistung der Heizkapsel. Während in den folgenden Abschnitten zunächst eine konstante Heizleistung gewählt wird, um die Kühlleistung des Kaltkopfes an der kalten Stufe zu ermitteln, erfolgt im späteren Verlauf die Stabilitätsanalyse des Kaltkopfes bei fest eingestellter Temperatur, entsprechend dem tatsächlichen Einsatz bei PANDA .

Einen Eindruck des Testaufbaus vermitteln die Abbildungen 4.4 und 4.5. Den Blick von oben in die Vakuumkammer ① und auf den Kaltkopf ermöglicht Abbildung 4.4. Die warme ② und kalte ③ Stufe sind zu erkennen, ebenso der Kupferblock ④ auf der kalten Stufe in der Temperaturdiode und Heizkapsel verbaut sind. Bei allen Untersuchungen wird der Kaltkopf zunächst nur mit dem Kupferblock versehen sein. Der Betrieb des Kaltkopfes mit dem Kupfer-/Edelstahlrohrleitungssystem, durch die das Wasserstoff strömt, wird nach Abschluss der Testmessungen dieser Arbeit folgen.

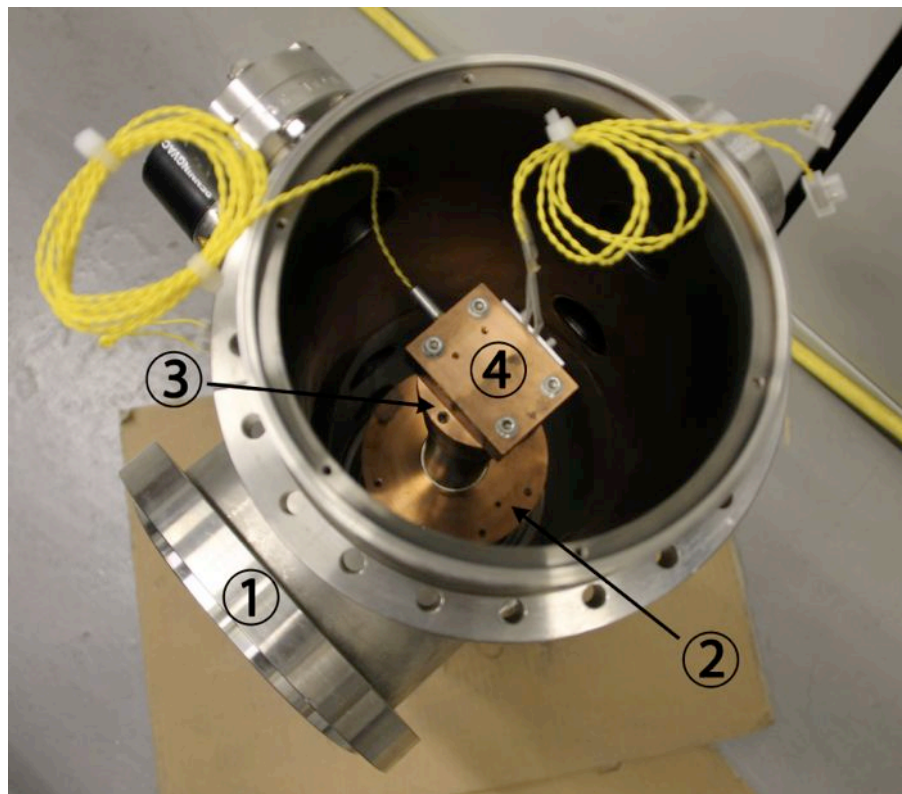


Abbildung 4.4.: Blick von oben in die Vakuumkammer ①. Die warme ② und kalte ③ Stufe des Kaltkopfes sind zu erkennen. Auf der kalten Stufe ③ befindet sich ein Kupferblock ④, in dem die Temperaturdiode und Heizkapsel eingelassen sind.

Der in der Vakuumkammer ① befindliche Kaltkopf ② ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Er wird bei allen Untersuchungen senkrecht mit der kalten Stufe nach unten aufgebaut sein. Zum einen liefert

der Kaltkopf in dieser Ausrichtung eine höhere Kühlleistung [Ley05], andererseits wird der Kaltkopf beim \bar{P} ANDA-Experiment ebenfalls in dieser Geometrie verwendet werden. Der Temperature Controller ③ ist mit der Kammer verkabelt. Sowohl die Temperatúrauslese als auch -regulierung erfolgt über diesen.

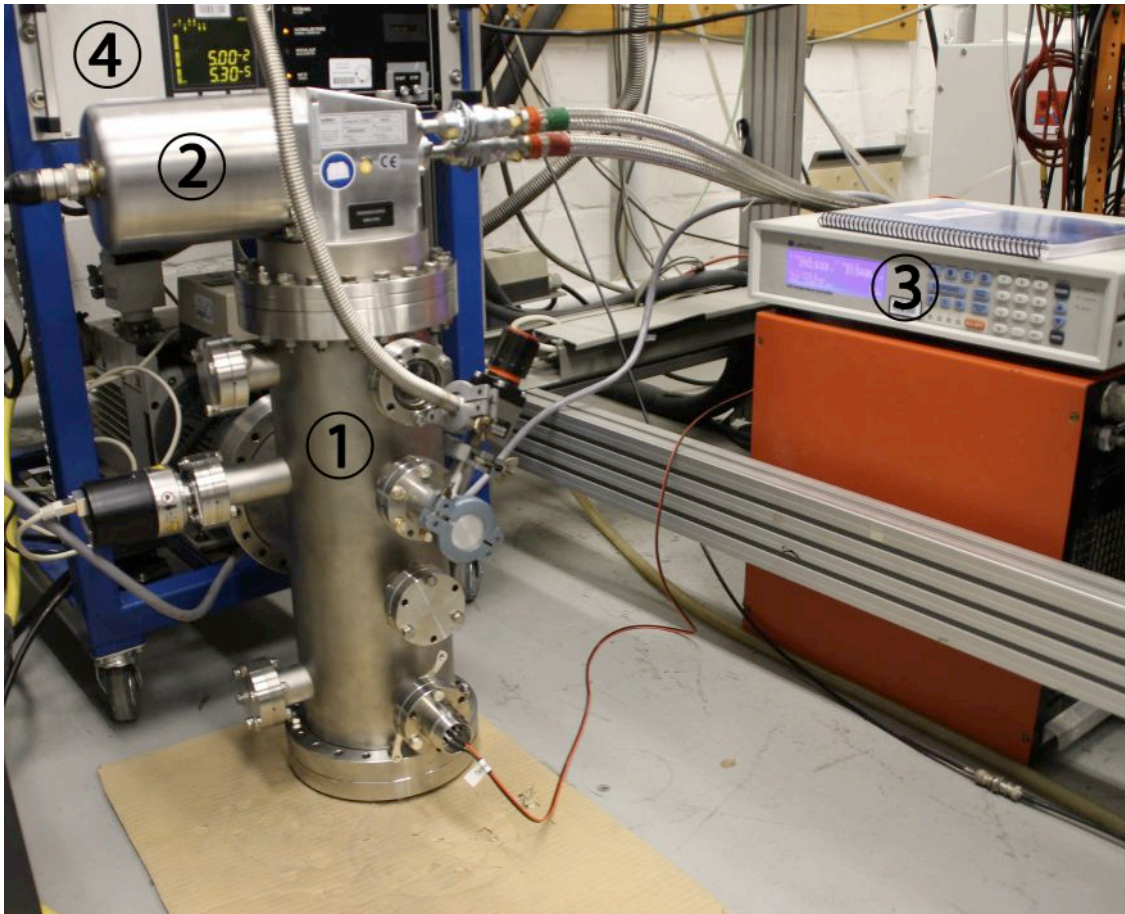


Abbildung 4.5.: Gesamtansicht des Teststandes mit Kaltkopf ②. Über den Pumpstand ④ (im Hintergrund) wird die Vakuumkammer ① evakuiert. Die Temperaturerfassung erfolgt über den Temperature Controller ③.

4.2. Die Kühlleistung des Kaltkopfes

Die resultierende Dichte der Clusterstrahlen hängt mit der Regulierung der Temperatur des Wasserstoffes an der Lavaldüse zusammen. Die Temperatur an der Lavaldüse soll in einem Bereich von ≤ 20 K für den Clusterstrahlbetrieb und bis zu 50 K im Standby eingestellt werden können. Das Wasserstoffgas fließt durch Kupferrohrleitungen, die im Bereich der warmen und kalten Stufe mehrfach um diese herum gewickelt sind. Im Betrieb muss das Wasserstoffgas im Vorbeiströmen auf eine minimale Temperatur von ≤ 20 K abgekühlt werden. Die Leistung des Kaltkopfes liegt darin, dies trotz der anliegenden Gaslast zu bewerkstelligen. Die Kenntnis der Kühlleistung des Kaltkopfes für verschiedene Temperaturen ist demnach von großer Bedeutung.

In diesem Abschnitt werden die Kühlleistungen des Kaltkopfes untersucht. Zunächst wird exemplarisch eine Kühlkurve aufgenommen. Sie liefert erste Erkenntnisse über die Kühlrate und die tiefste erreichbare Temperatur. Im Anschluss werden für eine konstante Heizleistung der Heizkapsel die sich einstellenden Temperaturen des Kaltkopfes ermittelt. Die resultierenden Kühlleistungen werden verglichen mit den Angaben für die Kühlleistungen des Herstellers Leybold. Untersucht wird auch der Einfluss der Kaltkopfmotorgeschwindigkeit auf die Kühlleistung.

4.2.1. Die Kühlkurve

Das Aufnehmen der Kühlkurve stellt einen ersten Funktionstest des Kaltkopfes dar und liefert dabei interessante Erkenntnisse über die Kühlrate und somit der Dauer bis zum Erreichen der tiefstmöglichen Temperatur und ihren genauen Wert.

In der Vakuumkammer herrscht bei diesen Untersuchungen ein Druck im Bereich von 10^{-7} mbar. Der Kaltkopf wird mit einer Kaltkopfgeschwindigkeit von 120 rpm exemplarisch von nahezu Raumtemperatur auf die tiefstmögliche Temperatur abgekühlt.

Die aufgenommene Kühlkurve ist in Abbildung 4.6 zu sehen. Zunächst lief die Messung einige Minuten bei Raumtemperatur ($T_R = 284$ K) und ausgeschaltetem Kaltkopf. Nach 7 Minuten wurde der Kompressor eingeschaltet und der Kaltkopf beginnt abzukühlen. Es folgt ein linearer Abschnitt, in dem die Kühlrate nahezu konstant ist. Die Kühlrate beträgt hier etwa $(-6,46 \pm 1,51)$ K/min und wurde durch eine Gerade approximiert. Im Anschluss folgt ein starkes Gefälle der Temperatur. Die tiefste erreichbare Temperatur stellt sich etwa 36 Minuten nach Einschalten des Kompressors ein. Der Mittelwert der Temperaturmesswerte beträgt $T_{\min} = (10,8053 \pm 0,0007)$ K. Der systematische Fehler der Temperaturdiode beträgt 0,5 K. Aufgrund der hohen Anzahl an Messwerten konnte der Mittelwert präzise bestimmt werden, wobei die Genauigkeit der Temperaturmessung durch die Standardabweichung von 0,15 K gegeben ist. Auf die Standardabweichung hat sowohl das

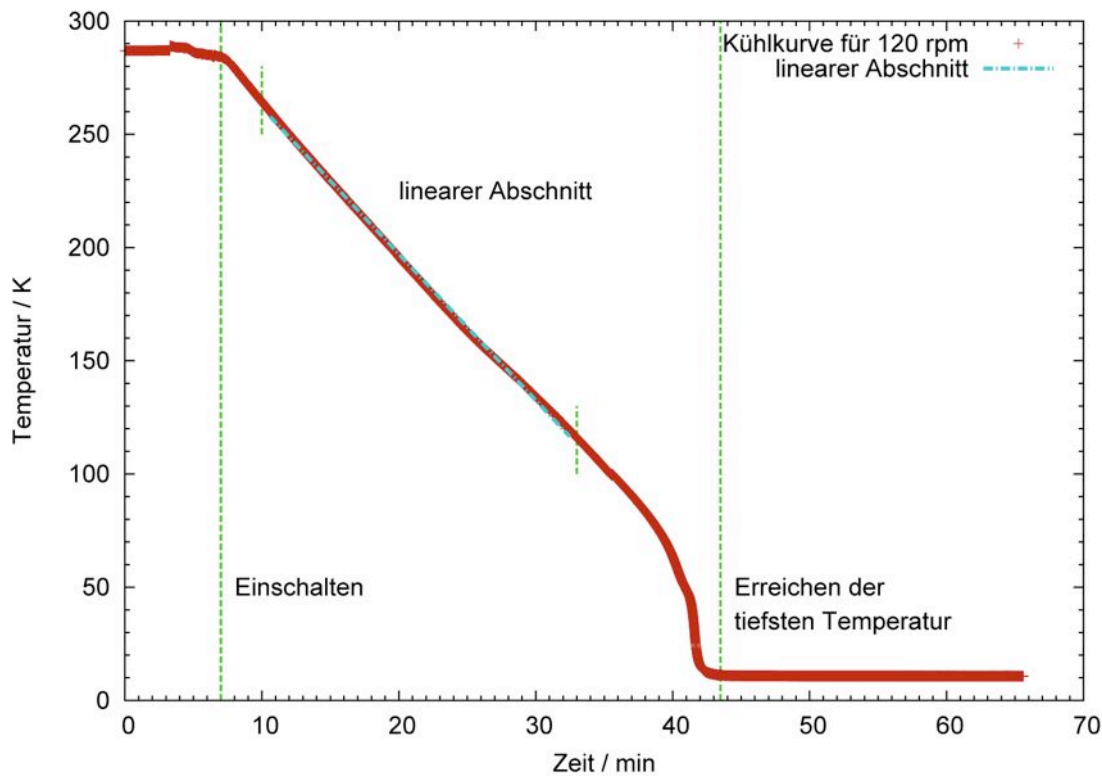


Abbildung 4.6.: Erster Funktionstest des Kaltkopfes und gleichzeitige Bestimmung der Kühlrate ($-6,46 \pm 1,51$ K/min (linearer Abschnitt)). Die tiefste Temperatur liegt bei etwa $T_{\min} = (10,8 \pm 0,5)$ K. Für den Kühlprozess ab Raumtemperatur wurden etwa 36 Minuten benötigt.

Messsystem Einfluss, andererseits auch eine tatsächliche minimale Temperaturschwankung um den Mittelwert. Durch die Erfassung der Temperatur mit einer Genauigkeit von 0,15 K wird bei dem Einsatz des Kaltkopfes am zukünftigen PANDA-Experiment kein Einfluss auf die Dichtestabilität erwartet. Der vorläufige Funktionstest ist somit erfolgreich verlaufen.

4.2.2. Bestimmung der Kühlleistung

Zur Bestimmung der Kühlleistung der kalten Stufe des Kaltkopfes werden über die Heizkapsel verschiedene Heizleistungen vorgegeben und die sich einstellende Temperatur wird an der kalten Stufe gemessen. Die Heizleistung der Kapsel entspricht direkt der Kühlleistung des Kaltkopfes. Die Leistung der 100 W Heizkapsel wird im Bereich zwischen 0 und 25 W reguliert. Wie sich bei dem Prototypen gezeigt hat, genügt eine Leistung von bis zu 25 W, um den für die Erzeugung von Clustern interessanten Temperaturbereich zwischen ≤ 20 K und 50 K vollständig abzudecken. An dem Kompressor lassen sich Kaltkopfmotorgeschwindigkeiten zwischen 20 und 160 rpm in

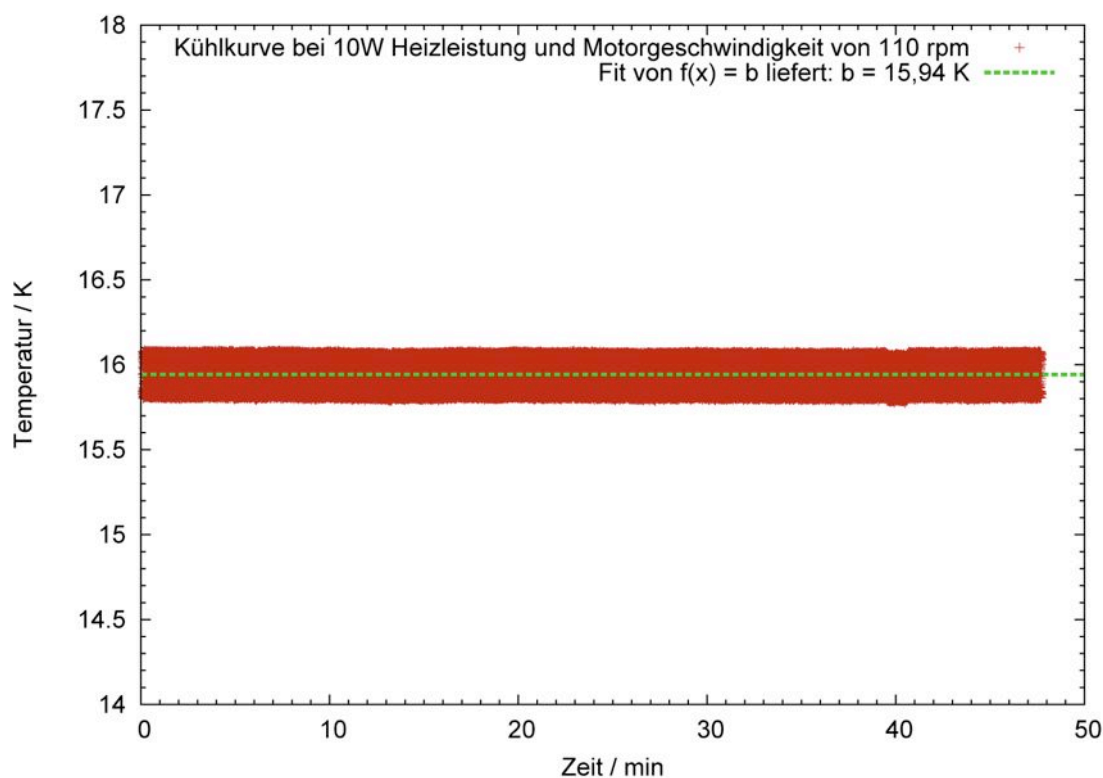


Abbildung 4.7.: Messung der Temperatur bei einer konstanten Heizleistung von 10 W bei einer Kaltkopfmotorgeschwindigkeit von 110 rpm. Die Messung beginnt nach Erreichen einer konstanten Temperatur und dauert knapp 48 Minuten. Der Fit einer Geraden durch die Messwerte liefert eine sehr genaue Temperaturangabe von $(15,9422 \pm 0,0004)$ K. Die Standardabweichung der einzelnen Messwerte ergibt sich zu 0,094 K.

10 rpm-Schritten einstellen. Laut Hersteller werden im Bereich von 120 rpm die besten Werte für die Kühlleistung erzielt [Ley05]. Aus diesem Grund wird untersucht, wie stark eine Abhängigkeit der Kühlleistung von der Geschwindigkeit des Motors für die Umdrehungszahlen 100 – 140 rpm vorhanden ist. Um auszuschließen, dass kein außergewöhnliches Verhalten bei kleinen Umdrehungszahlen zu beobachten ist, wurden zusätzlich Untersuchungen für 60 rpm durchgeführt. Somit wird zu sechs verschiedenen Motorgeschwindigkeiten (60, 100, 110, 120, 130, 140 rpm) jeweils in elf Stufen die Heizleistung (0 – 25 W in 2,5 W-Schritten) eingestellt und die Endtemperatur mindestens 30 Minuten gemessen.

Nach Erreichen der Endtemperatur wurde für jede Messung im Anschluss mit einem linearen Fit ihr exakter Wert ermittelt. Eine solche Messung ist in Abbildung 4.7 exemplarisch für eine Kaltkopfmotorgeschwindigkeit von 110 rpm und einer Heizleistung von 10 W dargestellt.

Der Temperature Controller, der über den Computer ausgelesen wird, liefert pro Sekunde rund 40

Messwerte. Wie in Abbildung 4.7 zu erkennen ist, streuen diese Messwerte um etwa $\pm 0,15$ K um den Mittelwert. Die absolute Genauigkeit der Temperaturdiode wurde vom Hersteller mit $\pm 0,5$ K beziffert. Die Unsicherheit des Mittelwertes ist jedoch aufgrund der hohen Anzahl an Messwerten sehr gering. Für diese Messung liegt die Temperatur bei $(15,9422 \pm 0,0004)$ K. Aus dem linearen Fit ergibt sich außerdem eine Standardabweichung der einzelnen Messwerte von 0,094 K.

Für Heizleistungen zwischen 0 W und 20 W ergaben sich für alle Umdrehungszahlen zu Abbildung 4.7 vergleichbare Diagramme. Bei Heizleistungen > 20 W zeigten sich vereinzelt Temperatursprünge und -schwankungen. Als Beispiel einer Messung mit Temperatursprüngen in diesem Heizleistungsbereich ist in Abbildung 4.8 die gemessene Temperatur bei 25 W Heizleistung und 110 rpm Motorgeschwindigkeit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur in den ersten 10 Minuten konstant ist. Anschließend treten vereinzelt Temperatursprünge von bis zu 15 K auf.

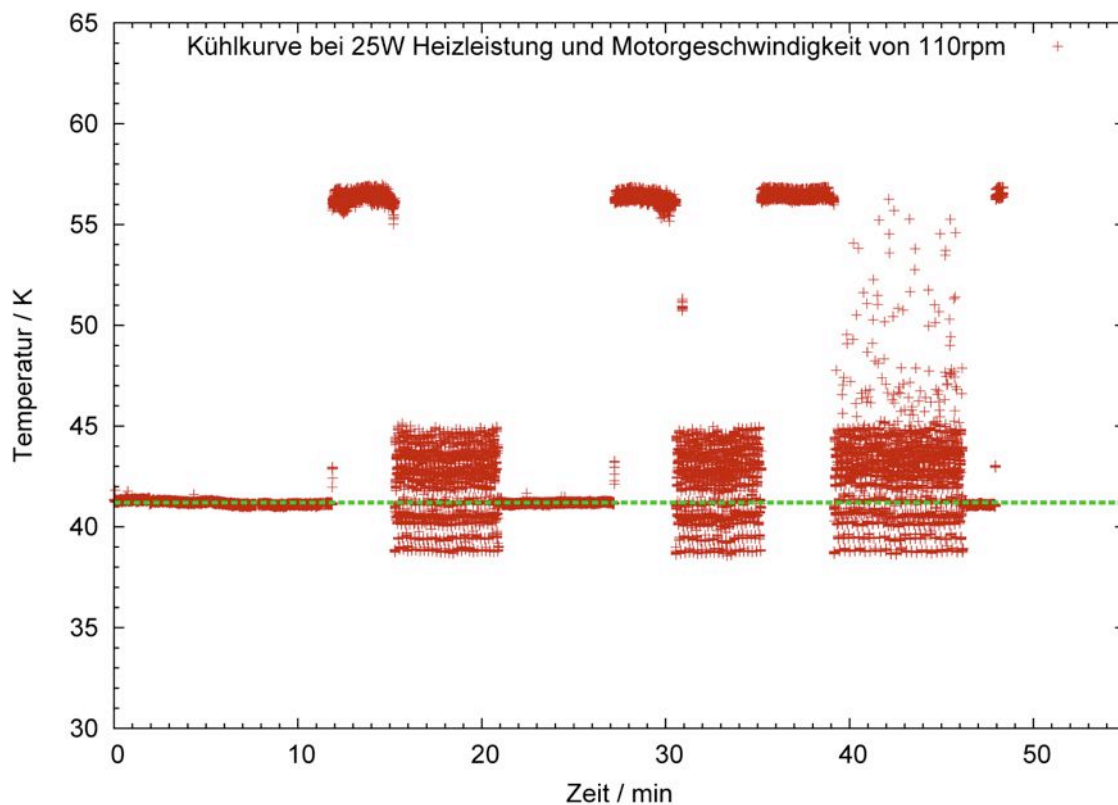


Abbildung 4.8.: Die Messung der Temperatur bei einer konstanten Heizleistung von 25 W und einer Motorgeschwindigkeit von 110 rpm weist Temperaturschwankungen und -sprünge von bis zu 15 K auf. Aufgrund vorheriger, präziser Messungen (u.a. der in Abbildung 4.7 dargestellten) werden Messfehler eher ausgeschlossen. Das komplexe Kühlsystem des Kaltkopfes und die Wechselwirkung zwischen kalter und warmer Stufe könnten das in diesem Temperaturbereich zu sehende Verhalten erklären.

Ebenfalls gibt es Bereiche, in denen die Temperatur stark um den Mittelwert schwankt, so zum Beispiel im Bereich zwischen 15 und 21 Minuten.

Aufgrund der äußerst präzisen Temperaturmessung bei tieferen Heizleistungen und Temperaturen (siehe z.B. Abbildung 4.7) ist eine Fehlmessung der Temperatur durch die Diode eher unwahrscheinlich. Zwar wird die Temperatur nur an der kalten Stufe gemessen, jedoch stellt der Kaltkopf mit der Kombination aus kalter und warmer Stufe ein komplexes System dar. Vermutlich befindet sich dieses System bei Heizleistungen im Bereich von > 20 W in Temperaturbereichen, die thermodynamisch instabil sind, so dass es seine Temperatur rapide ändern kann.

Da anstelle des zu Testzwecken montierten Kupferblocks an der kalten Stufe am finalen Aufbau für \bar{P} ANDA ein Gasleitungssystem mit höherer absoluten Wärmekapazität vorhanden sein wird, sind selbst in den entsprechenden Temperaturbereichen mögliche Temperaturschwankungen deutlich gedämpft. Des Weiteren wird beim \bar{P} ANDA-Experiment nicht mit einer konstanten Heizleistung gearbeitet, sondern die Temperatur wird über den Temperature Controller reguliert und auf einem Setpoint gehalten (siehe Abschnitt 4.3). Wie die Messungen am derzeitig eingesetzten Kaltkopf des Prototypen gezeigt haben, sind Temperaturschwankungen oder -sprünge in diesem Betriebsmodus nicht aufgetreten.

Durch mehrfaches Wiederholen konnten auch in den Leistungsbereichen mit 22,5 und 25 W Temperaturmessungen mit Genauigkeiten entsprechend der aus Abbildung 4.7 aufgezeichnet und ausgewertet werden.

Für alle Kombinationen von Heizleistung und Kaltkopfmotorgeschwindigkeit wurde die Temperatur in Abhängigkeit der Heizleistung gemessen. Nach Vorgabe einer konstanten Heizleistung stellte sich abhängig von der Motorgeschwindigkeit die entsprechende Temperatur nach etwa 5 bis 30 Minuten ein. Im Fall von lediglich 60 rpm waren bei höheren Heizleistungen unter Umständen Wartezeiten von bis zu 60 Minuten notwendig. Die Ergebnisse der Kühlleistung der kalten Stufe des Kaltkopfes sind in Abbildung 4.9 zu sehen. Aufgetragen ist die sich einstellende Temperatur bei vorgegebener Heizleistung. Ebenfalls wurden die vom Hersteller Leybold angegebenen Werte mit in das Diagramm eingetragen, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen [Ley05]. Dabei ist anzumerken, dass Leybold in der Produktbeschreibung des Kaltkopfes Coolpower 10MD nur Angaben bis zu Kühlleistungen von 20 W macht.

Zu erkennen ist, dass für tiefe Temperaturen bis etwa 15 K die Kühlleistungen unabhängig von der Kaltkopfmotorgeschwindigkeit nahezu gleich sind. Für höhere Temperaturen laufen die Messpunkte allmählich auseinander. Vor allem im Bereich oberhalb von 25 K ist eine deutliche Unterscheidung der Kühlleistungen möglich. Nicht verwunderlich ist, dass die Kaltkopfmotorgeschwindigkeit 60 rpm

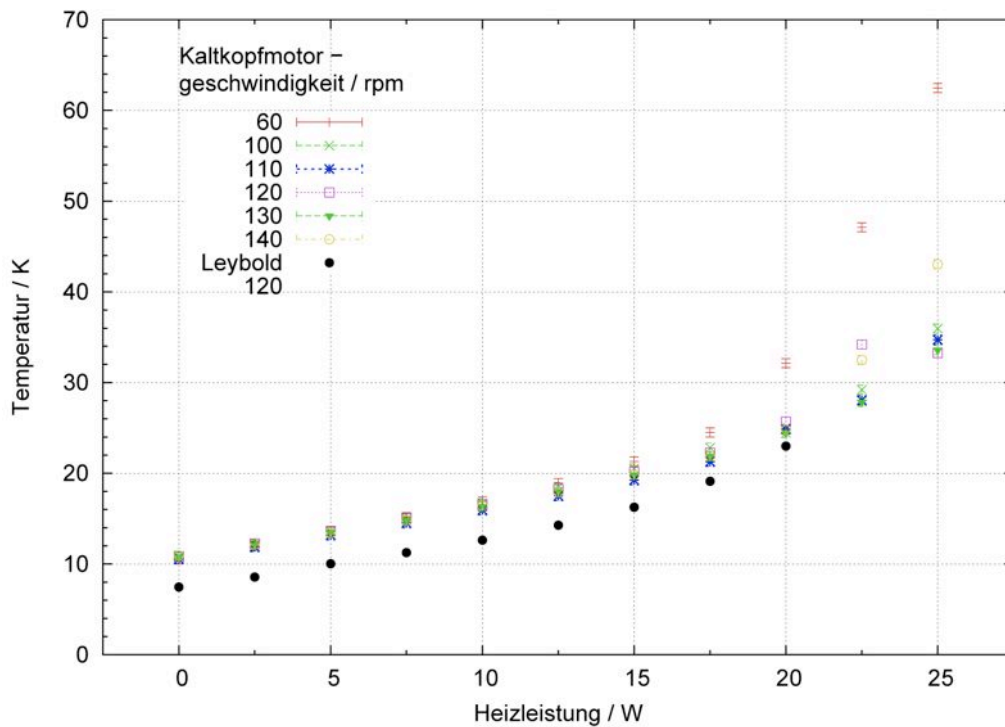


Abbildung 4.9.: Kühlleistung der kalten Stufe für verschiedene Kaltkopfmotorgeschwindigkeiten. Aufgetragen ist die Temperatur gegen die Kühlleistung der kalten Stufe. Für einen direkten Vergleich sind die Herstellerangaben eingezeichnet. Zu erkennen ist, dass für kleine Heizleistungen annähernd dieselben Temperaturen erreicht werden. Bei zunehmender Heizleistung zeichnet sich ab, dass Motorgeschwindigkeiten von 110 und 130 rpm die höheren Kühlleistungen erbringen.

die kleinsten Kühlleistungen liefert. Allerdings wird die Vermutung, dass höhere Kaltkopfmotorgeschwindigkeiten auch höhere Kühlleistungen liefern, augenscheinlich widerlegt: Bis zu einer Kühlleistung von 17,5 W liefert die Motorgeschwindigkeit 110 rpm die tiefsten Temperaturen. Bei den höheren Kühlleistungen bis hin zu 25 W sind es vor allem die Geschwindigkeiten 110 und 130 rpm, die die kalte Stufe am tiefsten abkühlen. Die größte untersuchte Kaltkopfmotorgeschwindigkeit von 140 rpm liefert hingegen kleinere Kühlleistungen.

Die Angaben des Herstellers Leybold weisen alle um 1 bis 3 W bessere Kühlleistungen auf, als die gemessenen Werte. Eine mögliche Erklärung für die Abweichungen könnte ein herstellungsbedingtes, individuelles Verhalten jedes Kaltkopfes sein, das sich in der erreichbaren Kühlleistung widerspiegelt. So liefern beispielsweise externe Untersuchungen an vier baugleichen Kaltköpfen des Modells Coolpower 10MD Kühlleistungen, die um bis zu 20% voneinander abweichen [JL10].

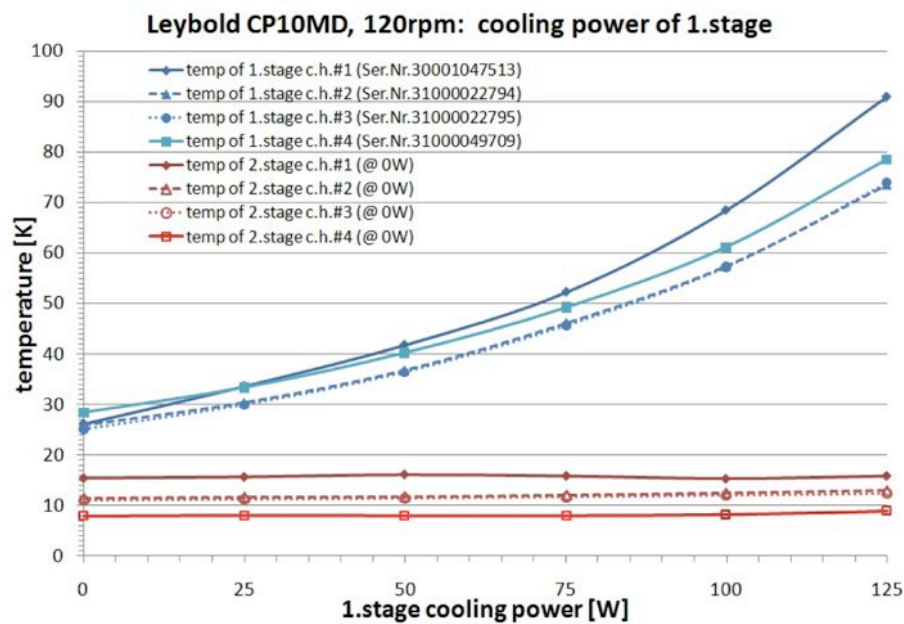


Abbildung 4.10.: Messung der Temperatur an der warmen („1.stage“, blau) und kalten Stufe („2.stage“, rot) für vier verschiedene Kaltköpfe des Modells 10MD. Nur an der warmen Stufe wird eine Heizleistung vorgegeben. Die tiefsten Temperaturen sind je nach Kaltkopf unterschiedlich [JL10].

Die Art der Untersuchung sowie die Ergebnisse eines der untersuchten Kaltköpfe stimmen im Allgemeinen mit dem hier verwendeten Kaltkopf überein. Ein Ergebnis der Messungen ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Dabei wurde die Heizleistung an der „1.stage“ (warme Stufe) verändert, während die „2.stage“ (kalte Stufe) ohne Heizleistung betrieben wurde. Die vier unteren bzw. rötlichen Kurven stellen die Temperatur an der kalten Stufe von vier verschiedenen Kaltköpfen des Modells 10MD dar.

Die Messungen haben gezeigt, dass der Kaltkopf in dem derzeitigen Aufbau bei 20 K etwa 16 W Kühlleistung liefert. Damit liegt der Wert 2 W unter der Herstellerangabe. Des Weiteren konnte gesehen werden, dass oberhalb von 20 W Heizleistung die Temperaturaussage mit der Diode teilweise schwankende Messwerte liefert. Durch wiederholtes Messen kann die tatsächliche Temperatur jedoch sehr präzise bestimmt werden.

Wie die Untersuchungen an dem Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2 gezeigt haben, ist eine Temperatur an der kalten Stufe des Kaltkopfes im Bereich von ≤ 20 K optimal dazu geeignet, Clusterstrahlen hoher Dichte herzustellen. Anhand von Abbildung 4.9 ist ersichtlich, dass für diesen Temperaturbereich eine Kaltkopfmotorgeschwindigkeit von 110 rpm aufgrund der höchst möglichen Kühlleistung am besten geeignet ist.

4.3. Untersuchungen zur Stabilität der Temperatur

Die Steuerung der Temperatur an der kalten Stufe des Kaltkopfes kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen: zum einen ist es möglich, die Leistung der Heizpatrone konstant zu halten, so dass sich eine konstante Temperatur einstellt. Zur Bestimmung der Kühlleistung des Kaltkopfes an der kalten Stufe wurde dies in Abschnitt 4.2.2 genutzt. Andererseits kann eine zu erreichende Temperatur vorgegeben werden. Wie im Folgenden erläutert wird, übernimmt der Temperature Controller in diesem Fall die Steuerung der Heizleistung und passt diese entsprechend an. Für den zukünftigen Einsatz des Cluster-Jet Targets am $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment ist es zweckmäßig diesen Modus zu benutzen. Auf diese Weise kann die Temperatur so eingestellt werden, dass hoch dichte Kernstrahlen entstehen. Gleichzeitig kann damit die Dichte um mehrere Größenordnungen reguliert werden [Köh10]. Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der zeitlichen Stabilität der Temperatur sowie mit dem Einfluss der Kaltkopfmotorgeschwindigkeit auf die Stabilität.

4.3.1. Einstellung einer konstanten Temperatur

Der Temperature Controller (Modell 336) der Firma LakeShore ermöglicht die Temperatúrauslese der Diode und die Steuerung der Leistung der Heizkapsel. In dem vorherigen Abschnitt wurde zur Vorgabe einer konstanten Heizleistung der so genannte „Open-Loop“ Modus benutzt. Um eine konstante Temperatur einzustellen, bietet das Gerät mit dem „Closed-Loop-PID“ Modus die Möglichkeit, die derzeitige Temperatur mit der vorgegebenen Endtemperatur (im Folgenden „Setpoint“ genannt) zu vergleichen und die Heizleistung entsprechend einzustellen. Die Heizleistung, die der Temperature Controller ausgibt, ergibt sich nach Formel (4.1) [Lak11].

$$\text{Heater Output} = P \left[e + I \int e \, dt + D \frac{de}{dt} \right] \quad (4.1)$$

Dabei ist e die Differenz zwischen dem Setpoint und der aktuellen Temperatur:

$e = \text{Solltemperatur (Setpoint)} - \text{Ist-Temperatur}$.

Die Faktoren P , I und D können im Temperature Controller eingestellt werden. P stellt einen proportionalen Faktor dar und muss größer als Null gewählt werden. Wird nur ein Wert für P definiert, während I und D Null bleiben, so nähert sich die Temperatur nur dem Setpoint an, ohne ihn zu erreichen. Für I ungleich Null wird die ausgegebene Heizleistung zusätzlich durch die zeitliche Integration über e korrigiert. Auf diese Weise verschwindet die Differenz zwischen dem Setpoint und der tatsächlichen Temperatur, die vorhanden ist für P ungleich Null. In einem Kaltkopfbetrieb, bei dem sich e schnell ändert, kann ebenfalls der Ableitungsterm hinzugefügt werden. Der Wert von D bestimmt, wie sehr die Änderung von e mit der Zeit in die Heizleistung eingeht. Da dieser

Term jedoch auch bei kleinen Temperaturschwankungen große Heizleistungsänderungen bewirkt, wird D bei nachfolgenden Untersuchungen auf Null gesetzt. Eine möglichst konstante Temperatur sollte nur mit den Faktoren P und I zu erreichen sein.

Werte für die Faktoren P und I

Die vom Hersteller vorgeschlagene Methode zur geeigneten Bestimmung von P und I wird im Folgenden näher beschrieben. Dazu werden anfänglich I und D auf Null gesetzt, für P wird ein Startwert von 5 gewählt. Durch wiederholtes Verdoppeln des Proportionalitätsfaktors wird nun die Temperatur dem Setpoint angenähert. Ab einem gewissen Wert von P sollten sich Oszillationen der Temperatur um den Setpoint einstellen. Die Periodendauer der Oszillationen muss zur Optimierung des integrierbaren Faktors ermittelt werden. Der optimale Wert für P liegt im Bereich der Hälfte des aktuellen Wertes. Um einen Wert für I zu finden, wird die Zahl 1000 durch die Periodenlänge der Oszillationen in Sekunden geteilt [Lak11]. Mit Zahlenwerten für P und I im Bereich der gefundenen Werte sollte der Setpoint schnell erreicht werden können und eine hohe Stabilität gewährleistet werden.

Mit diesem Verfahren wurde versucht durch Verdoppeln des P Wertes Oszillationen zu beobachten. Der Setpoint wurde dabei auf 20 K gesetzt, da bei diesem Temperaturbereich hoch dichte Kernstrahlen entstehen. Selbst bei dem größten einstellbaren Wert von $P = 1000$ konnten keine Temperaturschwingungen gemessen werden. Wahrscheinlich ist, dass die geringe Masse des Kupferblocks eine zu geringe absolute Wärmekapazität für den Kaltkopf darstellt. Erst bei dem zukünftigen Aufbau, der ebenfalls die Kupferrohrleitungen für das Wasserstoffgas enthält, sollte die absolute Wärmekapazität des Systems groß genug sein, um Oszillationen messen zu können. Da der Setpoint für viele Kombinationen von P und I schnell erreicht wird und stabil bleibt, wurden phänomenologische Untersuchungen quantitativ ausgewertet. Von der tiefstmöglichen Temperatur startend ergibt sich, dass ein größerer P Wert ein schnelleres Erreichen des Setpoints bewirkt (< 200 s für $P = 80$, < 15 s für $P = 320$), es aber länger dauert, bis die Temperatur sich auf den Setpoint eingependelt hat (< 100 s für $P = 80$, < 500 s für $P = 320$). Aus vielen Kombinationen wurden die Werte $P = 160$ und $I = 40$ gewählt. Mit dieser Wahl dauert es etwa 80 Sekunden bis der Setpoint erreicht ist, die Schwankungen um den Setpoint werden dabei nach weniger als 200 Sekunden minimal.

4.3.2. Einfluss der Kaltkopfmotorgeschwindigkeit auf den Setpoint

Die ersten Messungen mit vorgegebener konstanter Temperatur im „Closed-Loop“ Modus haben gezeigt, dass die Werte $P = 160$ und $I = 40$ ein Erreichen des Setpoints mit schnellem Abklingen der Schwingungen um den Setpoint ermöglichen. Im Anschluss kann der Einfluss der Kaltkopfmotorgeschwindigkeit auf die zeitliche Stabilität untersucht werden. Der Setpoint wird im Folgenden wieder bei 20 K liegen. Entsprechend den Messungen zur Kühlleistung des Kaltkopfes in Abschnitt 4.2.2 werden Kaltkopfmotorgeschwindigkeiten von 60 rpm sowie 100 bis 140 rpm genutzt. Um einen einheitlichen Messvorgang zu gewährleisten wird jede Messung wie folgt durchgeführt: Der Kaltkopf wird zunächst ohne Heizleistung betrieben, so dass der Setpoint nach Einschalten des „Closed-Loop“ Modus jeweils von der tiefstmöglichen Temperatur angestrebt wird. Nach Erreichen des Setpoints und Stabilisierung der Temperatur wird jeweils 25 Minuten die Temperatur gemessen. Bei der Auswertung der Messdaten wird durch den Fit einer Geraden durch die Messpunkte sowohl der Mittelwert ermittelt als auch die Standardabweichung als Maß für die Stabilität der Temperatur. Bei allen Messungen liegt der Mittelwert bei 20 K. Für die Umdrehungszahlen 60 und 140 rpm sind die Messergebnisse für die ersten 15 Minuten nach Erreichen einer konstanten Temperatur exemplarisch in Abbildung 4.11 dargestellt. Aufgetragen ist in gleichen Maßstäben die Temperatur

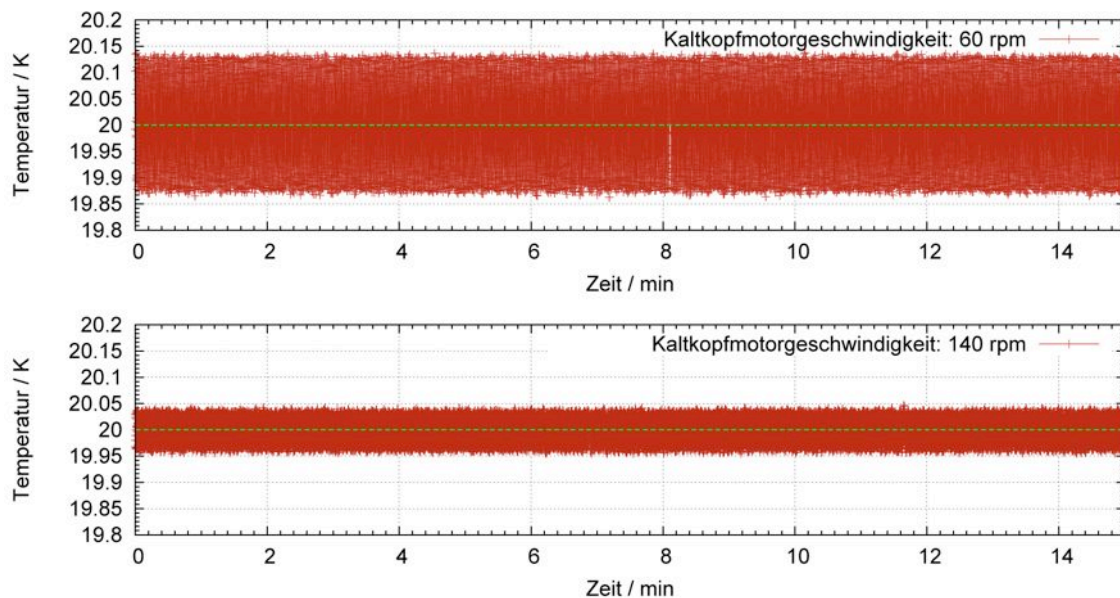


Abbildung 4.11.: Messung der Temperatur nach Erreichen des Setpoints von 20 K für jeweils 15 Minuten. Bei einer Kaltkopfmotorgeschwindigkeit von 60 rpm beträgt die Standardabweichung der Messwerte 86,87 mK, bei 140 rpm lediglich 25,77 mK.

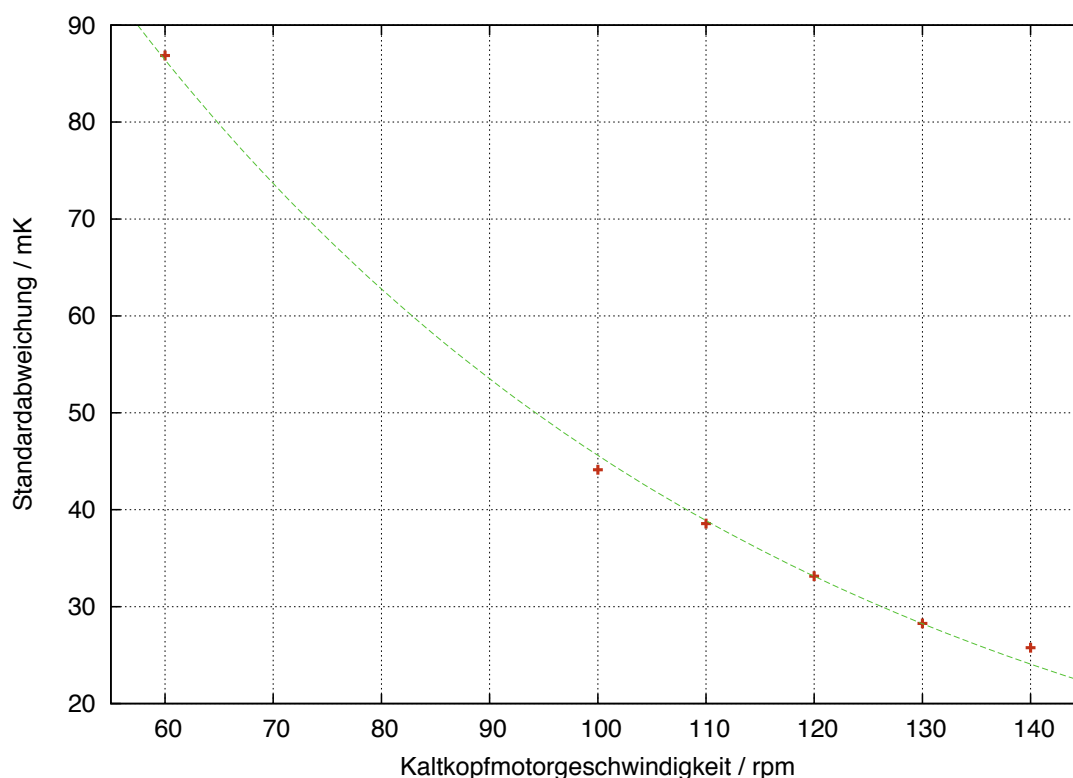


Abbildung 4.12.: Die Standardabweichung als Maß für die Stabilität der Temperatur ist hier dargestellt als Funktion der Kaltkopfmotorgeschwindigkeit. Zu erkennen ist ein nahezu exponentieller Abfall der Standardabweichung bei zunehmender Drehzahl. Die eingezeichnete Kurve dient lediglich der Verdeutlichung des Verhaltens. Der Kaltkopf ist im mK-Bereich stabil und eignet sich zur Erzeugung hoch dichter Clusterstrahlen.

gegen die Zeit. Diese Umdrehungszahlen wurden gewählt, um den Unterschied, den die Kaltkopfmotorgeschwindigkeit bei der Streuung der Temperatur um den Mittelwert ausmacht, deutlich darzustellen: Für die höhere Umdrehungszahl von 140 rpm ist die Standardabweichung kleiner als bei 60 rpm.

Für die weiteren Umdrehungszahlen ergeben sich ähnliche Messkurven. Die Standardabweichung wurde für die Motorgeschwindigkeiten 60, 100 – 140 rpm bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.12 zu sehen. Da der Fehler der Standardabweichung σ gleich $\sigma/\sqrt{2N}$ ist und die Anzahl der Messwerte N im Bereich von etwa 50.000 liegt, sind die Fehlerbalken sehr klein und daher nicht sichtbar. Die eingezeichnete Kurve hat nicht den Anspruch Messpunkte zu interpolieren. Vielmehr soll sie den Blick des Lesers führen und das nahezu exponentiell abfallende Verhalten der Standardabweichung bei zunehmender Drehzahl verdeutlichen.

Für hohe Kaltkopfmotorgeschwindigkeiten ist die Streuung um den Mittelwert demnach minimal. Anschaulich entspricht dies der Tatsache, dass die Zeit zwischen zweimaligem Durchlaufen des thermodynamischen Kreislaufes zur Abfuhr der Wärme an der kalten Stufe bei höheren Drehzahlen kleiner ist und sich die kalte Stufe somit weniger stark erwärmen kann.

Für Kaltkopfmotorgeschwindigkeiten > 100 rpm liegt die Schwankung der Temperatur um den Mittelwert nach Abbildung 4.12 im Bereich von 25 bis 45 mK. Für den zukünftigen Einsatz mit konstanter Temperatur zur Erzeugung der hoch dichten Kernstrahlen sind aufgrund der geringen Schwankungen der Temperatur Drehzahlen > 100 rpm geeignet.

4.3.3. Langzeitstabilität und der Einfluss des Setpoints

Zu den wichtigsten Eigenschaften die der Kaltkopf erfüllen muss, zählt die Stabilität der Temperatur an der kalten Stufe über lange Zeiträume. Dies gewährleistet einen dauerhaften, wartungsfreien Betrieb des Cluster-Jet Targets beim \bar{P} ANDA-Experiment sowie eine zeitlich konstante Dichte, so dass Luminositätsschwankungen minimiert werden. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt Untersuchungen vorgestellt, bei denen für einen Betrieb des Kaltkopfes über einige Stunden bis hin zu Tagen die Temperatur gemessen wurde. Des Weiteren wird der Einfluss verschiedener Endtemperaturen auf die Stabilität des jeweiligen Setpoints erörtert.

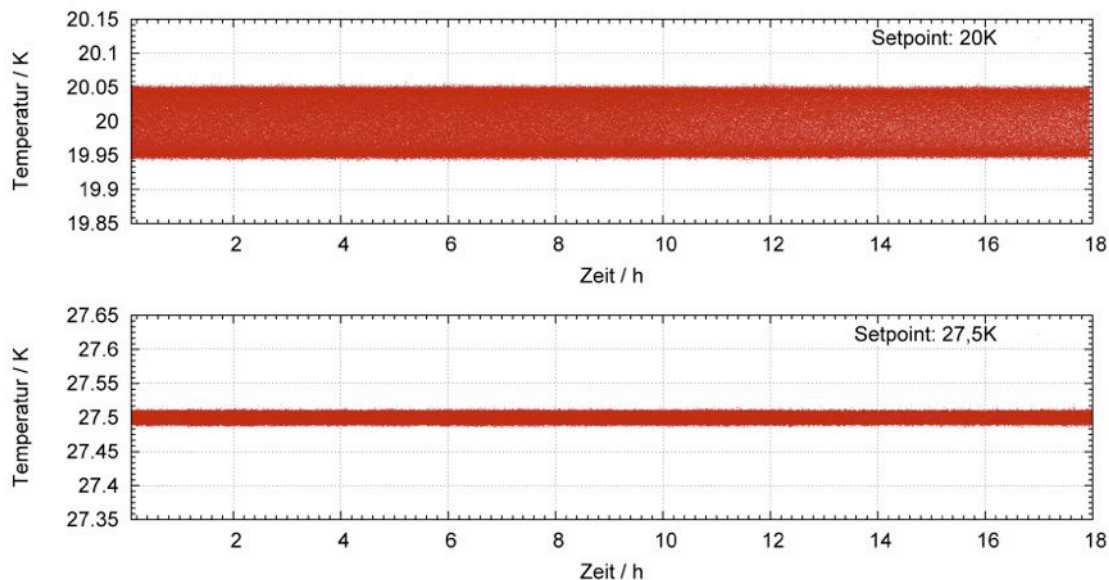


Abbildung 4.13.: Die Temperatur kann über die Regulierung des Temperature Controllers über 18 Stunden konstant gehalten werden. Bei Erhöhung des Setpoints verringern sich die Temperaturschwankungen um diesen. Dies wird exemplarisch für 20 und 27,5 K gezeigt.

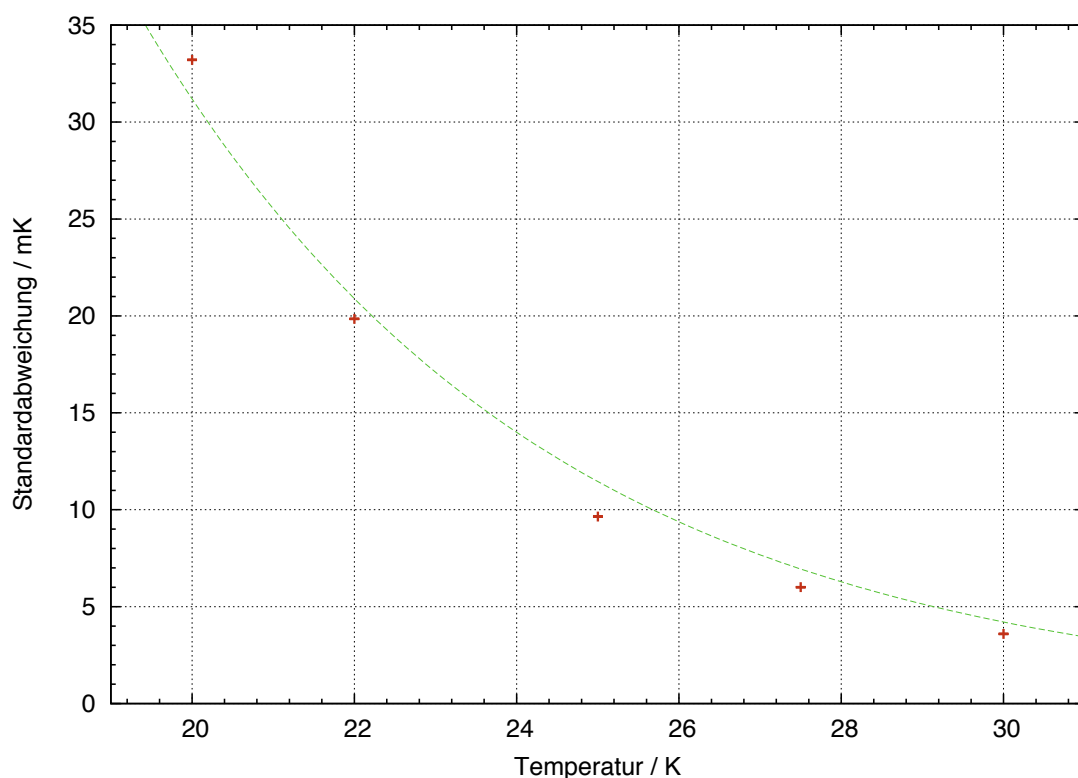


Abbildung 4.14.: Die Standardabweichung dient als Maß für die Stabilität der Temperatur um den Setpoint und fällt nahezu exponentiell mit zunehmendem Setpoint ab.

Die Firma Leybold empfiehlt als optimale Kaltkopfmotorgeschwindigkeit 120 rpm. Aus diesem Grund wurden für eine feste Umdrehungszahl von 120 rpm einige Setpoints im Bereich zwischen 20 K und 30 K die Temperaturen jeweils über Zeiträume von mindestens 18 Stunden gemessen. Der gewählte Temperaturbereich entspricht dabei dem typischen Clusterproduktionsbereich mit Dichten im Bereich von $10^{14} - 10^{15}$ Atomen/cm². Die Faktoren zur Regulierung der Heizleistung wurden auf $P = 160$ und $I = 40$ gesetzt. Wie in Abbildung 4.13 zu erkennen ist, bleibt die Temperatur mit minimalen Schwankungen um den Setpoint über 18 Stunden konstant, wobei diese mit zunehmendem Setpoint kleiner werden. Der Mittelwert aller Messungen liegt auf dem jeweiligen Setpoint. Die Standardabweichung der Messungen gilt als Maß für die Temperaturschwankungen. Bei Erhöhung des Setpoints wird diese kleiner. Dieses ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Der Fehler der Werte für die Standardabweichung ist minimal und nicht sichtbar. Die eingezeichnete Kurve dient der Orientierung und verdeutlicht den nahezu exponentiellen Verlauf.

Die Untersuchungen zur zeitlichen Stabilität der eingestellten Temperatur des Kaltkopfes ergaben, dass dieser über Stunden, bis hin zu Tagen den Setpoint mit minimalen Abweichungen in der

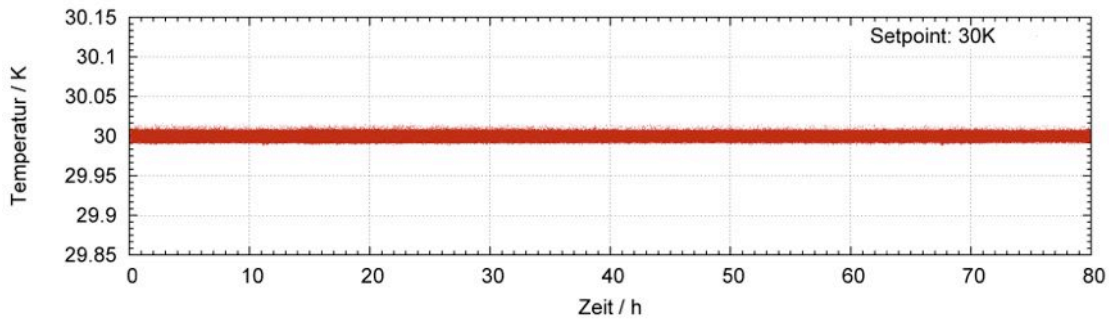


Abbildung 4.15.: Die Messung der Temperatur über einen Zeitraum von 80 Stunden bei einem Setpoint von 30 K zeigt, dass die Langzeitstabilität des Kaltkopfes gegeben ist. Damit ist der Einsatz des Kaltkopfes beim PANDA-Experiment über lange Zeiträume möglich.

Größenordnung einiger mK konstant halten kann. Bestätigend zeigt Abbildung 4.15 eine Messung über einen Zeitraum von 80 Stunden. Des Weiteren wurde die Temperatur umso genauer gehalten, desto höher der Setpoint gewählt wurde. Aufgrund der hervorragenden Stabilität der Temperatur sollten beim Einsatz des Kaltkopfes am PANDA-Experiment temperaturbedingte Dichtefluktuationen stark unterdrückt sein.

4.3.4. Oszillationen aufgrund der Kaltkopfmotorfrequenz

Die Messung der Temperatur mittels der Temperaturdiode und dem Temperature Controller erfolgt mit einer sehr hohen Präzision. Dies wird durch die folgende Messung bestätigt. Abbildung 4.16 zeigt für zwei Temperaturmessungen jeweils einen kleinen Ausschnitt von 5 Sekunden Länge. Dabei beträgt die Heizleistung 0 W. Der Kaltkopf arbeitet demnach jeweils im Bereich der tiefstmöglichen Temperaturen. Die Messungen unterscheiden sich in der Kaltkopfmotorgeschwindigkeit von 110 bzw. 120 rpm.

Es sind deutlich periodische Oszillationen mit einer kleinen Amplitude von etwa 0,2 K zu erkennen. Auffällig ist, dass die Periodizität T der Schwingungen direkt zusammen hängt mit der eingestellten Kaltkopfmotorgeschwindigkeit ($T = 0,50$ s bei 120 rpm, $T = 0,55$ s bei 110 rpm). Dies ist für einen kleinen Zeitbereich beispielhaft in der Abbildung zu sehen und kann insbesondere für größere Zeitabschnitte mit einer höheren Genauigkeit bestätigt werden. Aufgrund der geringen absoluten Wärmekapazität des Kupferblocks können die Temperaturschwankungen exakt den Arbeitsschritten des Verdrängerkolbens im Kaltkopf zugeordnet werden. Die Stabilität der Temperatur an der Lavaldüse des derzeitig betriebenen Cluster-Jet Target Prototypen weist darauf hin, dass die

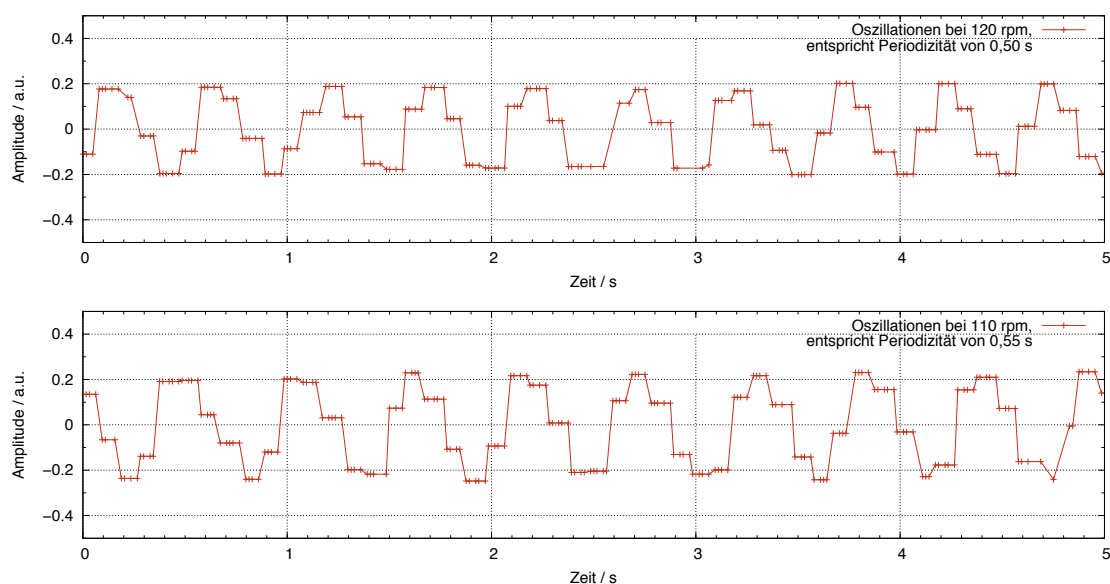


Abbildung 4.16.: Oben: Ausschnitt der Temperaturmessung bei 120 rpm.

Unten: Temperaturmessung bei 110 rpm. Aufgrund der geringen absoluten Wärmekapazität der Materialien an der kalten Stufe kann die Arbeitsfrequenz des Kaltkopfmotors in kleinen Oszillationen der Temperatur beobachtet werden.

beobachteten Oszillationen keinen Einfluss auf die Temperaturmessung am zukünftigen $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment haben, wenn durch die montierten Gasleitungen die absolute Wärmekapazität erhöht wird.

4.3.5. Verteilung der Temperaturmesswerte

Bei der Untersuchung der Stabilität der Temperatur mit gewähltem Setpoint wird im Folgenden näher auf die Verteilung der Temperaturmesswerte eingegangen. Dazu wird exemplarisch für die Messung der Temperatur bei einem Setpoint von 20 K (siehe Abschnitt 4.3.3) ein Histogramm der Messwerte erstellt. Der Temperaturbereich zwischen 19,9 bis 20,1 K wird in Intervalle der Größe 1 mK unterteilt. Das Histogramm ist in Abbildung 4.17 dargestellt.

Die zu sehende Verteilung der Temperaturmesswerte weist zwei Maxima zum Rand der Temperaturmesswerte auf. Dies ist typisch für oszillierende Messgrößen entsprechend einer Sinusfunktion. Da sich eine Sinusfunktion innerhalb einer Periode länger bei ihren Maxima aufhält als in der Umgebung des Punktes mit der größten Steigung beim Nulldurchgang, zählt das Histogramm in den Randbereichen mehr Messwerte. Dieser Vorgang ist zur Verdeutlichung in Abbildung 4.18 dargestellt. Zur Simulation der Verteilung wurde von K. Demmich eine Sinusfunktion mit Frequenz

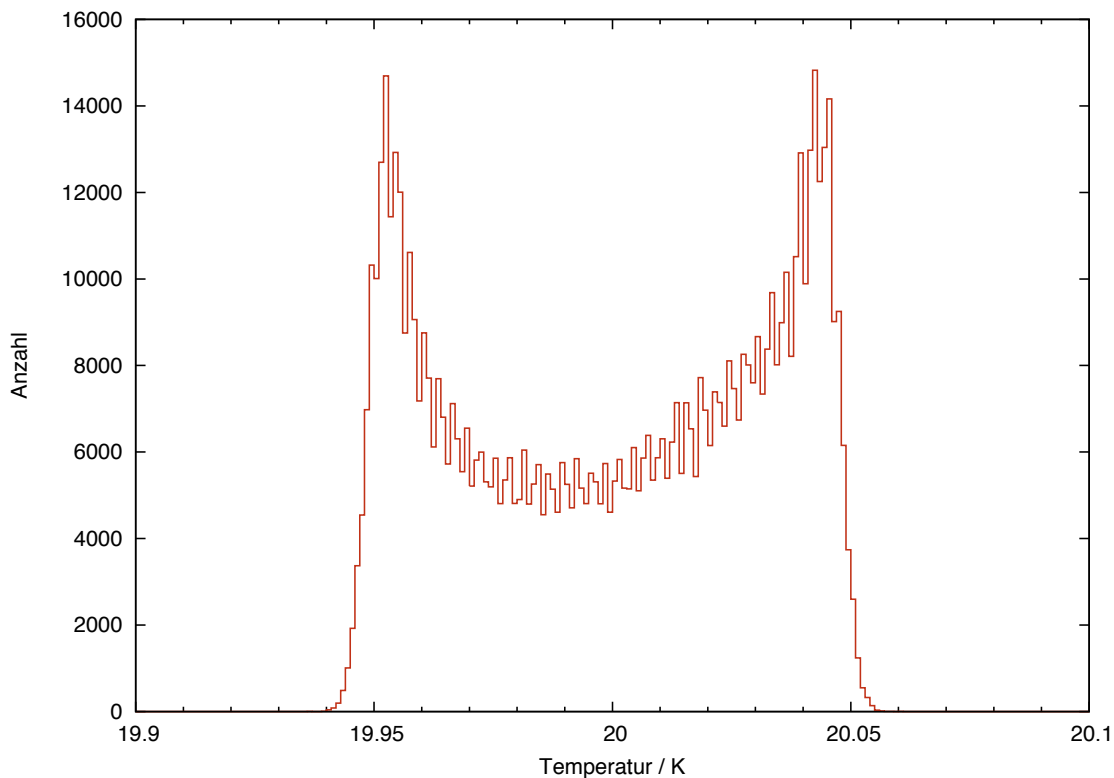


Abbildung 4.17.: Das Histogramm der gemessenen Temperatur bei einem Setpoint von 20 K zeigt zwei ausgeprägte Maxima am Rand der Verteilung. Dies ist typisch für sinusverteilte Temperaturmesswerte und kann mit der Oszillation aufgrund der Kaltkopfmotorfrequenz begründet werden.

2 Hz erzeugt und als Histogramm ausgegeben. Dabei wurde die Amplitude mit einer randomisierten Funktion (Rauschen) moduliert. Das zu sehende simulierte Histogramm zeigt eine starke Ähnlichkeit zu dem Histogramm der tatsächlich gemessenen Temperaturwerte aus Abbildung 4.17. Dass die Messwerte sinusverteilt vorliegen kann mit der Oszillation der Temperaturen aufgrund der Kaltkopfmotorfrequenz begründet werden.

4.4. Einfluss des Displacerwechsels auf die Endtemperatur

Nachdem in den Abschnitten 4.1 bis 4.3 unter anderem die Kühlleistung und die Stabilität des Kaltkopfes untersucht und ausgewertet wurden, fand ein Displaceraustausch bei dem Kaltkopf statt. Dieser bringt Veränderungen der Eigenschaften des Kaltkopfes mit sich. Aus diesem Grund stellt dieser Abschnitt einen kurzen Funktionstest des umgebauten Kaltkopfes dar, in dem ebenfalls die Kühlleistung und die tiefste erreichbare Temperatur bestimmt werden.

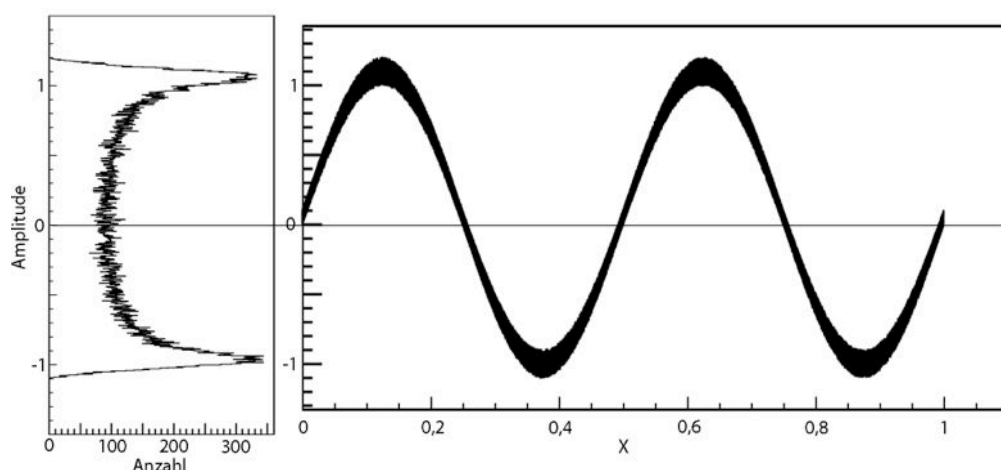


Abbildung 4.18.: Das Histogramm (links) der simulierten Sinusfunktion (rechts) von K. Demmich mit randomisierter Amplitude (entsprechend einem Rauschen) weist eine ähnliche Verteilung auf, wie das gemessene, in Abbildung 4.17 dargestellte Histogramm.

4.4.1. Erster Funktionstest

Der umgebaute Kaltkopf befindet sich bei den Untersuchungen in einem zu Abbildung 4.3 analogen Messaufbau. Ein zusätzliches Handventil ermöglicht das Trennen der Vor- und Turbomolekularpumpe von der Vakuumkammer, in der sich der Kaltkopf befindet. Nachdem in der Vakuumkammer Drücke im Bereich von 10^{-4} mbar erreicht worden sind, konnte durch die Trennung vom Pumpstand der Druck weiter auf 10^{-8} mbar verbessert werden, da der Kaltkopf selbst wie eine Kryopumpe wirkt.

Die ersten Tests wurden mit einer neuen Temperaturdiode gleichen Typs durchgeführt. Dabei wurden Temperaturen im Bereich von 12,2 K erreicht. Die Messung vor dem Displacertausch ergab eine Tiefsttemperatur im Bereich von 10,8 K (siehe Abschnitt 4.2.2). Bei dem Einsatz der Dioden ist dabei zu beachten, dass bei der Zugentlastung keine Kriechströme auftreten können. Dabei sollten die Drähte der Diode genügend große Abstände aufweisen und auf eine Fixierungsmasse verzichtet werden.

4.4.2. Erste Ergebnisse der Kühlleistung

Nach der Bestimmung der tiefsten Temperatur, die an der kalten Stufe im Bereich von 12 K liegt, wurden verschiedene Setpoints vorgegeben und die zum Erreichen dieser Temperaturen notwendige Heizleistung gemessen. Diese entspricht direkt der Kühlleistung des umgebauten Kaltkopfes an der kalten Stufe. Da bei den Untersuchungen des ursprünglichen Kaltkopfes zur Stabilität des Setpoints in Abschnitt 4.3 ebenfalls die Heizleistung erfasst wurde, ist zusätzlich ein Vergleich

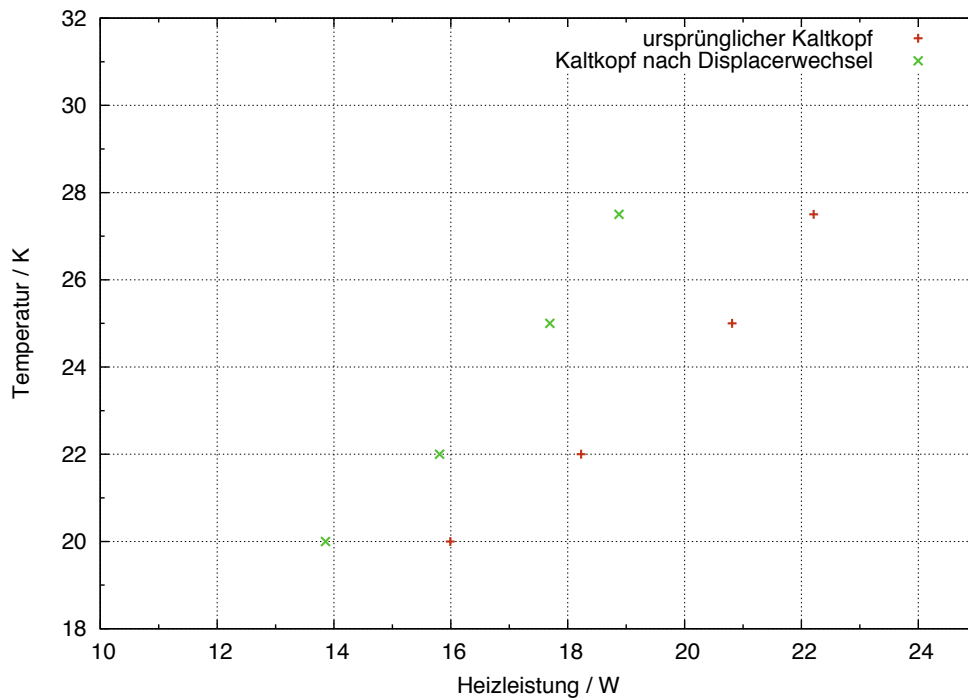


Abbildung 4.19.: Die Kühlleistung des Kaltkopfes nach einem Displaceraustausch (x) im Vergleich zur Kühlleistung des ursprünglichen Kaltkopfes (+) ist etwa 2 – 3 W kleiner. Die tiefste erreichbare Temperatur liegt mit dem derzeitigen Aufbau bei 12,2 K.

mit den vorherigen Leistungen möglich. Abbildung 4.19 zeigt die gemessenen Kühlleistungen des ursprünglichen und des Kaltkopfes nach einem Displacerwechsel. Zu erkennen ist eine Verringerung der Kühlleistung um etwa 2 – 3 W in Temperaturbereichen < 30 K. Wie bereits in Abschnitt 4.2.2 dargestellt, zeigen die Kaltköpfe bzw. Displacer ein herstellungsbedingtes, individuelles Verhalten [JL10]. Die Verringerung der Kühlleistung ist vermutlich auf den Displacerwechsel zurückzuführen.

Der vorläufige Funktionstest wurde erfolgreich abgeschlossen. Die tiefste erreichbare Temperatur beträgt bei dem jetzigen Aufbau etwa 12,2 K und ist ausreichend für den Einsatz beim \bar{P} ANDA-Experiment. Die Erfahrungen mit dem Cluster-Jet Target Prototypen haben gezeigt, dass trotz der Erhöhung der absoluten Wärmekapazität durch die Montage der Gasleitungen und der anliegenden Gaslast der Kaltkopf das Wasserstoffgas auf Temperaturbereiche abkühlen kann, die für die Erzeugung hoch dichter Clusterstrahlen notwendig sind.

Zukünftig wird der Aufbau des Kaltkopfes in der Stützvakuunkammer mit montierten Gasleitungen für den Einsatz am \bar{P} ANDA-Experiment erfolgen. Es folgen Leckage sowie Überdrucktests der Gasleitungen und im Anschluss die Aufnahme von Kühlkurven mit Gassystem und anliegender Gaslast.

5. Die Untersuchung des schrittmotorbetriebenen Justagesystems

Bei dem Durchströmen der Lavaldüse kondensiert ein kleiner Teil des Wasserstoffes zu Clustern. Durch den Skimmer wird dieser Teil vom Restgas separiert. Der Clusterstrahl erhält die entgültige Form und Größe im Anschluss durch den Kollimator. Untersuchungen des Clusterstrahls im Bereich zwischen der Lavaldüse und dem Skimmer haben ergeben, dass dieser dort im Betrieb mit flüssigem Wasserstoff hoch dichte Kernstrahlen aufweist [Köh10]. Da Veränderungen von Druck und Temperatur die Position der Kernstrahlen beeinflussen, ist eine Justagemöglichkeit des Clusterstrahls unumgänglich. Wie in Abschnitt 3.1 dargestellt wurde, ist die Stützvakuunkammer des Prototypen über ein Kugelgelenk mit der Skimmerkammer verbunden. Das Verkippen des Clusterstrahls in Bezug auf den Skimmer ermöglicht eine Extraktion der Kernstrahlen und somit eine Optimierung der Targetdichte am Wechselwirkungspunkt. Zur Verbesserung der Bewegungsgenauigkeit der Stützvakuunkammer wird das Kugelgelenk des \bar{P} ANDA Cluster-Jet Targets um ein schrittmotorbetriebenes Justagesystem erweitert. Die Stützvakuunkammer sowie das Kugelgelenk und dessen schrittmotorbetriebenes System wurden von Daniel Bonaventura konstruiert.

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit befasst sich mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme dieses Systems sowie insbesondere der Steuerung und Verfahrengenauigkeit. Für den zukünftigen Aufbau der Stützvakuunkammer mit montiertem Justagesystem folgt abschließend die Erörterung des mathematischen Zusammenhangs zwischen Schrittmotorenbewegung und Verkipfungswinkel der Kammer. Dadurch ist eine systematische Ermittlung der optimalen Ausrichtung der Stützvakuunkammer zum Skimmer möglich.

5.1. Der mechanische Aufbau des Justagesystems

Zur Veränderung des Winkels zwischen Stützvakuunkammer und Skimmer wird ein Kreuztisch über ein Kardangeln an das hintere Ende der Stützvakuunkammer bzw. am darin montierten Kaltkopf angebracht (siehe Abbildung 5.1). Der Kreuztisch kann über zwei Schrittmotoren in

der x-y-Ebene verfahren werden (radial zum Clusterstrahl). Durch das Kardangelenk und das Kugelgelenk wird diese zweidimensionale Bewegung in eine kreisförmige umgesetzt. Der Aufbau ist so konzipiert worden, dass der Drehpunkt genau bei dem engsten Querschnitt der Lavaldüse liegt. Abbildung 5.1 stellt die Clusterquelle und den daran montierten Kreuztisch dar.

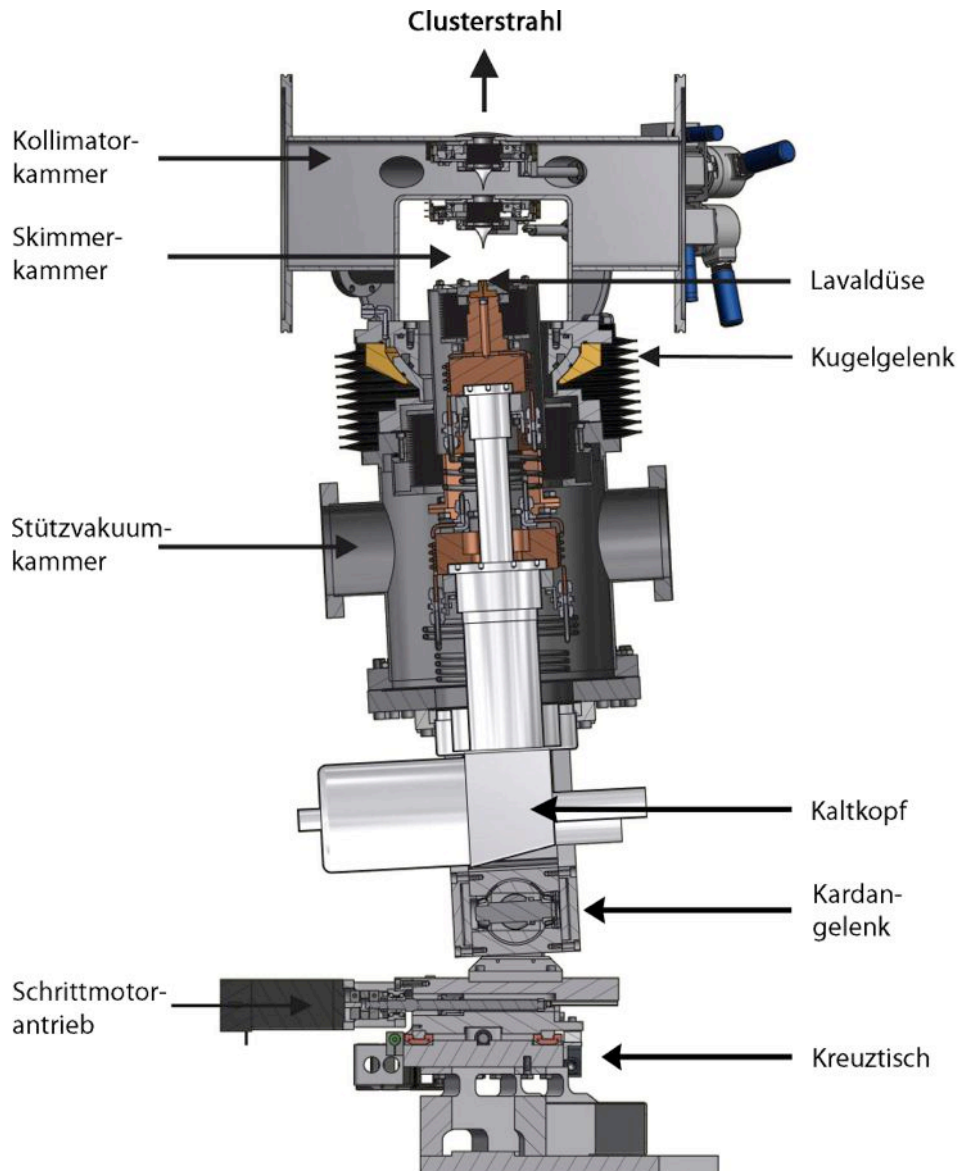


Abbildung 5.1.: Der zukünftige Aufbau der $\overline{\text{PANDA}}$ Clusterquelle. Die Verkippung der Stützvakuunkammer erfolgt über ein Kugelgelenk, das über ein schrittmotorbetriebenes Kreuztischsystem verfügt. Dieses System ist mit der Stützvakuunkammer bzw. mit dem darin montierten Kaltkopf über ein Kardangelenk verbunden [PAN12a]. Der Aufbau der Clusterquelle erfolgt derzeit parallel zum betriebenen Cluster-Jet Target Prototypen.

5.1 Der mechanische Aufbau des Justagesystems

Eine Fotografie des aufgebauten Kreuztisches und die CAD-Zeichnung ist in Abbildung 5.2 zu sehen. Die obere, flache Seite wird mit dem Montagerahmen der \bar{P} ANDA-Clusterquelle verbunden. An die Unterseite wird die Stützvakuummkammer bzw. der darin montierte Kaltkopf angebracht.

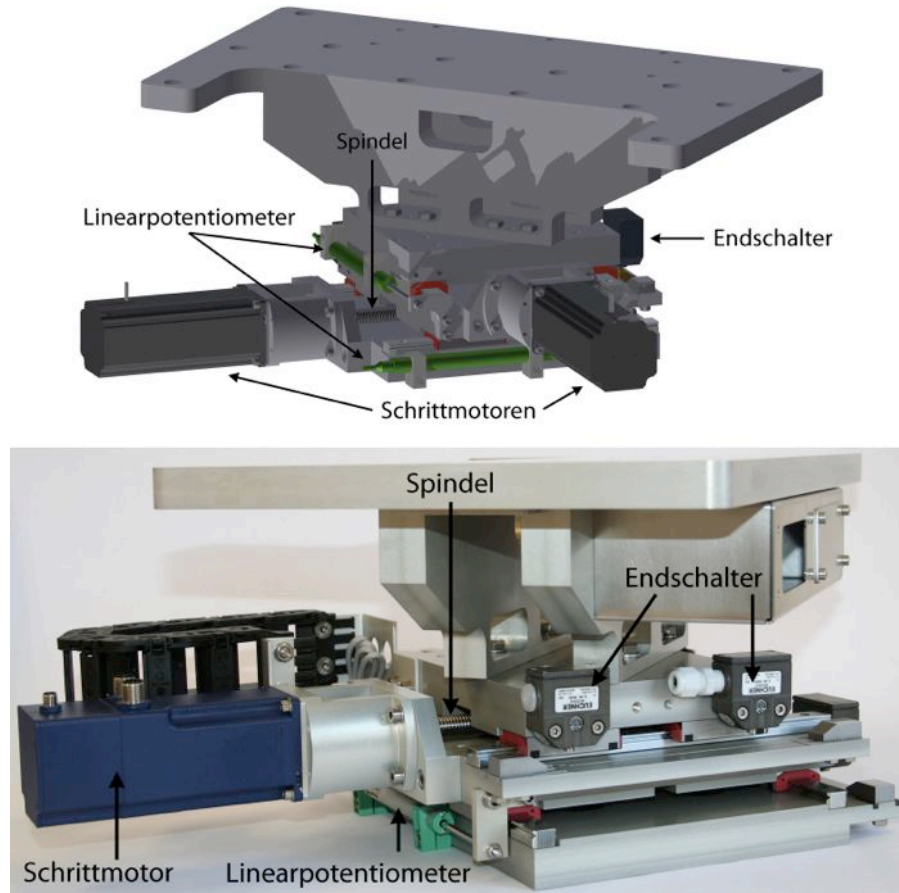


Abbildung 5.2.: Oben: CAD-Zeichnung des Kreuztisches.

Unten: Fotografie des aufgebauten Kreuztisches. Das Design und der Aufbau wurden von Daniel Bonaventura vorgenommen. Die Schrittmotoren treiben eine Spindel an, deren Drehbewegung in die Längsbewegung des Tisches umgesetzt wird. Linearpotentiometer geben neben den relativen Positionsangaben der Drehencoder die Absolutposition in x- und y-Richtung an. Die Endschalter unterbrechen die Motorstromversorgung im Falle der Überschreitung des höchst zulässigen Fahrweges.

Die Bewegung des Tisches erfolgt in x-y-Richtung. Der Antrieb wird von zwei Schrittmotoren übernommen. Bei ihnen handelt es sich um das Modell AS5918L4204-EB der Firma Nanotec. Diese Motoren zeichnet vor allem ihre kompakte Bauform sowie der bereits integrierte Encoder mit nachgeschalteter Nullstrom-Sicherheitsbremse aus. Der eingebaute Encoder hat eine Auflösung von

500 Inkrementen, was einer Winkelauflösung von $0,72^\circ$ je Inkrement entspricht. Die Bremse der Motoren ist stromlos geschlossen und das Haltemoment beträgt $1,98\text{ Nm}$, so dass eine Positionsänderung aufgrund der Masse der Stützvakuumkammer unterbunden wird. Bei einem Betrieb mit 4 A und 24 V parallel können laut Hersteller bei einer Drehzahl im Bereich von 200 bis 1000 min^{-1} Drehmomente von $0,5$ bis $1,5\text{ Nm}$ erreicht werden.

Die Motoren treiben je eine Kugelumlaufspindel mit einer Steigung von 2 mm an. Zusammen mit der Winkelauflösung der Drehencoder ergibt sich so eine theoretische Messauflösung von $4\text{ }\mu\text{m}$. Das Spiel zwischen Spindel und Gewindemutter ist minimal. Dafür kommt eine einteilige, nicht vorgespannte Mutter zum Einsatz. Ihr Axialspiel beträgt maximal $0,02\text{ mm}$, so dass die Spindel für den Einsatz an der PANDA-Clusterquelle geeignet ist.

Jede Spindel ist über je ein Flanschlager mit dem Kreuztisch verbunden. Diese vorgespannten doppelten Schrägkugellager (Lagerbezeichnung ZKLFA1050-2Z) stellen eine genaue axiale und radiale Lagerung der Spindeln sicher.

Die Kopplung zwischen Schrittmotor und Spindel erfolgt über eine Klauenkupplung mit Elastomerring (Modell Servomax-Elastomerkupplungen EK2 Serie 5 Ausführung A der Firma R+W Antriebselemente GmbH). Somit ist ein Axial- und Winkelfehlerausgleich sichergestellt. Die Kopplung erlaubt einen maximalen Winkelversatz von $0,9^\circ$ und eine maximale Verlagerung von $0,09\text{ mm}$ in radialer und ${}_{-0,5}^{+1,0}\text{ mm}$ in axialer Richtung. Die Klauenkupplung sorgt des Weiteren für eine leichte Demontage und bietet ein gutes Dämpfungsvermögen bei möglichen auftretenden Stößen während des Betriebs.

Nach der Umsetzung der Drehbewegung der Spindel in eine Längsbewegung des Tisches bewegt sich dieser auf Führungsschienen des Modells Minirail der Firma Schneeberger. Die verwendeten Schienen entsprechen der Genauigkeitsklasse G3 und Vorspannklasse V1. Die Ablaufgenauigkeit beträgt dabei weniger als $8\text{ }\mu\text{m}$ Toleranz bei 200 mm Schienenlänge. Bei der verwendeten Schienenlänge von 230 mm und einem Verfahrweg von $60,6\text{ mm}$ sind somit keine messbaren Abweichungen vorhanden. Die Führung des Tisches ist demnach als spielfrei anzunehmen. Aufgrund der verwendeten Kugelumlaufführung wird die Reibung zwischen Führungsschiene und verfahrbarem Tisch minimiert. Dies garantiert außerdem eine leichte und wartungsfreundliche Austauschbarkeit der Einzelteile im Falle eines Defektes.

Als zusätzliche absolute Positionsgeber sind in x- und y-Richtung Linearpotentiometer der Firma WayCon mit Klemmblöcken angebracht (Serie LZW1). Sie liefern als Signal einen Spannungswert. Dazu wird eine Spannung von 24 V DC an die Linearpotentiometer angelegt und über einen Schleifer ein Spannungswert proportional zur Position abgegriffen. Ihr Messbereich liegt zwischen 25 und 150 mm . Da sie ein analoges Signal liefern, ist ihre Auflösung unendlich. Die Linearität ist bis zu

$\pm 0,05\%$ gegeben. Ein Messwandler, ebenfalls von der Firma WayCon, wandelt das Spannungssignal in ein Stromsignal um. Auf diese Weise kann eine sehr hohe Störuneempfindlichkeit der absoluten Positionsbestimmung garantiert werden.

In beiden Fahrrichtungen sind am Anfang und Ende des Tisches Endschalter montiert. Da im Falle eines Überschreitens des zulässigen Fahrweges Schäden am Kreuztisch entstehen könnten, unterbinden die Endschalter bei Aktivierung weitere Motorbewegungen. Dies geschieht, indem die Aktivierung einen Stoppbefehl in der zugehörigen Software auslöst.

5.2. Die Elektronik und computergestützte Steuerung

Eine schematische Darstellung der elektrischen Verbindungen ist durch Abbildung 5.3 gegeben. Zu sehen ist lediglich der Aufbau für die Bewegung des Tisches in eine Richtung - für die zweite Bewegungsrichtung ist der Aufbau analog. Das zentrale Element stellt die Leistungsendstufe SMCI47-S der Firma Nanotec dar. Die Kommunikation der Endstufe mit dem Computer wird über eine RS-485 Schnittstelle und einem RS-485 zu USB Adapter ermöglicht. Ein 24 V DC Netzteil mit 10 A sorgt für die Stromversorgung der Endstufe. Der Schrittmotorstrom wird von der Endstufe reguliert. Die Bremse des Schrittmotors ist stromlos geschlossen. Die Signale des Schrittmotorencoders werden an die Endstufe übertragen.

Die vom Netzteil versorgten Endschalter sind an die Endstufe angeschlossen, so dass im Falle einer Aktivierung ein Signal an die Leistungsendstufe übertragen wird. Die Linearpotentiometer werden durch einen separaten Stromkreis ausgelesen. Ein externes Netzteil muss für den Betrieb der Messwandler Spannungen im Bereich zwischen 9 und 36 V liefern. Damit wird eine Potentialdifferenz zwischen den Punkten Poti + und Poti - aufgebaut. Ein Schleifer greift die Spannung ab. Diese wird von dem Messwandler in einen Strom zwischen 4 und 20 mA umgewandelt, der über ein angeschlossenes Strommessgerät ausgelesen wird und proportional zum Positionswert ist.

An dem Kreuztisch befindet sich ein 72-poliger Stecker, über den sämtliche Verbindungen nach außen laufen. Die Kabel für den Schrittmotorstrom sind geschirmt. Die Erdungen der Schirmungen sowie die Erdungen der Lineargeber laufen über den 72-poligen Stecker zusammen und werden mit dem Netzgerät der Endstufen verbunden. Eine tabellarische Aufzählung aller Verbindungen am 72-poligen Stecker ist im Anhang einzusehen (Abbildung A.1).

Erste Messungen haben gezeigt, dass die Verwendung von nur einem Netzteil für beide Stromkreisläufe einen entscheidenden Nachteil hat: Die hochfrequenten Anteile des Schrittmotorstroms haben großen Einfluss auf den vom Strommessgerät angezeigten Wert, so dass keine präzise

Positionsbestimmung möglich ist. Die Verwendung zweier unabhängiger Netzteile ist deshalb unumgänglich.

Über eine RS-485-zu-USB-Verbindung können beide Leistungsendstufen SMCI47-S mit dem Computer kommunizieren. Die Steuerung wird im Folgenden über die vom Hersteller Nanotec zur Verfügung gestellte Software „NanoPro“ in der Version 1.70 erfolgen. Jede vorgenommene Einstellung in der Software wird zunächst auf der Endstufe gespeichert, um dann von dieser an die Schrittmotoren weiter gegeben zu werden.

Die Software stellt verschiedene Betriebsarten zur Verfügung. Die Schrittmotoren können auf eine vorgegebene Absolutposition fahren oder eine Relativbewegung durchführen. Ebenfalls ist der Drehzahlbetrieb mit konstanter Geschwindigkeit möglich. Die Phasenströme, im Betrieb und im Stillstand, können eingestellt werden und betragen bei den folgenden Messungen 1,5 A und 1,87 A. Als Betriebsmodi sind vom Vollschritt bis zum 64tel-Schritt alle Unterteilungen einstellbar. Der adaptive Mikroschritt (bis zum 128tel-Schritt) wird bei vielen Messungen genutzt werden, da die Schrittgröße sich der Drehgeschwindigkeit anpasst und damit die größte Positionsgenauigkeit zu erwarten ist. Auf die weiteren verwendeten Einstellungen wird vor der Darstellung der jeweiligen Messung eingegangen.

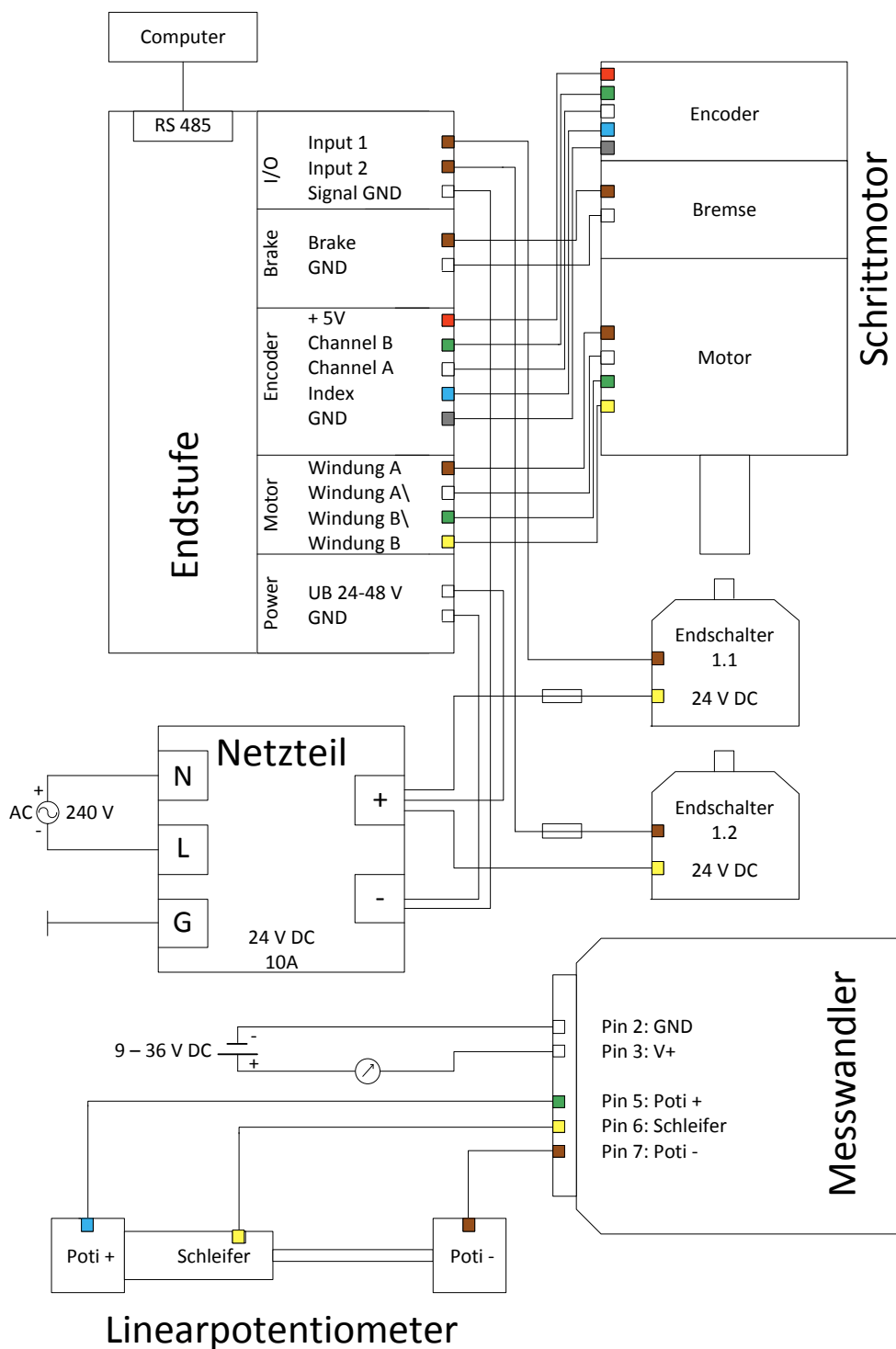


Abbildung 5.3.: Schematische Darstellung der elektronischen Verbindungen am Kreuztisch.

5.3. Räumliche Auflösung und Verfahrengenauigkeit des Kreuztisches

In Zukunft wird die Stützvakuunkammer durch den Kreuztisch so bewegt werden, dass eine systematische Analyse und die exakte Positionierung des Targetstrahls bezüglich des Punktes seiner maximalen Dichte möglich ist. Dafür ist die genaue Kenntnis der räumlichen Auflösung des Kreuztisches sowie der Verfahrengenauigkeit notwendig. Das Verfahren des Kreuztisches sollte dabei eine Verkippung des Clusterstrahls mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1^\circ$ ermöglichen. Dieser Abschnitt stellt die Messungen und Ergebnisse vor, die im Betrieb mit einem der beiden Schrittmotoren durchgeführt wurden.

5.3.1. Erste Abschätzung der räumlichen Auflösung

Zur ersten Einschätzung der erreichbaren Auflösung wird eine möglichst große Strecke mit dem Kreuztisch gefahren und die Änderung des angezeigten Stromwertes aufgezeichnet. Diese ist wie bereits beschrieben direkt proportional zur Positionsänderung. Im verwendeten Messbereich ($4 - 20 \text{ mA}$) beträgt die Auflösung des Strommessgeräts $1 \mu\text{A}$.

Der Kreuztisch wird durch manuelle Drehung der Spindel von einem Endschalter zum anderen verfahren und die Anzahl der Umdrehungen gezählt. Die $(21,25 \pm 0,25)$ Umdrehungen entsprechen bei einer Spindelsteigung von 2 mm einer Positionsänderung um $(42,5 \pm 0,5) \text{ mm}$. Dabei ändert sich der angezeigte Stromwert um $(6848 \pm 1) \mu\text{A}$. Die erreichbare Auflösung liegt demnach bei $(6,206 \pm 0,073) \mu\text{m}$ und es gilt

$$1 \mu\text{A} \hat{=} (6,206 \pm 0,073) \mu\text{m}.$$

Da ein Vollschritt des Schrittmotors einer Drehung von $1,8^\circ$ entspricht, werden 200 Vollschritte für eine Umdrehung um 360° benötigt. Mit einer Spindelsteigung von 2 mm ergibt sich für den Fahrweg von $(42,5 \pm 0,5) \text{ mm}$ eine Schrittzahl von (4250 ± 50) . Damit ist der folgende Zusammenhang gegeben:

$$1 \text{ Vollschritt} \hat{=} (1,611 \pm 0,019) \mu\text{A} \hat{=} 10 \mu\text{m}.$$

Im Vollschrittbetrieb liegt die erreichbare Auflösung demnach bei $10 \mu\text{m}$. Durch kleinere Schrittweiten kann die Auflösung bis zur Auslesegenauigkeit des Strommessgeräts, die etwa $6,2 \mu\text{m}$ entspricht, gesteigert werden.

5.3.2. Messung der Positionsgenauigkeit

Durch die folgende systematische Messreihe wird die Genauigkeit der Positionsbestimmung ermittelt. Von einer frei gewählten Startposition wird der Kreuztisch in vielen kleinen Intervallen der gleichen Schrittzahl in eine Richtung um insgesamt 9 Umdrehungen verfahren. Dies entspricht einem Fahrweg von $18000\ \mu\text{m}$ und deckt einen weiten Bereich des gesamt möglichen Fahrwegs ab. Parallel dazu wird für jedes Intervall die Stromänderung der Linearpotentiometer gemessen, die direkt proportional zur Positionsänderung ist. Diese sollte im Idealfall konstant sein. In der Realität treten geringe Abweichungen auf. Diese weisen weniger auf geringe Ungleichmäßigkeiten in der Spindelsteigung hin, sondern resultieren vielmehr aus der Positionsgenauigkeit der Messelektronik. Der Kreuztisch wird für diese Untersuchung im 64tel-Schrittmodus jeweils in Intervallen von 200 Mikroschritten verfahren. Im Vergleich zum adaptiven Mikroschritt bleibt beim 64tel-Schritt die Schrittzahl pro Umdrehung konstant und bietet dabei die höchst mögliche Genauigkeit, während beim adaptiven Mikroschritt die Schrittzahl an die Geschwindigkeit angepasst wird. Eine Umdrehung im 64tel-Schrittmodus entspricht 12800 Mikroschritten, so dass für 9 Umdrehungen 576 Messwerte erhoben werden. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Schrittmotoren bewegen, beträgt $100\ \text{Mikroschritte/s}$.

Zunächst wird der Zusammenhang zwischen der absoluten Stromstärke und der Schrittzahl dargestellt. Dieser ist in Abbildung 5.4 zu sehen. Da aufgrund der Ablesegenauigkeit des Strommessgeräts der tatsächliche Stromwert gleichverteilt in einem $1\ \mu\text{A}$ breiten Intervall von dem Messwert vorkommt, beträgt die Unsicherheit jedes Messwertes $1/\sqrt{12}\ \mu\text{A}$. Ein linearer Fit durch die Messwerte mit Steigung m ergibt ein vergleichsweise großes reduziertes Chi-Quadrat von 41,07.

Um den Grund für das hohe reduzierte Chi-Quadrat besser erfassen zu können, wurden die Differenzen zwischen dem tatsächlichen Messwert und der Fitgeraden gebildet. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Wie zu erkennen ist, liegen deutlich weniger als $68,27\% (\pm 1\sigma)$ der Residuen im Rahmen ihrer Unsicherheiten bei Null, so dass die durch die Ablesegenauigkeit des Strommessgeräts gegebene Unsicherheit von $1/\sqrt{12}\ \mu\text{A}$ alleine nicht zur Beschreibung der Messwerte ausreicht. Aufgrund der Verteilung der Residuen ist keine Fitfunktion erkennbar, die das Verhalten der Messwerte treffender beschreibt, als der angewandte lineare Fit. Weitere Unsicherheiten der Messwerte ergeben sich demnach durch das Positionsmesssystem, vermutlich vor allem durch das Linearpotentiometer und den Messwandler. Zur Bestimmung der Unsicherheit der Parameter der angefiteten Geraden wurde daher die bisherige Unsicherheit von $1/\sqrt{12}\ \mu\text{A}$ mit der Wurzel aus dem reduzierten Chi-Quadrat skaliert und mit der so erhaltenen Unsicherheit von etwa $1,852\ \mu\text{A}$ ein neuer Fit durchgeführt. Die Geradensteigung ergibt sich dann zu

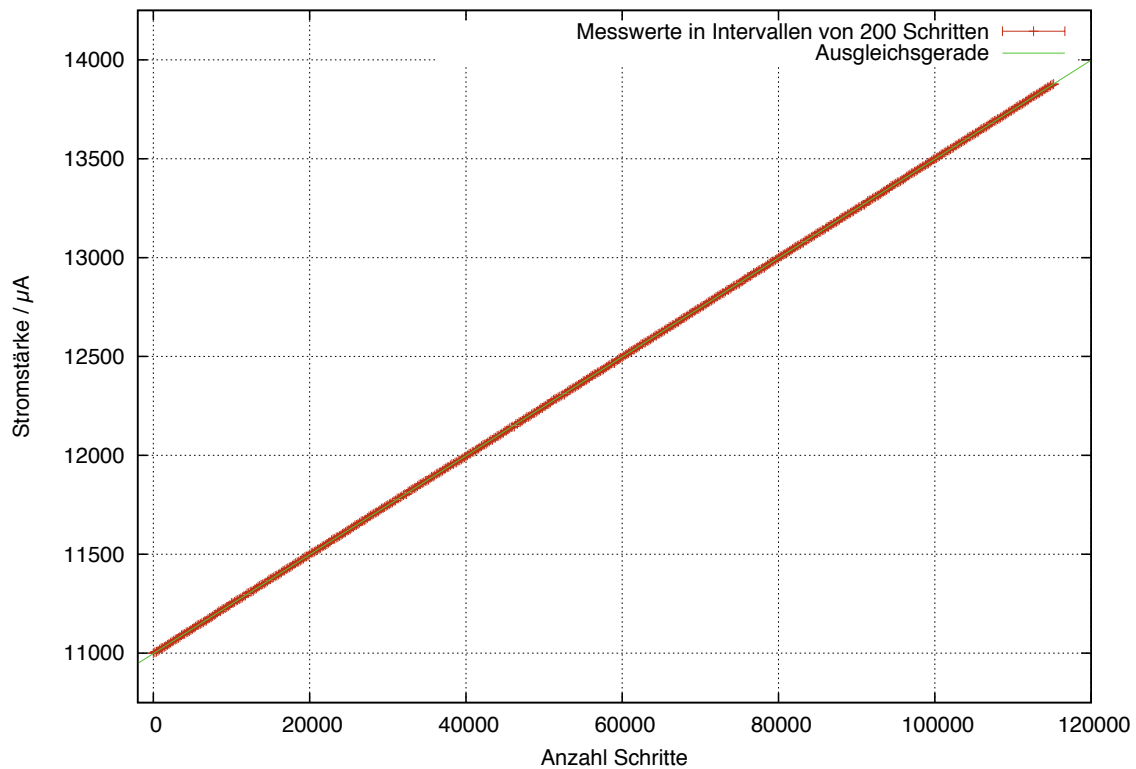


Abbildung 5.4.: Die grafische Darstellung der absoluten Stromwerte gegen die verfahrenen Schritte lässt deutlich einen linearen Zusammenhang erkennen.

$$m = (2,50045 \pm 0,00023) \times 10^{-2} \mu\text{A}/\text{Schritt}.$$

Da der Verfahrenweg von 18 mm verhältnismäßig groß ist und die Abweichungen von der Spindelsteigung von 2 mm laut Hersteller maximal $\pm 0,05 \text{ mm}/300 \text{ mm}$ betragen, rechtfertigt dies die Annahme, dass die Spindelsteigung als exakt angenommen wird. Durch die Ermittlung der Steigung m ist mit dieser Messung eine präzise Angabe der Auflösung möglich. Um die Stromänderung eines Vollschrilles zu ermitteln, wird m mit 64 multipliziert. Somit kann der Umrechnungsfaktor zwischen Strom- und Positionswert ermittelt werden:

$$1 \text{ Vollschrift} \hat{=} (1,60029 \pm 0,00015) \mu\text{A} \hat{=} 10 \mu\text{m}.$$

Im Vergleich zur vorherigen Bestimmung der Auflösung stellt diese Messung die genauere dar. Der zuvor ermittelte Wert zur Umrechnung der Strom- in Positionswerte stimmt im Rahmen der Unsicherheiten mit diesen Ergebnissen überein. Auf die ermittelten Faktoren zur Umrechnung von Strom- zu Positionswerten wird bei den folgenden Untersuchungen zurückgegriffen.

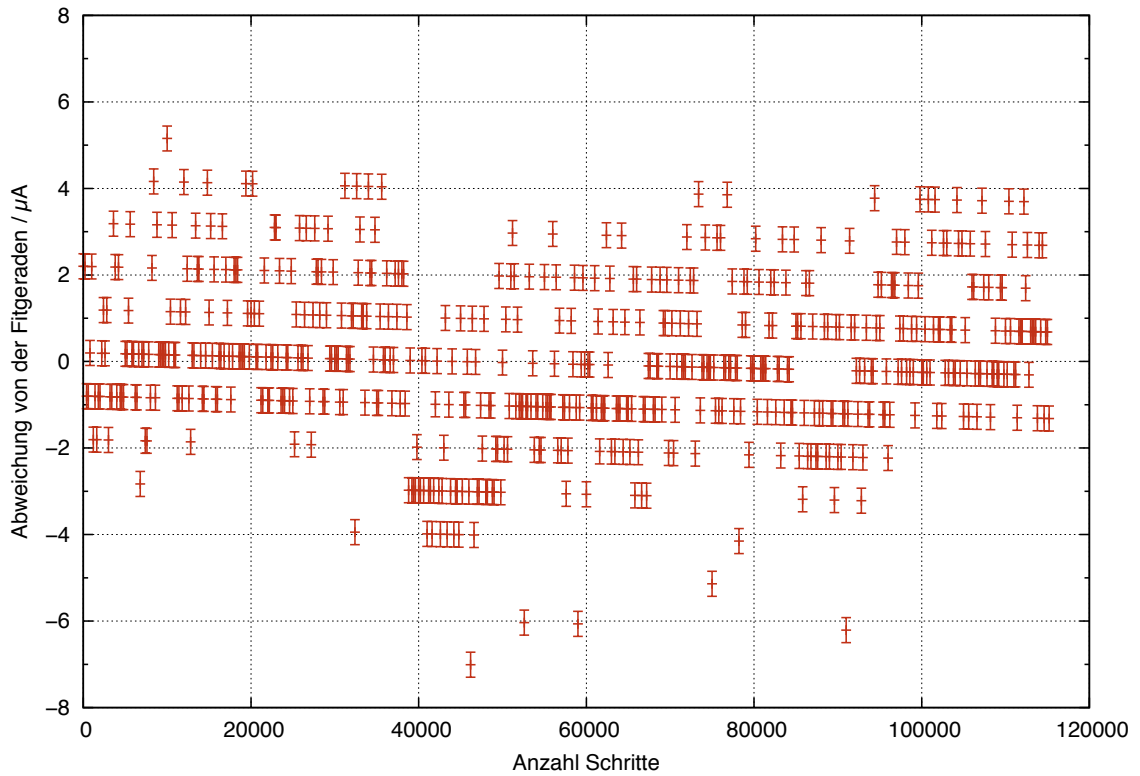


Abbildung 5.5.: Die Schwankungen um die Fitgerade variieren abhängig von der gefahrenen Schrittzahl, entsprechend von der Position des Kreuztisches.

Für die folgende Auswertung der Positionsgenauigkeit ist die Definition zweier Größen zweckmäßig:

X_{soll} stellt die Soll-Position des Kreuztisches dar, gemessen an der vorgegebenen Schrittzahl N .

Die Umrechnung von Schritte auf μm erfolgt durch den Faktor $2000 \mu\text{m}/12800$ Schritte. Im Falle von 64tel-Schritten, entsprechen 200 Schritte einem Soll-Verfahrweg von $31,25 \mu\text{m}$.

$$X_{\text{soll}} = N \cdot \frac{2000 \mu\text{m}}{12800 \text{ Schritte}} \quad (5.1)$$

ΔX_{ist} stellt die Änderung der Ist-Position des Kreuztisches bei einem Verfahrweg von 200 Schritten dar, gemessen durch die Änderung des ausgegebenen Stromwerts ΔI des Linearpotentiometers. Die Umrechnung von der Änderung des Stromwertes auf μm erfolgt, indem zunächst die Stromwerte durch die Steigung m der Ausgleichsgeraden dividiert und anschließend mit dem Faktor $2000 \mu\text{m}/12800$ Schritte multipliziert werden.

$$\Delta X_{\text{ist}} = \frac{\Delta I}{m} \cdot \frac{2000 \mu\text{m}}{12800 \text{ Schritte}} \quad (5.2)$$

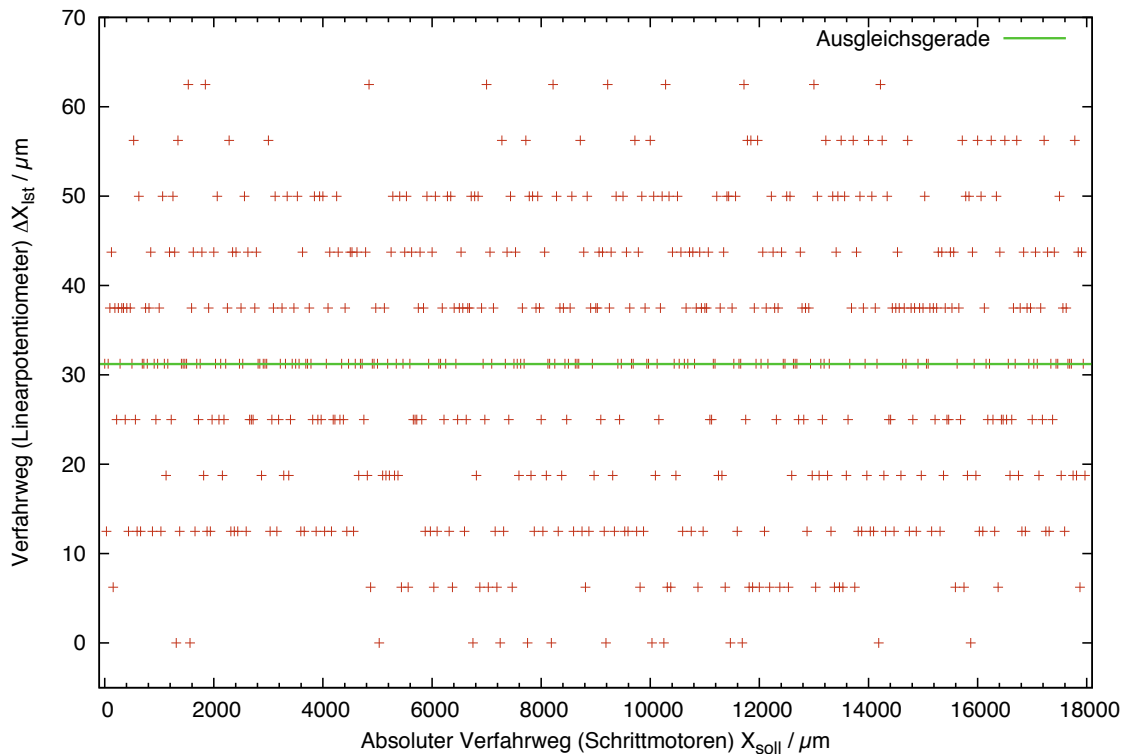


Abbildung 5.6.: Der Zusammenhang zwischen ΔX_{ist} und X_{soll} . Bei einer Drehung des Motors um 200 Schritte wird der tatsächliche Verfahrensweg von 0 – 18000 μm gemessen und in Bezug gesetzt zu dem theoretischen von 31,25 μm .

Im Idealfall beträgt ΔX_{ist} immer 31,25 μm . Der in Abbildung 5.6 dargestellte Zusammenhang zwischen ΔX_{ist} und X_{soll} zeigt, dass sich der Kreuztisch trotz eines erwarteten Verfahrensweges von 31,25 μm bei 200 Schritten laut Positionsanzeige nicht immer um diese Entfernung bewegt hat. Durch einen linearen Fit wurde der Mittelwert von $(31,21 \pm 0,62)$ μm bestimmt. Die Standardabweichung beträgt $(14,94 \pm 0,62)$ μm und ist ein Maß für die Genauigkeit der absoluten Position.

Abbildung 5.7 zeigt zur besseren Veranschaulichung der Messwerte ein entsprechendes Histogramm. Wie zu erkennen ist, liegen die meisten Messwerte im Bereich von 5 μA , entsprechend 31,25 μm . Da das Histogramm eine leichte Asymmetrie mit stärkerer Ausprägung der Verteilung links vom Maximum aufweist, liegt der tatsächliche Mittelwert wie erwähnt etwas unterhalb bei $(31,21 \pm 0,62)$ μm .

Die Messergebnisse liefern eine im Verhältnis zum Mittelwert relativ große Standardabweichung. Da laut Hersteller die Spindelsteigung mit $2 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}/300 \text{ mm}$ als exakt angenommen werden kann, gehen die Abweichungen vermutlich auf die verwendete Messtechnik zurück. Diese Messung hat ergeben, dass für die verwendeten Einstellungen die Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von

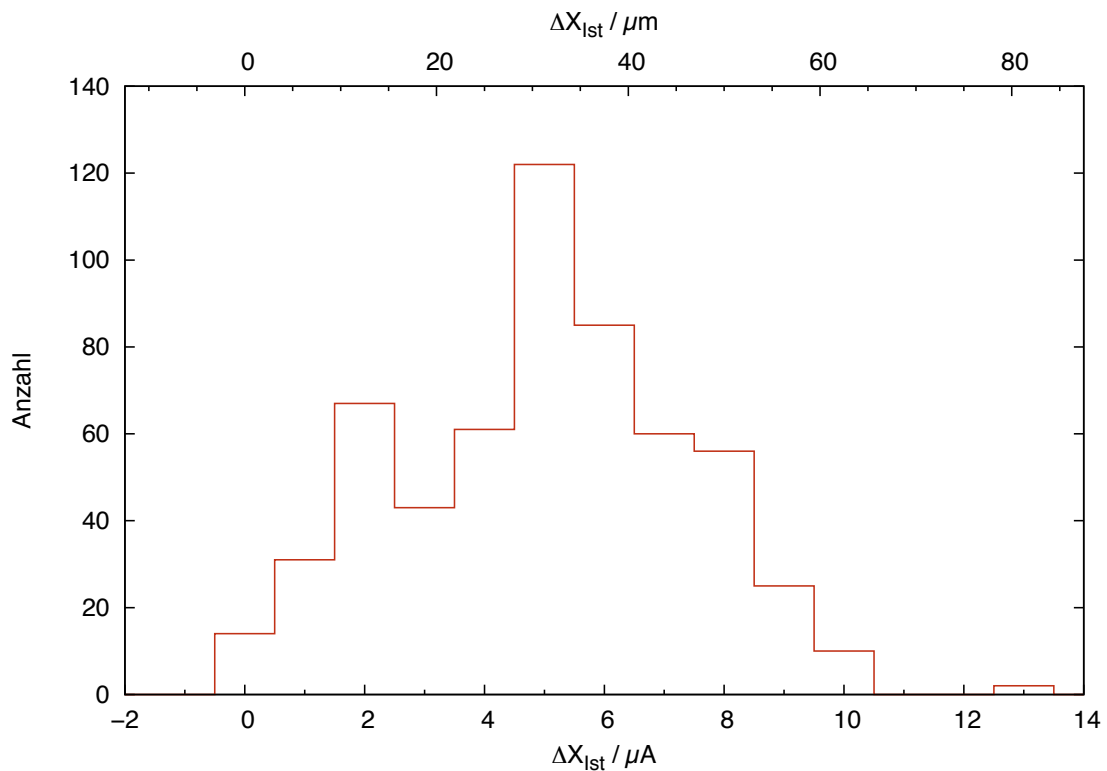


Abbildung 5.7.: Das Histogramm stellt die Häufigkeit dar, mit der sich der Kreuztisch um eine entsprechende Strecke bewegt hat, bei einer festen Schrittzahl der Motoren von 200.

$\pm 15 \mu\text{m}$ möglich ist. Weitere Messungen mit anderen Einstellungen (z.B. Intervalle der Schrittweite 400) werden Aufschluss darüber liefern, ob diese Genauigkeit allgemein gültig ist und folgen zukünftig.

Des Weiteren wurde in diesem Abschnitt eine Methode entwickelt und dargestellt, die eine präzise Umrechnung von vorgegebenen Schritten über angezeigtem Stromwert zum tatsächlichen Verfahrensweg möglich macht.

5.3.3. Messungen zur Positionsreproduzierbarkeit

Um mit den Schrittmotoren in Zukunft systematisch die Ausrichtung der Stützvakuunkammer zu finden, bei der der Clusterstrahl am Wechselwirkungspunkt eine maximale Dichte aufweist, wird sich der Kreuztisch viele Male entlang seiner Achsen bewegen. Dabei muss sichergestellt sein, dass der tatsächlich Verfahrensweg des Kreuztisches auch den vorgegebenen Schritten des Motors entspricht. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt Untersuchungen zur Erreichbarkeit einer vorgegebenen Position durchgeführt und auf die Reproduzierbarkeit geachtet.

Diese gliedern sich aufgrund unterschiedlicher Untersuchungsverfahren in zwei Messreihen: Einerseits wird der Kreuztisch von einer gewählten Startposition aus bis zu einem Endpunkt verfahren (Verfahrmodus: punktgenau). Diese Messung wird mehrmals wiederholt und die Start- und Endpositionen mittels der Linearpotentiometer ermittelt. Andererseits wird der Kreuztisch von einer gewählten Startposition aus bis zu einer Mittelstellung verfahren und nach der dortigen Positionserfassung weiter über den Mittelpunkt hinaus bis zur Endposition bewegt, um anschließend erneut von der anderen Richtung aus kommend den Mittelpunkt zu erreichen (Verfahrmodus: Punkt überfahren). Diese Kontrollmessung gibt Aufschluss darüber, ob Positionsabweichungen bestehen, wenn eine vorgeschriebene Position von verschiedenen Richtungen angesteuert wird.

Verfahrmodus: punktgenau

Die Startposition wird so gewählt, dass der Tisch in seiner Mittelstellung steht. Dies entspricht nach der Auslese der Linearpotentiometer einem Stromwert von $11000 \mu\text{m}$. In dem Betriebsmodus „adaptiver Mikroschritt“ wird der Kreuztisch mit einer Geschwindigkeit von 20 Schritte/s von der Startposition aus 5 Umdrehungen (10 mm) auf den Endpunkt gefahren. Dies wird 25 mal wiederholt und die jeweilige Start- und Endposition als Stromwert erfasst. Die automatisierte Messung mit definierten Wartezeiten an den Start- und Endpunkten dauerte etwa 6300 Sekunden $\hat{=} 105 \text{ min}$. Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 5.8 zu sehen. Aufgetragen ist der Stromwert (direkt proportional zu einem Positionswert) für 25 Messungen der Start- und Endposition. Der Kreuztisch wurde zwischen den einzelnen Messungen um 10 mm, entsprechend 5 Umdrehungen des Schrittmotors, verschoben. Die Unsicherheit des Stromwertes beträgt dabei $\pm 1/\sqrt{12} \mu\text{A}$. Die diskreten Abstände der Stromwerte von $1 \mu\text{A}$ resultieren aus der Anzeigegenauigkeit des Strommessgeräts.

Die Strommesswerte zeigen ein sinkendes Verhalten um etwa $4 - 5 \mu\text{A}$ innerhalb der Messdauer von etwa 6300 Sekunden. Dies könnte durch eine tatsächliche Positionsänderung des Kreuztisches begründet werden. Um allerdings zu kontrollieren, ob das Positionsmesssystem Auffälligkeiten aufzeigt, wurden diesbezüglich Untersuchungen durchgeführt, die an dieser Stelle eingeschoben werden.

Zeitliches Verhalten des Positionsmesssystems

Eine Zwischenmessung des Verhaltens des Positionsmesssystems soll an dieser Stelle Klarheit darüber liefern, ob sich bei der obigen (punktgenauen) Messungen tatsächlich die Position des Kreuztisches geändert hat. Dazu wird der gesamte elektronische Aufbau, bestehend aus Leistungsendstufe, Schrittmotor und dem Stromkreislauf des Linearpotentiometers bestromt, um den normalen

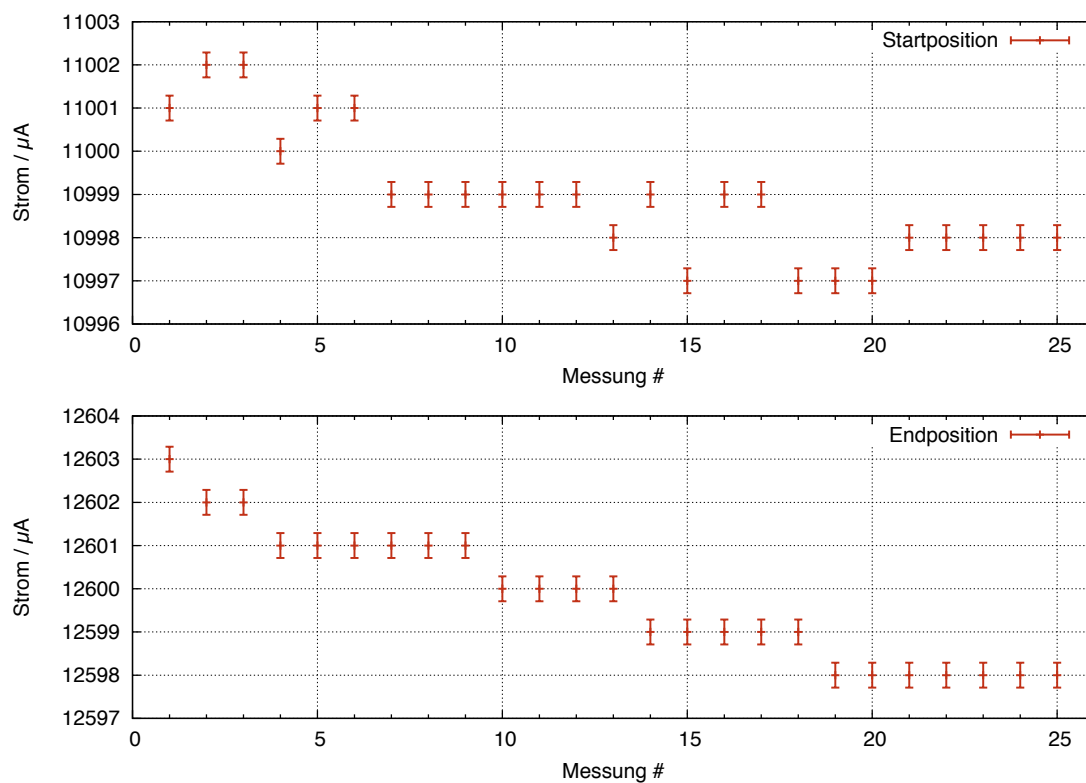


Abbildung 5.8.: Die Stromwerte (proportional zur Position) sind 25 mal jeweils nach dem Verfahren des Tisches an der Startposition (oben) und Endposition (unten) gemessen worden.

Betriebseinstellungen möglichst nahe zu kommen. Um sicher zu stellen, dass der Motor auch im (bestromten) Stillstand nicht minimal die Spindel antreibt, wird dieser vom Kreuztisch abmontiert. Die Werte des Strommessgeräts werden über 6 Stunden aufgezeichnet und auf das zeitliche Verhalten der Werte geachtet.

Abbildung 5.9 zeigt ein deutliches Ergebnis: Die vom Strommessgerät angezeigten Stromwerte sinken mit der Zeit, wobei anfänglich eine große Änderung zu erkennen ist, die bei fortschreitender Zeit langsam abnimmt. Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten könnte die Erwärmung einzelner Komponenten im Positionmesssystem nach dem Einschalten sein. Da in einer vorherigen Messung nur das Strommessgerät und die Leistungsendstufen bestromt wurden, die Schrittmotoren jedoch vom Stromkreislauf getrennt waren und der Stromwert bei dieser Messung nicht gesunken ist, kann eine Stromanzeigeänderung aufgrund von Erwärmung jedoch ausgeschlossen werden. Der Schluss liegt nahe, dass die Schrittmotoren Einfluss auf das Positionsmesssystem haben. Auch wenn die Stromkreisläufe der Schrittmotoren und des Positionmesssystems voneinander getrennt sind, kann aufgrund nahe beieinander liegender Kabel eine Induktion der Phase des Schrittmotorstroms auf den Kreislauf des Messsystems nicht ausgeschlossen werden.

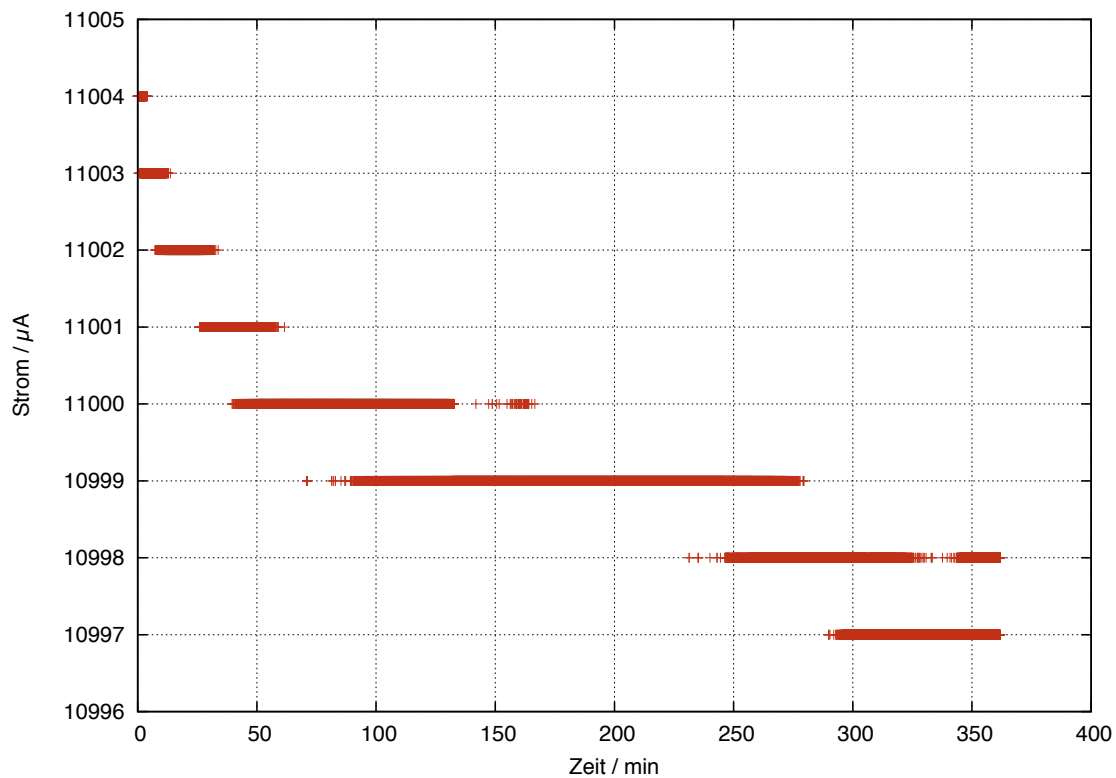


Abbildung 5.9.: Die vom Strommessgerät angezeigten Werte fallen im Laufe der Zeit ab.

Aus Abbildung 5.9 ist ersichtlich, dass nach 6300 Sekunden (105 Minuten) der anfängliche Stromwert von $11004 \mu\text{A}$ um $4 - 5 \mu\text{A}$ gefallen ist. Diese Zeit und diese Stromänderung stimmen mit dem in Abbildung 5.8 zu sehenden Verhalten überein. Somit ist für die sinkenden Stromwerte in Abbildung 5.8 vermutlich nicht eine Positionsänderung des Kreuztisches verantwortlich, sondern das Verhalten des Positionsmesssystems. Die Messkurve des Positionsmesssystems aus Abbildung 5.9 kann als Korrektur für die Messungen zur Positionsreproduzierbarkeit genutzt werden, da alle Messungen zeitnah nach Einschalten der Elektronik begonnen wurden. Somit ist die Annahme sinnvoll, dass das zeitliche Verhalten aller Messkurven ähnlich ist.

Angewandte Korrektur beim Verfahrensmodus: punktgenau

Die Bestimmung der Start- und Endpositionen der in Abbildung 5.8 zu sehenden Messergebnisse erfolgte in Abständen von 255 Sekunden. Die Messkurve des Strommessgeräts wird diesbezüglich ausgewertet und als Korrekturfunktion verwendet, indem die Abweichung zum ursprünglichen Wert alle 255 Sekunden ermittelt und von den Messwerten der Start- und Endpositionen abgezogen wird. Die aus Abbildung 5.9 ermittelte Korrekturfunktion ist im Anhang (Abbildung A.2) einzusehen. Abbildung 5.10 stellt die korrigierten Messwerte von Abbildung 5.8 dar. Wie zu erkennen ist, bleiben

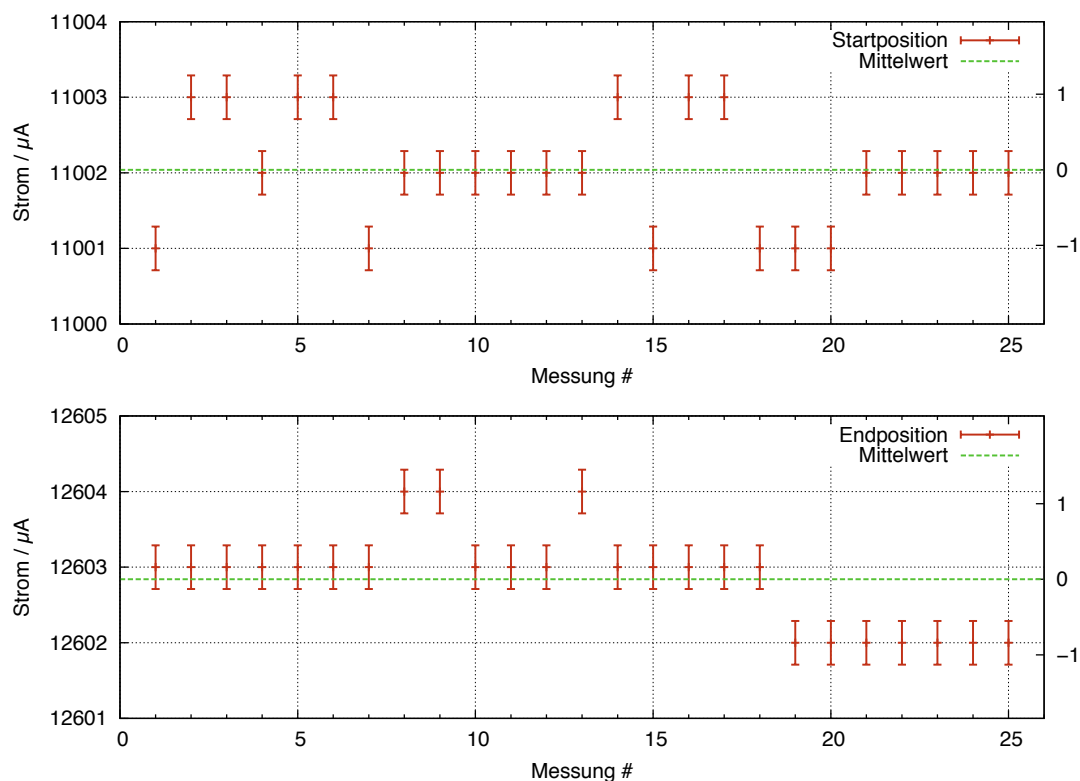


Abbildung 5.10.: Korrigierte Messwerte beim Fahrmodus: punktgenau. 25 mal wurde der Kreuztisch zwischen Startposition (oben) und Endposition (unten) jeweils um 5 Umdrehungen der Schrittmotoren verfahren.

alle korrigierten Messwerte im Rahmen der Unsicherheit konstant auf einem Stromwert. Durch einen linearen Fit wurden die Standardabweichung (1σ) der Messwerte ermittelt. Für die Messung der Startpositionen beträgt diese $(0,73 \pm 0,15) \mu\text{A} \hat{=} (4,56 \pm 0,93) \mu\text{m}$, bei der Endpositionsbestimmung liegt sie bei $(0,62 \pm 0,13) \mu\text{A} \hat{=} (3,88 \pm 0,81) \mu\text{m}$. Dieses Messergebnis stellt dar, dass die Abweichung von den ursprünglichen Start- und Endpositionen auch nach mehrmaligem Verfahren äußerst gering ist.

Verfahrmodus: Punkt überfahren

Bei dieser Untersuchung befindet sich der Kreuztisch zunächst in der Mittelstellung bei $11000 \mu\text{A}$. Da sich der Kreuztisch von dieser Position aus entsprechend 5 Umdrehungen der Schrittmotoren in positive und negative Richtung verschieben wird, stellt diese Mittelposition den Punkt dar, der von beiden Richtungen angesteuert wird. Die End- und die Startposition befinden sich jeweils 10 mm von der Mittelposition entfernt.

Entsprechend der Messung im Fahrmodus „punktgenau“ weisen die Messwerte ebenfalls ein

zeitlich abnehmendes Verhalten auf und werden analog zur vorherigen Untersuchung korrigiert. Die Verteilung der korrigierten Strommesswerte ist in Abbildung 5.11 zu sehen.

Eingezeichnet sind ebenfalls die Ergebnisse des linearen Fits. Die Mittelwerte und Standardabweichungen dienen als Maß für die Genauigkeit der Positionsreproduzierbarkeit und werden tabellarisch aufgeführt:

	Mittelwert	Standardabweichung	
	/ μA	/ μA	/ μm
Startposition	$9394,12 \pm 0,09$	$0,45 \pm 0,06$	$2,81 \pm 0,38$
Mittelposition Aufsteigend	$11000,50 \pm 0,32$	$1,56 \pm 0,42$	$9,75 \pm 2,63$
Mittelposition Absteigend	$10998,70 \pm 0,15$	$0,75 \pm 0,11$	$4,69 \pm 0,69$
Endposition	$12603,80 \pm 0,35$	$1,69 \pm 0,25$	$10,56 \pm 1,56$

Tabelle 5.1.: Mittelwerte und Standardabweichungen der Messungen zur Positionsreproduzierbarkeit.

Die Positionsreproduzierbarkeit ist vor allem bei der Startposition sehr exakt. Die Messwerte der Endposition streuen ein wenig stärker um den Mittelwert, ein Trend ist jedoch nicht erkennbar. Die Messwerte der Mittelposition geben Aufschluss darüber, wie präzise die Positionsreproduzierbarkeit im Fall der Ansteuerung eines Punktes von zwei verschiedenen Richtungen aus ist. Wie Abbildung 5.11 zeigt, unterscheiden sich deren Mittelwerte um etwa $1,8 \mu\text{A} \hat{=} 11,25 \mu\text{m}$. Dabei ist zu beobachten, dass der Kreuztisch für beide Bewegungsrichtungen minimal hinter der tatsächlichen Mittelposition zu stehen kommt: im Fall von einer Bewegung in positive Richtung sind die Messwerte höher als bei einer Bewegung in negative Richtung.

Die Standardabweichungen der Messwerte liegen im Bereich von etwa $< 1,7 \mu\text{A}$. $1 \mu\text{A}$ entspricht einer Positionsgenauigkeit von $6,25 \mu\text{m}$. Die im folgenden Abschnitt mathematische Behandlung der Verkippung der Clusterstrahls stellt Formeln zur Verfügung, mit denen die Umrechnung eines Verkippungswinkels in den dafür notwendigen Verfahrensweg möglich ist. Diesbezüglich wird die ermittelte Positionsgenauigkeit von $< 10,63 \mu\text{m}$ diskutiert.

Die Untersuchungen des ersten Schrittmotors und des Kreuztisches in einer Richtung sind erfolgreich durchgeführt und abgeschlossen worden. Bei der gleichzeitigen Inbetriebnahme beider Schrittmotoren fiel auf, dass diese den Stromkreis der Linearpotentiometer und des Strommessgeräts in der Art beeinflusst haben, dass eine präzise Positionsbestimmung aufgrund schwankender Stromwerte nicht möglich war.

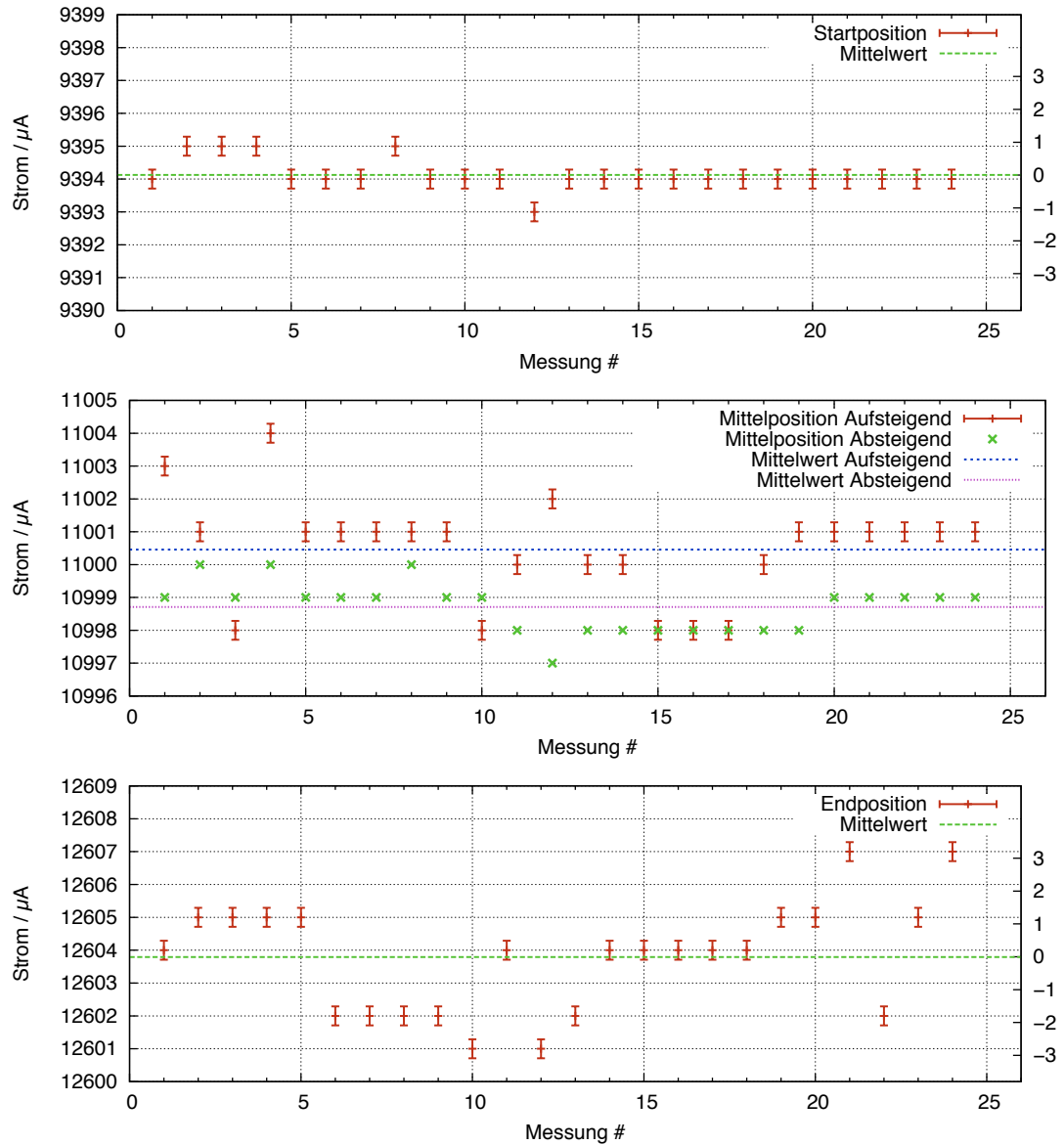


Abbildung 5.11.: Korrigierte Messwerte beim Verfahrenmodus: Punkt überfahren. Die Startposition (oben) und Endposition (unten) sind dargestellt. Die mittlere Abbildung unterscheidet zwischen Messwerten die aufgenommen wurden, als sich der Kreuztisch in positive bzw. negative Richtung bewegt hat.

Es erfolgten Umbauarbeiten, bei denen die zuvor zusammenlaufenden Erdungen der Schrittmotorstromversorgungen und der Linearpotentiometer räumlich voneinander getrennt wurden. Bei zukünftig stattfindenden Messungen wird der Kreuztisch mit zwei separaten Erdungen betrieben, um mit der ursprünglichen Genauigkeit der Stromanzeige von $\pm 1 \mu\text{A}$ Untersuchungen der Positionsgenauigkeit durchzuführen.

Die Endschalter werden erweitert, so dass sie bei Aktivierung zweistufig Stoppsignale senden: das erste Stoppsignal löst einen Stopp-Befehl in der Steuerungssoftware aus. Sollte sich der Kreuztisch dennoch weiter bewegen, trennt das zweite Auslösen des Endschalters über Relais mechanisch die Stromverbindung der Schrittmotoren. Eine Beschädigung des Kreuztisches ist somit ausgeschlossen.

5.4. Die Drehbewegung des Targetstrahls

Verfährt der Kreuztisch in x- bzw. y-Richtung, wird diese zweidimensionale Bewegung über das Kardangelenke in eine Drehbewegung des Clusterstrahls übertragen. In diesem Abschnitt werden die mathematischen Zusammenhänge zwischen der Bewegung des Kreuztisches und der Drehung des Clusterstrahls dargestellt.

Wird der Kreuztisch in einer Ebene verfahren, so bewegt sich das Kardangelenke entsprechend in einer Drehpunkthöhe mit einem festen Radius D . Die Drehpunkthöhe ist dabei definiert als Abstand zwischen Düsen- und Kardanmittelpunkt. Die Lavaldüse führt eine Drehbewegung aus, die den Strahl bezüglich seiner Hauptachse kippt. Die Hauptachse ist definiert als die Ausbreitungsrichtung des Clusterstrahls im Strahlrohr. Zur Veranschaulichung dieses Vorgangs und der folgenden mathematischen Behandlung dient Abbildung 5.12. Diese zeigt links die z-y-Ebene, auf die der Kreuztisch senkrecht steht. Rechts ist die x-y-Ebene zu sehen. Anschaulich soll mit dem Strahl auf einen Punkt des eingezeichneten Kreises gezielt werden. Wird diese Ebene in Polarkoordinaten betrachtet, dient der Ausstellwinkel α zur Veränderung des radialen Anteils, während der Drehwinkel β den Winkelanteil beschreibt.

Durch die Bewegung des Kreuztisches in x- oder y-Richtung kann zunächst ein Ausstellwinkel α eingestellt und durch Variation des Drehwinkels β ein Kreis mit konstantem Radius abgefahren werden. Durch sukzessive Erhöhung von α ist eine Abrasterung der kompletten Ebene mit dem Clusterstrahl möglich. Dies entspricht der kreisförmigen Bewegung des Clusterstrahls vor dem Skimmer.

Der trigonometrische Zusammenhang zwischen den vorzugebenden Winkeln α und β und den Fahrwegen x und y des Kreuztisches (von der Nullposition aus) ist durch die Formeln 5.3 und 5.4 gegeben.

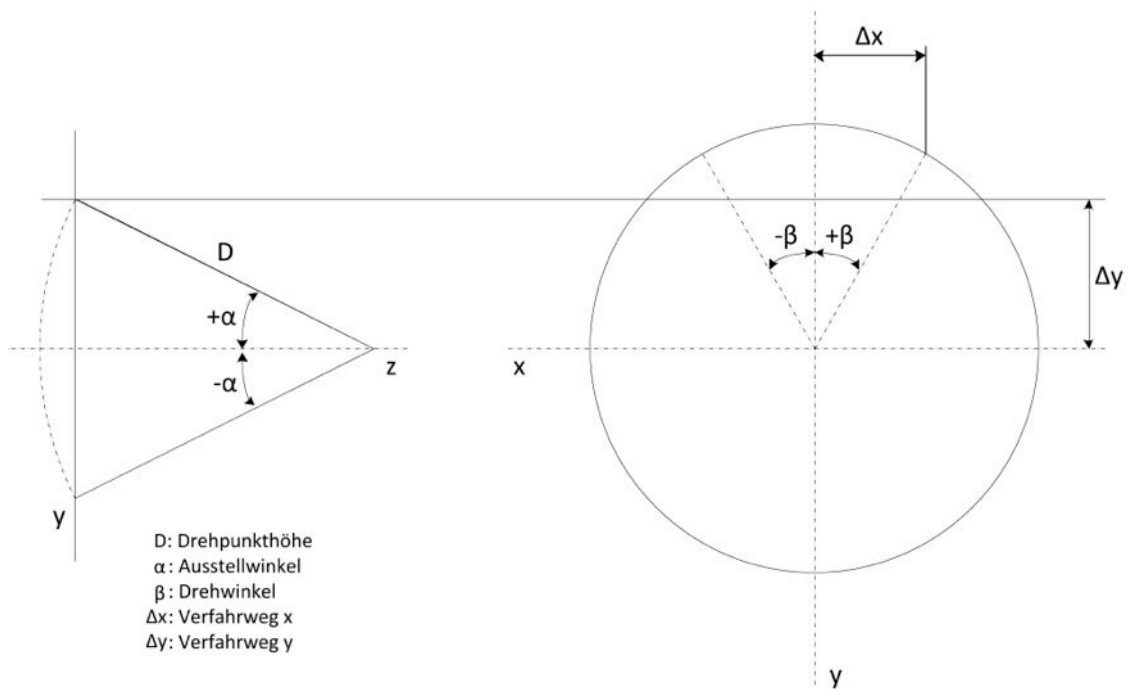


Abbildung 5.12.: Darstellung des geometrischen Zusammenhangs zwischen vorgegebenen Ausstellwinkel α bzw. Drehwinkel β und des x-y-Verfahrwegs des Kreuztisches.

$$x = D \sin(\alpha) \sin(\beta), \quad (5.3)$$

$$y = D \sin(\alpha) \cos(\beta). \quad (5.4)$$

Diese Angaben gelten aufgrund der Vorzeichen nur in dem ersten Quadranten. Durch entsprechende Vorzeichenänderung können alle Quadranten abgedeckt werden.

Die mittlere Drehpunkthöhe D liegt im Bereich von 694 mm, kann sich jedoch montagebedingt noch geringfügig ändern. Der maximal zulässige Verfahrweg des Kreuztisches von der Mittelposition aus beträgt sowohl in x- als auch in y-Richtung $\pm 30,3$ mm. Daraus resultiert ein zulässiger maximaler Ausstellwinkel von $2,5^\circ$.

Die zuvor ermittelte Genauigkeit der Positionsreproduzierbarkeit von $< 10,63 \mu\text{m}$ entspräche in der Mittelposition einer Verkippungsgenauigkeit von $(\pm 9 \times 10^{-4})^\circ$. Das Ziel der Inbetriebnahme eines Justagesystems mit einer Verkippungsgenauigkeit von $\pm 0,1^\circ$ ist damit, auch im Vergleich mit dem maximalen Ausstellwinkel von $2,5^\circ$, um mehrere Größenordnungen übertroffen worden. Zur Justage des Clusterstrahls steht somit ein schrittmotorbetriebener Kreuztisch zur Verfügung, der den Anforderungen an Verfahrpräzision und Positionsreproduzierbarkeit mehr als gerecht wird.

6. Die MCP als Detektionskomponente des Clusterstrahls

Microchannel plates (engl. für Mikrokanalplatte, im Folgenden MCP genannt) werden zur Detektion von Photonen oder ionisierenden Teilchen eingesetzt. Sie Verstärken ein ausgelöstes Signal um ein Vielfaches, so dass es zum Beispiel von einem Phosphorschirm visualisiert werden kann. Werden die Cluster des Cluster-Jet Target Prototypen durch eine Elektronenkanone ionisiert, bildet die MCP eine hervorragende Komponente zur Detektion und Visualisierung des Clusterstrahls. Bei dem derzeitigen Monitorsystem werden zur Positions- und Größenbestimmung des Clusterstrahls Stäbe durch die Streukammer gefahren (wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben). Es wird bei dem zukünftigen \bar{P} ANDA-Experiment aufgrund der geplanten Detektorgeometrie nicht umsetzbar sein. Der Einsatz eines MCP-Detektors zur Visualisierung eines Clusterstrahls wurde erstmalig von Prof. Dr. A. Khokkaz vorgeschlagen. Die ersten erfolgreichen Messungen werden in diesem Abschnitt dargestellt. Dabei wird durch die MCP die Möglichkeit einer innovativen und einfachen Justagekontrolle eröffnet, die umso beeindruckender ist, da zusätzliche Eigenschaften des Clusterstrahls beobachtet und untersucht werden können. So kann die Größe und Form des Clusterstrahls direkt auf dem Phosphorschirm erfasst und ein Intensitätsprofil erstellt werden. Die Installation des MCP-Detektors und erste Testmessungen bilden einen Schwerpunkt dieser Bachelorarbeit. In dem folgenden Abschnitt wird zunächst die Funktionsweise und der Aufbau der MCP beschrieben, um anschließend die Visualisierung des Clusterstrahls darzustellen. Dabei wird gezeigt, dass der Strahl leicht formbar und justierbar ist und sich der Einsatz verschiedenartiger Kollimatoren direkt in dem resultierenden Bild widerspiegelt.

6.1. Funktionsweise und Aufbau des MCP-Detektors

Im Folgenden wird zunächst die Funktionsweise und Herstellung einer MCP theoretisch beschrieben. Ebenfalls werden besondere Eigenschaften der MCPs erörtert. Anschließend wird der konkrete Aufbau der verwendeten MCP und die Montage am Cluster-Jet Target dargestellt.

6.1.1. Funktionsprinzip und Herstellung von MCP-Detektoren

MCPs stellen Detektoren für Photonen und ionisierende Teilchen dar. Sie registrieren einzelne Photonen oder Teilchen und können den Auftreffpunkt auf einer Bildfläche darstellen. Ein solcher Detektor besteht im Wesentlichen aus microchannel plates und einem Phosphorschirm zur Visualisierung [Bar09].

Funktionsprinzip von MCPs

Bei einer MCP handelt es sich um eine Glasplatte mit vielen mikroskopisch kleinen gebündelten Elektronenvervielfacher-Kanälen. Die Platte ist an der Ober- und Unterseite mit metallischen Elektroden versehen an denen eine Spannungsdifferenz im niedrigen kV-Bereich anliegt. Das resultierende elektrische Feld in den Kanälen ist homogen. Die Kanaloberfläche ist halbleitend beschichtet. Treffen Strahlung oder Teilchen mit ausreichend großer Energie auf die Kanäle, so werden dort Sekundärelektronen ausgeschlagen und aufgrund des elektrischen Feldes zur Rückseite der MCP beschleunigt. Da die Kanäle in einem kleinen Winkel zur Oberfläche ausgerichtet sind, treffen die Sekundärelektronen mehrfach auf die Kanalwand und es entsteht eine Elektronenlawine. Aus der Rückseite der MCP treten somit pro Kanal etwa 10^4 Elektronen aus [Bar09]. Die Struktur einer MCP und das Prinzip der Elektronenvervielfachung ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

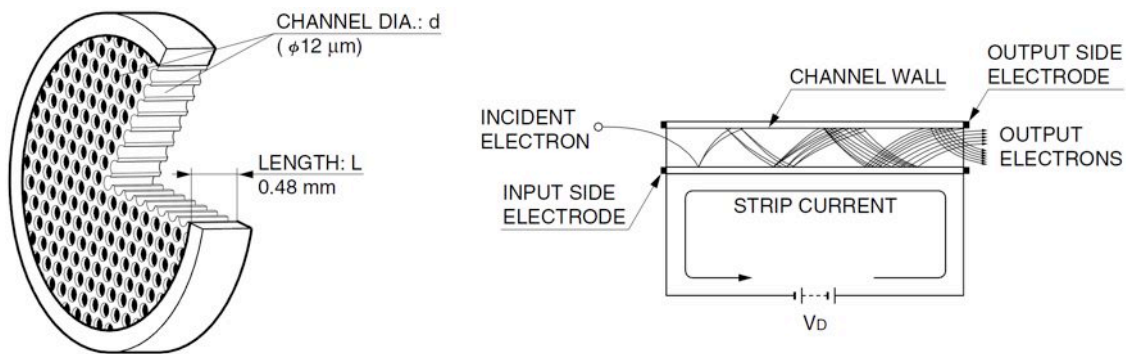


Abbildung 6.1.: Links: Eine microchannel plate mit einem Durchmesser von etwa 50 mm.

Rechts: Prinzip der Elektronenvervielfältigung. Ausgeschlagene Sekundärelektronen werden zur Rückseite der MCP beschleunigt und erzeugen eine Elektronenlawine [Ham06].

Nach dem Austreten der Elektronenwolke aus der microchannel plate trifft diese auf einen Phosphorschirm. Die Intensität ist nach der Vervielfältigung der Elektronen ausreichend groß, um Lichtemission am Auftreffpunkt im sichtbaren Bereich zu erzeugen. Mittels einer Kamera kann der Phosphorschirm beobachtet werden.

Das Herstellungsprinzip einer MCP

MCPs bestehen aus Glasplatten, die viele Mikrokanäle aufweisen. Der anfängliche Glasstab enthält zwei Glassorten: eine nicht ätzbare Glassorte bildet den äußeren Mantel, während die innere Glassorte ätzbar ist. Diese Glasstäbe werden zunächst auseinander gezogen, so dass sich ihr Durchmesser auf etwa 0,8 mm verengt und dann zu sechseckigen Bündeln zusammengeschmolzen. Durch erneutes Auseinanderziehen und Bündeln kann der Querschnitt weiter verkleinert werden. Eine MCP kann anschließend aus dem Glasblock herausgeschnitten und poliert werden. Wird der ätzbare Glasteil herausgeätzt bilden sich kleine Kanäle mit typischen Durchmessern im Bereich von $12\ \mu\text{m}$ und einem Mitte-Mitte-Abstand von etwa $15\ \mu\text{m}$. Die Oberfläche der Kanäle wird so behandelt, dass sie halbleitend wird und die gewünschte Emissionscharakteristik von Sekundärelektronen aufweist. Die Metall-Elektroden werden unter Vakuum auf beide Seiten der MCP aufgedampft [Bar09].

6.1.2. Eigenschaften von MCP-Detektoren

Im Folgenden werden kurz die wichtigsten Eigenschaften von MCP-Detektoren erörtert. Dabei sind vor allem die Signalverstärkung, die unter anderem durch verschiedene Anordnungen von MCPs erhöht werden kann sowie ihre räumliche Auflösung und Effizienz von Interesse.

MCP-Konfigurationen, Signalverstärkung und Impulshöhenverteilung

Jeder Kanal arbeitet nach dem Prinzip eines Elektronenvervielfachers (siehe Abbildung 6.1 rechts). Photonen oder Teilchen mit ausreichender Energie schlagen Sekundärelektronen aus der Kanalwand, deren Anzahl sich aufgrund der anliegenden Spannung lawinenartig vermehrt.

Es besteht die Möglichkeit, dass die Elektronenwolke an der Rückseite der MCP das Restgas ionisiert, die entstehenden Ionen zurück in den Kanal fliegen und dort weitere Sekundärelektronen ausschlagen. Dieser Vorgang wird als Ionenfeedback bezeichnet. Ein Ionenfeedback gilt es zu unterdrücken, da die Verstärkung des eigentlichen Signals dadurch gestört wird. Aus diesem Grund gibt es verschiedene Konfigurationen, die unter anderem mehrere MCPs benutzen. Abbildung 6.2 zeigt vier Anordnungen, die unterschiedliche Verstärkungen und Impulshöhenverteilungen aufweisen.

Bei einer „Single MCP“ handelt es sich um eine MCP, deren Kanäle in einem Winkel von etwa $8^\circ - 15^\circ$ zur Oberflächennormalen stehen. Werden die Kanäle nicht geradlinig sondern gebogen hergestellt, wird das Ionenfeedback deutlich reduziert und die Verstärkung erhöht. Diese Anordnung wird „Curved Channel MCP“ genannt. Die „Chevron Assembly“, wie sie beim Cluster-Jet Target Prototypen verwendet wird, bildet sich aus zwei hintereinander liegenden MCPs, wobei

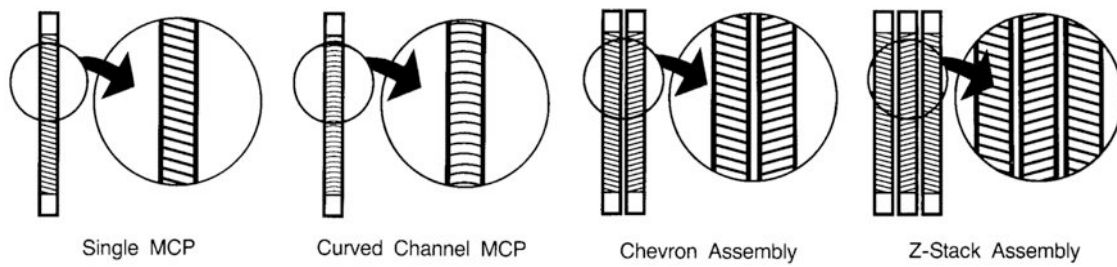


Abbildung 6.2.: Typische MCP-Konfigurationen. Die Verstärkung wird von links nach rechts immer größer, u.a. wegen des reduzierten Ionenfeedbacks aufgrund der Anordnung [Bar09].

die Kanäle entgegengesetzt geneigt sind. Die Anordnung von drei MCPs mit entgegengesetzter Neigung entspricht einem „Z-Stack Assembly“. In Tabelle 6.1 werden die Verstärkung der einzelnen Konfigurationen sowie die zugehörige Impulshöhenverteilung angegeben.

Konfiguration	Single MCP	Curved Channel MCP	Chevron Assembly	Z-Stack Assembly
Verstärkung	$10^3 - 10^4$	$10^5 - 10^6$	$10^6 - 10^7$	$10^7 - 10^8$
Impulshöhenverteilung	exp. abfallend	50% FWHM	120% FWHM	80% FWHM

Tabelle 6.1.: Charakteristische Verstärkung und Impulshöhenverteilung der verschiedenen MCP-Konfigurationen [Bar09]. Die Halbwertsbreite wird mit FWHM abgekürzt.

Die Verstärkung g des Signals einer „Single MCP“ ist im wesentlichen von drei Größen abhängig: der Spannungsdifferenz zwischen den beiden Elektroden, dem Verstärkungsfaktor G , welcher die Emissionscharakteristik der Sekundärelektronen aus den Kanalwänden beschreibt und dem Längen-zu-Durchmesser-Verhältnis $\alpha = L/d$ der Kanäle. Dabei besteht ein exponentieller Zusammenhang zwischen der Verstärkung einer MCP und den letzten beiden Kenngrößen [Ham06]:

$$g = \exp(G \cdot \alpha). \quad (6.1)$$

Dabei liegt α typischerweise im Bereich von etwa 40 – 80.

Die Impulshöhenverteilung gibt an, wie oft Pulse gewisser Intensität auftreten. Für eine „Single MCP“ ergibt sich eine exponentiell abfallende Impulshöhenverteilung wie in Abbildung 6.3 links dargestellt ist, so dass schwache Impulse sehr häufig sind, wohingegen starke Impulse selten auftreten. Für die „Chevron-“ und „Z-Stack Anordnungen“ ergeben sich Impulshöhenverteilungen, die ein Maximum für eine bestimmte Impulsstärke aufweisen. Die Verstärkung des Signals wächst hier nicht dauerhaft mit der Erhöhung der angelegten Spannung, sondern erreicht dann eine

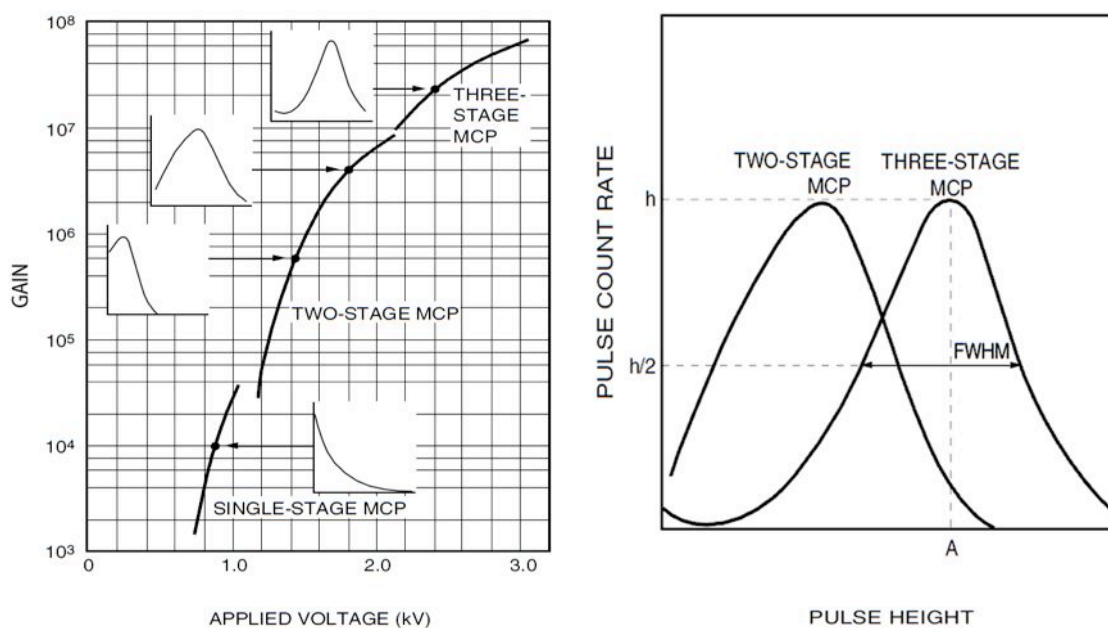


Abbildung 6.3.: Links: Zusammenhang zwischen Verstärkung, Impulshöhenverteilung und Spannung bei verschiedenen MCP-Konfigurationen.

Rechts: Impulsverteilungen der „Chevron-“ und „Z-Stack-Anordnung“ zur Verdeutlichung der Definition der Halbwertsbreite FWHM und Peak-Position A [Ham06].

Sättigung, wenn die Elektronendichte am Ausgang des Kanals so groß ist, dass sich im Kanal ein Gegenfeld aufbaut und die Elektronenlawine nicht weiter zunehmen kann [Ham06]. Abbildung 6.3 veranschaulicht den Zusammenhang verschiedener Impulshöhenverteilungen und Verstärkungen bei unterschiedlichen Spannungen und MCP-Konfigurationen.

Als Maß für die Güte einer Impulshöhenverteilung wird die Halbwertsbreite FWHM der Verteilung durch die wahrscheinlichste Verstärkung, also der „Peak-Position“ A , geteilt und in Prozent angegeben (siehe Tabelle 6.1 und Abbildung 6.3, rechts):

$$\text{Güte der Impulshöhenverteilung} = \text{FWHM}/A. \quad (6.2)$$

Je kleiner dieser Wert ist, um so geringer ist die Dispersion der Verteilung, was ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis liefert.

Räumliche Auflösung

Da jeder einzelne Kanal als Elektronenvervielfältiger dient, ist die räumliche Auflösung insbesondere durch den Durchmesser der Kanäle festgelegt. Bei der Verwendung eines Phosphorschirms zur Visualisierung ist ebenfalls der Abstand sowie die Beschleunigungsspannung zwischen MCP und

Schirm entscheidend. Versuche der Firma Hamamatsu Photonics K.K. haben bei einer Distanz von 0,8 mm und einer Beschleunigungsspannung von 5 kV zwischen MCP und Schirm bei einem Kanaldurchmesser von 12 μm eine Auflösung von etwa 33 μm ergeben [Ham06].

Durch den Einsatz einer „Chevron-Anordnung“ wird die Auflösung weiter reduziert. Der Vorgang ist in Abbildung 6.4 bildlich dargestellt. Zwischen den beiden MCPs divergiert die Elektronenlawine stärker als in den Kanälen, da ihre Ausbreitungsmöglichkeit nicht von den Kanalwänden begrenzt ist.

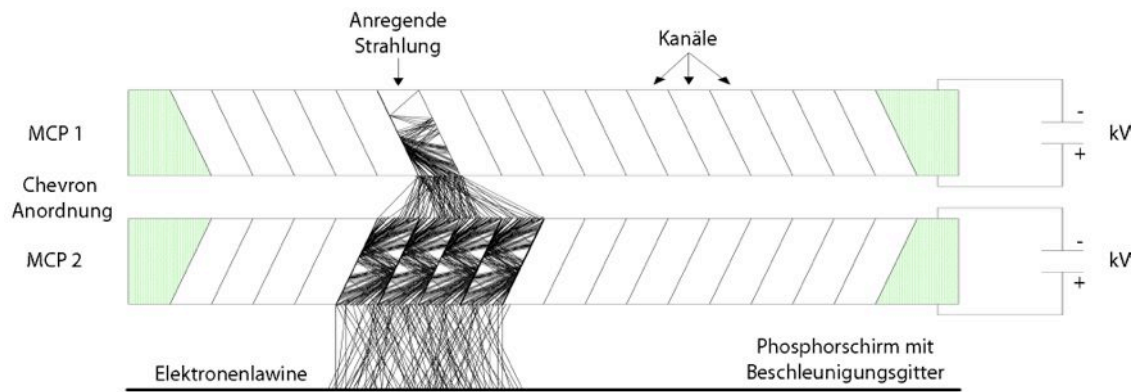


Abbildung 6.4.: Verbreiterung des Strahlengangs bei einer „Chevron-Anordnung“ der MCPs nach J.L. Wiza [Wiz79].

Empfindlichkeit und Effizienz

MCPs besitzen die Eigenschaft, dass sie *solar blind* sind, d.h. sie sind nicht für sichtbares Licht empfindlich. Die Oberflächen der Kanäle sind so beschaffen, dass Elektronen etwa bis zu einer Tiefe von 20 nm ausgelöst werden können. Daher sind MCPs zwar empfindlich gegenüber UV- und Röntgenstrahlung sowie Elektronen und Ionen der entsprechenden Energie, nicht jedoch für sichtbares Licht [Bar09].

Die Detektionseffizienz ist abhängig von der Art der eintreffenden Strahlung (UV, Röntgen, α , geladene Partikel, Neutronen, Elektronen), der Oberfläche der Kanäle, dem Eintreffwinkel und insbesondere der Energie der Strahlung [Ham06]. Tabelle 6.2 gibt eine Übersicht über die typischen Effizienzen einer MCP für einige Strahlungsarten, gemäß den Untersuchungen der Firma Hamamatsu Photonics K.K.

Strahlungsart	Energie bzw. Wellenlänge	Effizienz [%]
Elektron	0,2 keV bis 2 keV	50 bis 85
	2 keV bis 50 keV	10 bis 60
Ionen (H ⁺ , He ⁺ , Ar ⁺)	0,5 keV bis 2 keV	5 bis 58
	2 keV bis 50 keV	60 bis 85
	50 keV bis 200 keV	4 bis 60
UV	300 Å bis 1100 Å	5 bis 15
	1100 Å bis 1500 Å	1 bis 5

Tabelle 6.2.: Typische Effizienzen einer MCP für unterschiedliche Strahlungsarten verschiedener Energiebereiche [Ham06].

6.1.3. Der Aufbau und die Montage eines MCP-Detektors für das Cluster-Jet Target

Bei dem Cluster-Jet Target Prototyp für \bar{P} ANDA wird ein MCP-Detektor zum Einsatz kommen, bestehend aus zwei MCPs in „Chevron-Anordnung“ sowie einem Phosphorschirm zur Visualisierung. Bei den MCPs handelt es sich um das Modell MCP-50-D-R-P43 der Firma tectra GmbH. Die „Chevron-Anordnung“ weist einen Durchmesser von etwa 50 mm auf. Ein MCP hat eine Dicke von $(0,50 \pm 0,02)$ mm und einen Kanaldurchmesser von $(12,0 \pm 0,5)$ μm . Daraus resultiert ein Längen-zu-Durchmesser-Verhältnis von $\alpha = 42$. Die Elektroden sind mit NiCr beschichtet. Der Hersteller beziffert die Verstärkung in der „Chevron-Anordnung“ auf mehr als 4×10^6 . Der Phosphorschirm besteht aus Phosphor des Typs P43 auf einem Glassubstrat des Typs BK-270. Eine Fotografie des Beschleunigungsgitters und der MCPs in „Chevron-Anordnung“ sowie eine CAD-Zeichnung des Aufbaus sind in Abbildung 6.5 zu sehen. Die CAD-Zeichnung zeigt den gesamten MCP-Detektor, der an dem Ende des Auffängers des Prototypen montiert wird. Der ionisierte Targetstrahl trifft zunächst auf das Beschleunigungsgitter und wird dann zur MCP-Anordnung hin beschleunigt, um möglichst effektiv Sekundärelektronen zu erzeugen. Die aus der „Chevron-Anordnung“ austretende Elektronenwolke wird beschleunigt und trifft auf den positiv geladenen Phosphorschirm. Die Potentialdifferenz zwischen MCP-Anordnung und Phosphorschirm minimiert ein Divergieren der Elektronenverteilung, so dass die räumliche Auflösung maximiert wird. Durch die Kamera pco.pixelfly usb wird das auf dem Phosphorschirm erzeugte Bild direkt auf dem Computer visualisiert.

Der MCP-Detektor befindet sich während des Betriebs unter Vakuum. Zu Wartungszwecken sind zwei Ventile an die Detektorkammer angebracht, um die Kammer mit Stickstoff zu füllen.

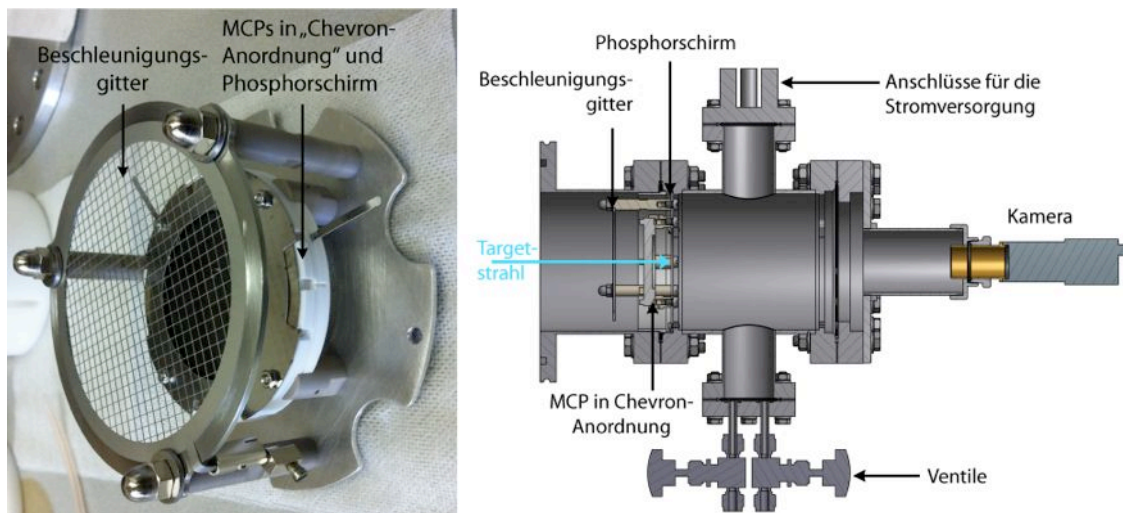


Abbildung 6.5.: Links: Fotografie der zentralen Elemente des MCP-Detektors: Das Beschleunigungsgitter und die MCPs in „Chevron-Anordnung“ sind zu erkennen.

Rechts: CAD-Zeichnung des MCP-Detektors. Der Targetstrahl passiert zunächst das Beschleunigungsgitter, wird anschließend von den MCPs verstärkt und letztendlich auf dem Phosphorschirm visualisiert. Die Kamera überträgt das Bild auf einen Computer. Über die Ventile kann die Kammer mit Stickstoff belüftet werden.

Die Stromversorgung erfolgt über eine Vakuumdurchführung. Eine schematische Darstellung des Aufbaus mit der Spannungsversorgung der MCP und des Gitters ist in Abbildung 6.6 zu sehen. Der Clusterstrahl wird im Bereich der Zwischenstufe durch eine Elektronenkanone positiv ionisiert. Nachdem der Strahl das geerdete Beschleunigungsgitter passiert hat, wird dieser zur ersten microchannel plate beschleunigt. Über einen Spannungsteiler erhalten beide MCPs im Verhältnis von 1:2 negative Spannungen im kV-Bereich. In Abbildung 6.6 ist die maximale Arbeitsspannung von -3,8 kV am Spannungsteiler eingezeichnet. Durch hochohmige Widerstände wird zum einen der Spannungsteiler realisiert, zum anderen eine spontane Potentialentladung bei den nahe beieinanderliegenden MCPs vermieden.

Der Phosphorschirm ist positiv geladen (bis zu +3,0 kV), so dass die aus der zweiten MCP austretende Elektronenwolke zu ihm beschleunigt wird. Die Impulse des Clusterstrahls, die der Phosphorschirm in sichtbares Licht umwandelt, können von der Kamera hinter dem Schirm beobachtet werden.

Über zugeschaltete Voltmeter werden die an den Channelplates und an dem Phosphorschirm anliegenden Spannungen kontrolliert.

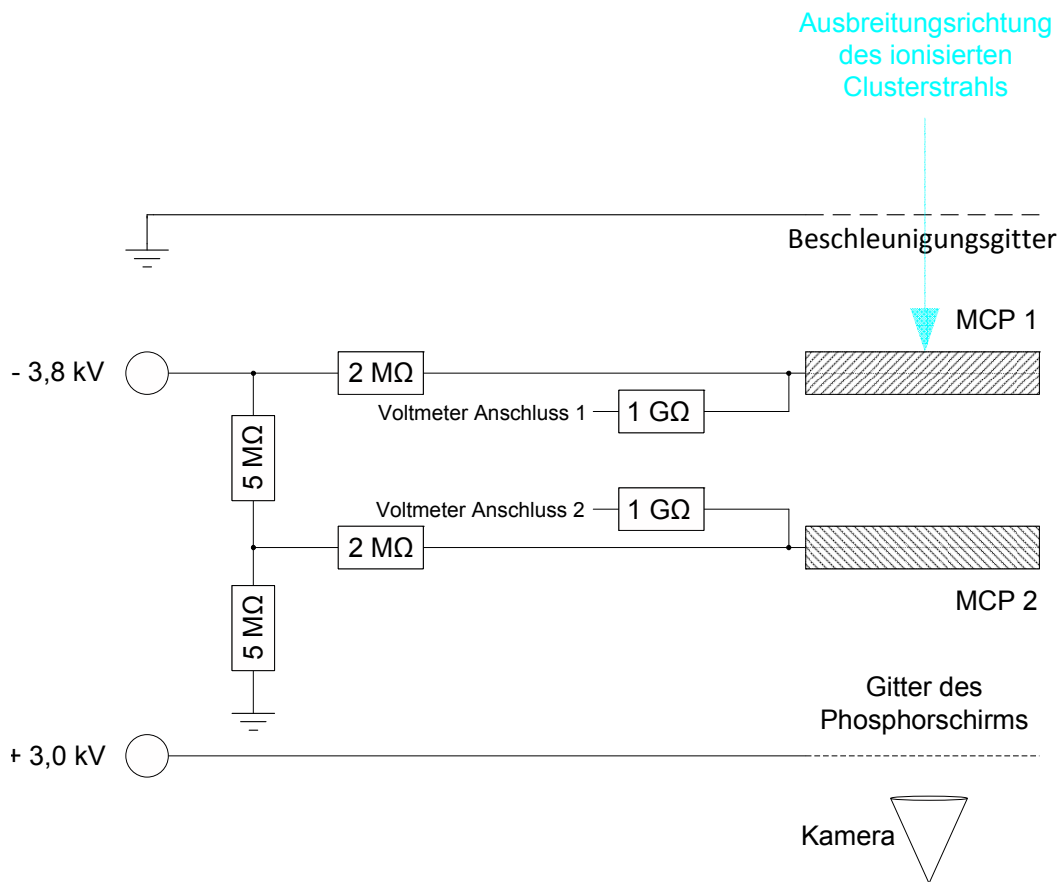


Abbildung 6.6.: Das Beschleunigungsgitter ist geerdet. Über einen Spannungsteiler kann zunächst eine große negative Potentialdifferenz zwischen Gitter und MCP1 geschaffen werden. Die positive Spannungsdifferenz zwischen MCP1 und MCP2 ist halb so groß. Die Spannung am Phosphorschirm zur Beschleunigung der Elektronenwolken kann separat eingestellt werden.

6.2. Darstellung des Clusterstrahls mittels des MCP-Detektors

In diesem Abschnitt werden die im Rahmen dieser Bachelorarbeit mit dem MCP-Detektor aufgezzeichneten Abbildungen vorgestellt. Dabei wird ein wesentlicher Aspekt die Justagekontrolle des Clusterstrahls sein, ebenso seine Formbarkeit und die Abschätzung der Strahlgröße.

6.2.1. Erste Aufnahmen

Zur Ionisierung des Clusterstrahls wird in der Regel eine Elektronenkanone verwendet, die sich im Bereich der Zwischenstufe befindet. Die ersten Aufnahmen zeigten das Abbild des Clusterstrahls auf dem Phosphorschirm, wobei gestreifte Strukturen zu erkennen sind, die der Strahlrichtung der Elektronenkanone entsprechen (siehe Abbildung 6.14 rechts). Um den Effekt der Elektronenkanone auf den Clusterstrahl zu überprüfen, wurde diese ausgestellt. Zu erkennen war ein homogenes Abbild des Clusterstrahls. Dies resultierte daraus, dass zur Druckkontrolle Heißkathoden-Ionisations-Vakuummeter an verschiedenen Stellen entlang des Strahlrohres eingesetzt werden. Die von den Druckmessgeräten ausgehenden Elektronen ionisieren den Clusterstrahl sehr homogen. Werden sowohl die Elektronenkanone als auch die Druckmessgeräte ausgeschaltet, ist der nicht ionisierte Clusterstrahl auf dem MCP-Detektor nicht sichtbar. Aufgrund der Homogenität des visualisierten Clusterstrahls werden bei den Aufnahmen des runden Kollimators und Schlitzkollimators nur die Heißkathoden-Ionisations-Vakuummeter zur Ionisierung genutzt.

Für die ersten Aufnahmen des Clusterstrahls wurde bei einem Druck an der Lavaldüse von > 4 bar und einer Temperatur 22 K gearbeitet. Die MCPs wurden bei diesen Aufnahmen mit maximal 3,0 bzw. 1,5 kV betrieben, die Spannung am Phosphorschirm betrug etwa 2,2 kV. Die Belichtungszeit der Kamera wurde auf 2000 ms gesetzt. Der Kollimator wies einen Durchmesser von 0,5 mm auf. Die folgenden Abbildungen zeigen Frontalaufnahmen des Clusterstrahls, der in etwa 4 m Entfernung zur Lavaldüse auf den MCP-Detektor trifft.

Das erste Resultat ist sehr beeindruckend und in Abbildung 6.7 zu sehen. Der Clusterstrahl ist (durch Einstellung des Kollimators und der Kontrolle durch das Monitorsystem in der Streukammer) justiert und trifft zentral auf den Detektor. Die Struktur des Beschleunigungsgitters ist deutlich zu erkennen. Da die Seitenlänge von 2,5 mm eines Gitterkästchens bekannt ist, dient das zu erkennende Beschleunigungsgitter zusätzlich einer Größenabschätzung. Des Weiteren ist eine Helligkeitsverteilung zu sehen, deren Intensitätsmaximum sich relativ mittig vom Clusterstrahl befindet und zum Rand hin abnimmt. Da die Intensität des Strahls direkt proportional zu seiner Dichte ist, stellt ein daraus resultierendes Intensitätsprofil eine relative Dichteverteilung dar (siehe dazu Abschnitt 6.2.2).

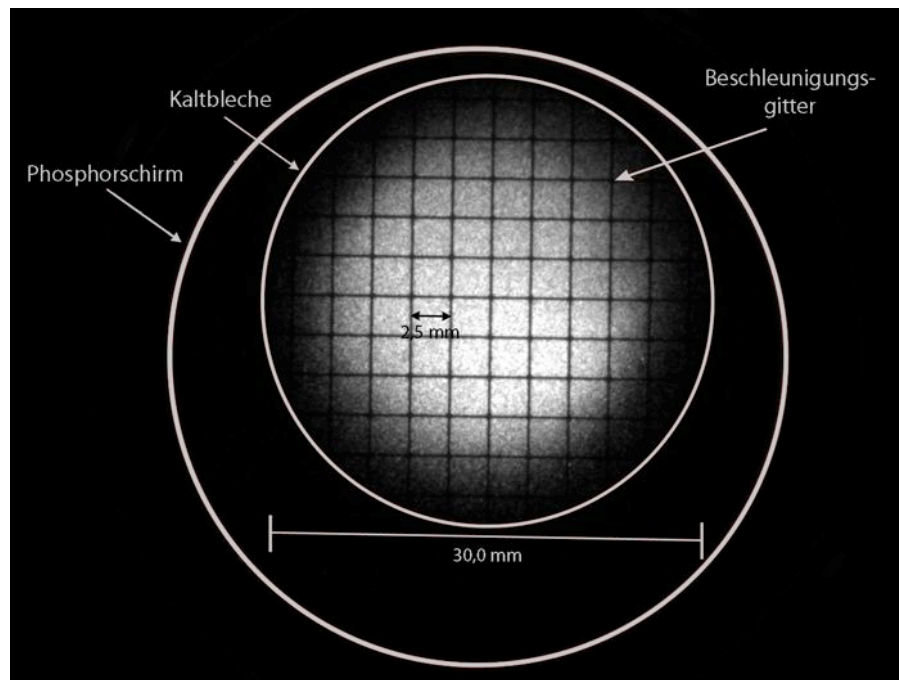


Abbildung 6.7.: Erste Darstellung des Clusterstrahls mittels des MCP-Detektors. Der Clusterstrahl weist 2 m hinter der Streukammer einen Durchmesser von etwa 22 mm auf. Die Form der Kaltbleche ist erkennbar. Da die Seitenlänge von 2,5 mm eines Gitterkästchens des Beschleunigungsgitters bekannt ist, sind Größenabschätzungen möglich.

Der Begrenzungsrand der Kaltbleche einer Kryopumpe des Auffängers ist deutlich zu erkennen und in Abbildung 6.7 eingezeichnet. Auf dem Phosphorschirm des MCP-Detektors 2 m hinter der Streukammer weist der Clusterstrahl einen Durchmesser von etwa 22 mm auf. Ebenfalls ist der Rand des Phosphorschirms zu erkennen und eingezeichnet. Reflexionen des Lichts an der Kammer sind in einem schwachen äußeren Ring sichtbar.

Der erste Einsatz des MCP-Detektors ist erfolgreich abgeschlossen worden. Der Clusterstrahl konnte visualisiert werden und es sind einige bemerkenswerte Eigenschaften zu beobachten gewesen. So konnte unter anderem das durch den Kollimator erzeugte runde Strahlprofil erkannt werden und diesem 4 m hinter der Clusterquelle ein Durchmesser von etwa 22 mm zugeordnet werden. Ebenso war eine Helligkeitsverteilung auf dem Schirm zu beobachten, die der Dichteverteilung des Clusterstrahls entspricht. Die weiteren Abbildungen des Clusterstrahls wurden mit ähnlichen Einstellungen der Spannungsversorgung des MCP-Detektors und der Targetdichte erstellt.

In Abbildung 6.7 sind vereinzelt kleine Lichtpunkte zu sehen, die von streuenden Clusterteilen erzeugt werden. Das Aufnahmeprogramm am Computer stellt die Option zur Verfügung, mehrere Bilder übereinander zu legen und Mittelwerte zu bilden. Die Helligkeit wird dabei entsprechend

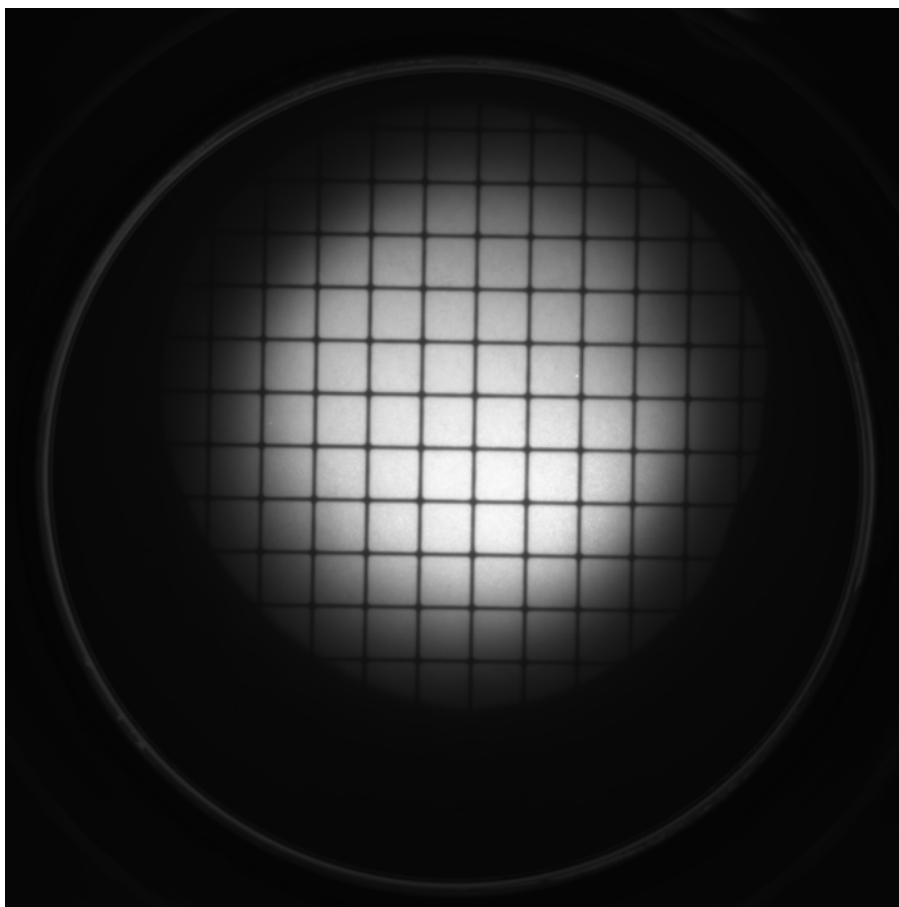


Abbildung 6.8.: Die Mittelwertbildung von 896 Bildern zeigt einen klar definierten Clusterstrahl, der sich kontrastreich von dem Hintergrund abhebt. Eine leichte Asymmetrie der Intensitätsverteilung ist erkennbar. Diese resultiert vermutlich aus der Tatsache, dass bei den ersten Funktionstests keine Wartezeit zur Stabilisierung des Clusterstrahls vorgenommen wurde.

angepasst, um eine Überbelichtung zu vermeiden. In Abbildung 6.8 ist der Mittelwert von 896 Fotos zu sehen, welche im Abstand von der Belichtungsdauer von 2000 ms aufgenommen wurden. Wie zu erkennen ist, zeichnet sich die exakte Form des Clusterstrahls deutlich vor einem dunklen Hintergrund ab. Die Grobkörnigkeit des Bildes ist verschwunden. Informationen über die Momentaufnahme sind hierbei nicht zu erhalten, dafür jedoch die räumliche Verteilung des Targetstrahls. Die Position des Clusterstrahls war über die 30 minütige Aufnahmedauer sichtbar konstant.

6.2.2. Intensitätsprofil des Clusterstrahls

Wie in Abbildung 6.8 zu sehen ist, weist der Clusterstrahl ein Intensitätsmaximum auf, welches zum Rand hin schwächer wird. Das Intensitätsprofil beschreibt die zweidimensionale Aufnahme des MCP-Detektors mit der relativen Intensität als dritte Dimension. Dieses ist in Abbildung 6.9 für obige Aufnahme zu sehen.

Die geringe Asymmetrie der Intensitätsverteilung entspringt der Ursache, dass der Targetstrahl bei einem Druck von > 4 bar und einer Temperatur von 22 K aufgenommen wurde und bei dem ersten Funktionstest keine Wartezeiten zur Stabilisierung des Clusterstrahls berücksichtigt wurden. In Kürze wird eine Wiederholung der Messung bei stabilen Bedingungen und höchsten Dichten stattfinden.

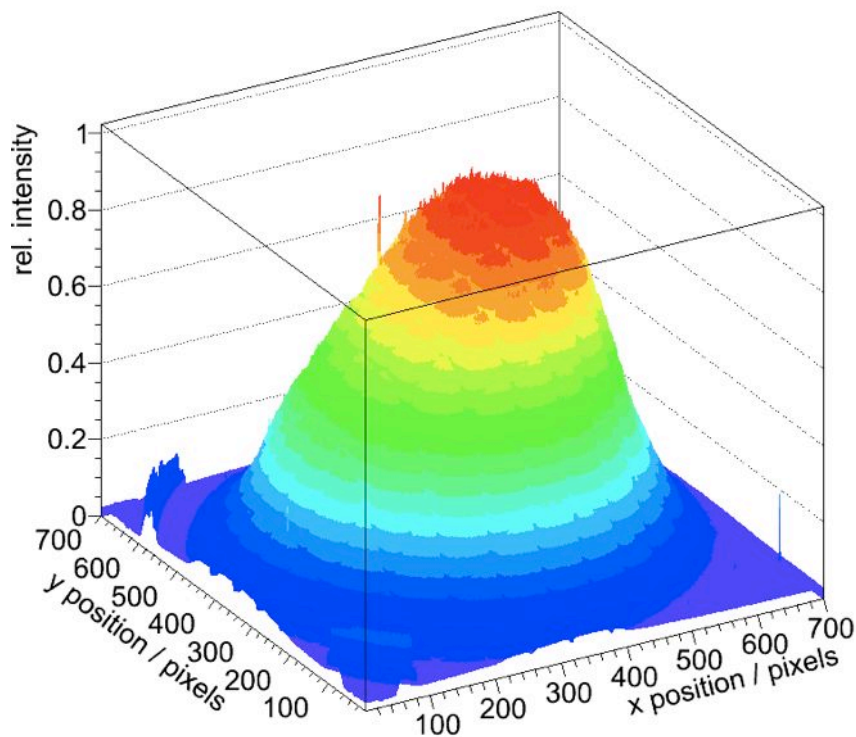


Abbildung 6.9.: Die Intensitätsverteilung (Darstellung erstellt von A. Täschner) des Clusterstrahls enthält ein Maximum und nimmt zum Rand hin ab. Eine geringe Asymmetrie ist erkennbar, da der Funktionstest keine Wartezeiten zur Stabilisierung des Clusterstrahls berücksichtigt hat.

6.2.3. Justagekontrolle des Clusterstrahls über den MCP-Detektor

Temperatur- und Druckänderung des Wasserstoffgases an der Lavaldüse können die Position der hochdichten Kernstrahlen verändern. Um diese zu extrahieren, muss die Position des Skimmers angepasst werden. Eine abschließende Justage des Clusterstrahls mit dem Kollimator sorgt für einen geradlinigen Verlauf der Cluster durch das Strahlrohr. Die Kontrolle erfolgt bisweilen durch das Monitorsystem, indem in der Streukammer Stäbe in horizontaler und vertikaler Richtung durch den Clusterstrahl bewegt werden und ein Druckprofil aufgenommen wird (dargestellt in Abbildung 3.5, Abschnitt 3.1.2). Bei dem \bar{P} ANDA-Experiment kann dieses Monitorsystem nicht verwendet werden, da der zukünftige Wechselwirkungspunkt lediglich einen Strahlrohrdurchmesser von 20 mm aufweist und die volle 4π -Akzeptanz des Detektors gewährleistet sein muss. Durch die Visualisierung des Targetstrahls mit dem MCP-Detektor ist die innovative Möglichkeit einer präzisen Justagekontrolle gegeben.

Abbildung 6.10 zeigt das aufgenommene Bild des Clusterstrahls, vor und nach der Justage. Diese konnte durch Positionsänderungen des Kollimators durchgeführt werden. Die Auswirkungen waren direkt auf dem Phosphorschirm sichtbar.

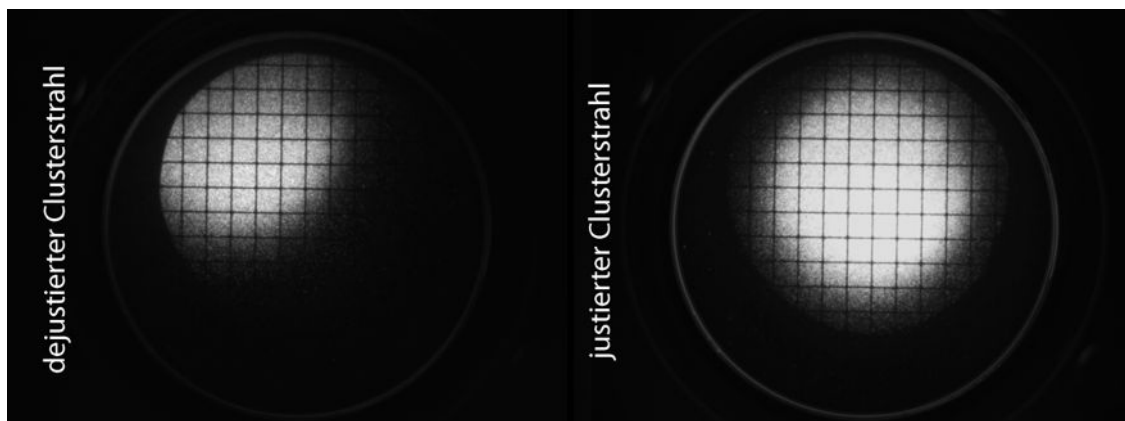


Abbildung 6.10.: Links: Dejustierter Clusterstrahl.

Rechts: Nach der Justage, die in Echtzeit beobachtet werden konnte, ist der Verlauf des Clusterstrahls wechselwirkungsfrei mit den Kaltblechen der Kryopumpen.

6.2.4. Formbarkeit des Clusterstrahls

Durch den Einsatz verschiedenartiger Kollimatoren soll der Clusterstrahl geformt werden. Dies dient z.B. der Verminderung des Untergrundes bei gleichem Überlappbereich mit dem Beschleunigerstrahl im Falle von schlitzförmigen Kollimatoren, wie A.-K. Hergemöller in ihrer Masterarbeit ausführen wird [Her12]. Abbildung 6.11 zeigt exemplarisch einige Lichtmikroskopaufnahmen vorhandener Kollimatoren. Die jeweilige Öffnungsgröße ist angegeben. Während der quadratische und der herzförmige Kollimator lediglich die leichte Formbarkeit des Targetstrahls darstellen soll, wird beim Übergang vom runden zum schlitzförmigen Kollimator eine Untergrundreduktion erwartet.

Die ersten Aufnahmen des Clusterstrahls beim Einsatz eines schlitzförmigen Kollimators wurden bei 6 bar und 22 K gemacht und sind in Abbildung 6.12 zu sehen. Der Kollimator weist eine Größe von $0,78 \times 0,19 \text{ mm}^2$ auf. Die Abbildung stellt eine Mittelung von 128 Bildern dar die mit einer Belichtungsdauer von 1200 ms aufgenommen wurden. Zu erkennen ist deutlich eine schlitzförmige Verteilung des Clusterstrahls auf dem Phosphorschirm. Eine Justage des Kollimators wird den Clusterstrahl zukünftig parallel zu den Gitterlinien des Beschleunigungsgitters ausrichten. Beim $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment wird der Targetstrahl somit nur im Bereich des Überlapps zwischen Beschleunigerstrahl und Targetstrahl vorhanden sein.

Bei Untersuchungen der Visualisierungen des Clusterstrahls sind unter anderem die in Abbildung 6.13 zu sehenden Aufnahmen entstanden. Sie zeigen den Stab des Monitorsystems, der in der Streukammer horizontal durch den Clusterstrahl bewegt wird (von links nach rechts in 12 Schritten). Der Stab hat einen Durchmesser von 1 mm und wird in äquidistanten Schritten der Länge 0,2 mm bewegt. Da sich die Streukammer 2,1 m hinter der Clusterquelle und etwa 2 m vor

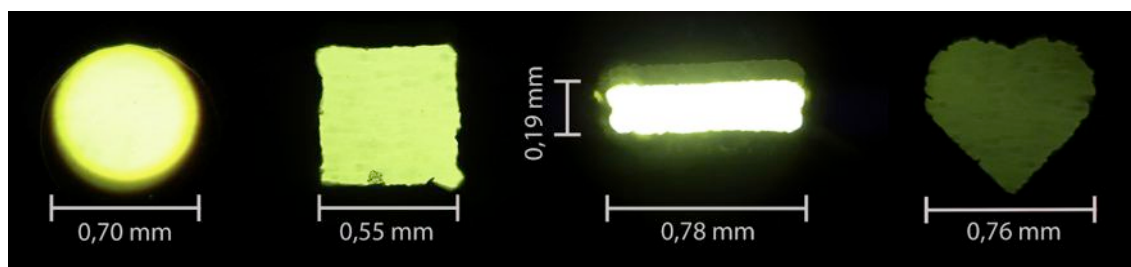


Abbildung 6.11.: Lichtmikroskopaufnahmen verschieden geformter Kollimatoren und ihre Öffnungsgrößen. Der Übergang vom runden zu schlitzförmigen Kollimatoren soll Untergrundreaktionen am zukünftigen Wechselwirkungspunkt beim $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment reduzieren. Die leichte Formbarkeit des Clusterstrahls kann mit dem MCP visualisiert werden.

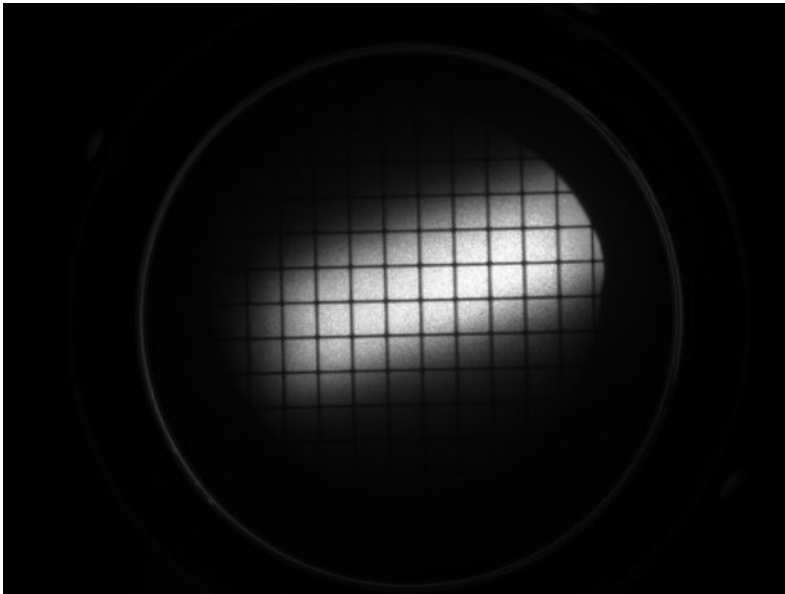


Abbildung 6.12.: Die erste Aufnahme des Clusterstrahls mit einem Schlitzkollimator zeigt eine deutliche schlitzförmige Verteilung. Durch Justage des Kollimators ist eine parallele Ausrichtung zum Beschleunigungsgitter möglich.

dem MCP-Detektor befindet, nimmt der Stab auf dem an der Channelplate zu sehenden Bild eine Breite von etwa einem Gitterkästchen (2,5 mm) ein.

Um die leichte Formbarkeit des Clusterstrahls auch durch den Einsatz einer Blende zu verdeutlichen, wurde in der Streukammer kurzzeitig eine herzförmige Blende installiert. An der breitesten Stelle weist sie eine Breite von 9,2 mm auf. Eine Fotografie der Blende sowie das am Phosphorschirm zu sehende Bild sind in Abbildung 6.14 dargestellt.

Wie in diesem Abschnitt gezeigt wurde, ist die MCP erfolgreich in Betrieb genommen worden. Die Spannungsversorgung der einzelnen Platten erfolgt über einen Spannungsteiler, die Spannung des Phosphorschirms kann separat eingestellt werden.

Der MCP-Detektor eignet sich hervorragend, um den Clusterstrahl zu visualisieren. Dies ermöglicht eine einfache Justagekontrolle in Echtzeit, die beim zukünftigen \bar{P} ANDA-Experiment eingesetzt werden kann. Ebenfalls konnte nachgewiesen werden, dass eine Formgebung des Clusterstrahls durch den Einsatz von Kollimatoren oder Blenden auf einfache Weise erfolgen kann.

Zukünftig wird der Einfluss verschiedener Kollimatoröffnungsgrößen auf den Untergrund untersucht. Dabei wird der MCP-Detektor wichtige Eigenschaften des geformten Clusterstrahls detektieren, wie z.B. die tatsächliche Form und Intensitätsverteilung. Bevor der MCP-Detektor am \bar{P} ANDA-Experiment zum Einsatz kommt, sollen weitere Untersuchungen am Experimentaufbau ANKE am COSY-Beschleuniger in Jülich erfolgen.

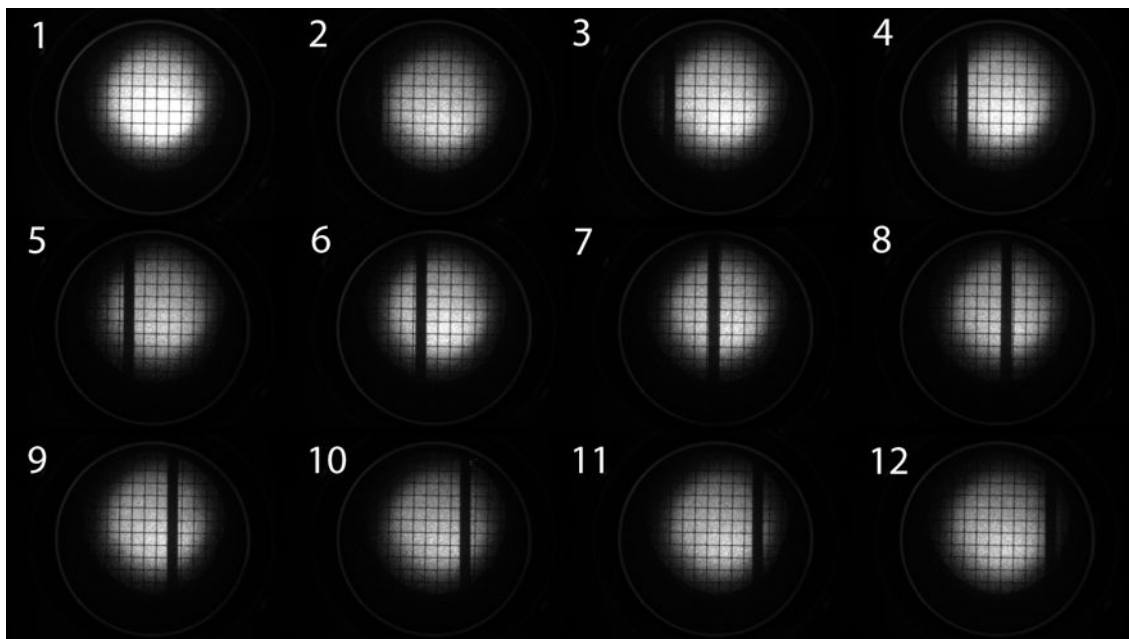


Abbildung 6.13.: Der Stab des Monitor-systems wird in 12 Schritten durch den Strahl bewegt. Die Stabbreite beträgt 1 mm bei einem Abstand von 2,1 m von der Düse. Das Beschleunigungsgitter weist eine Gitterbreite von 2,5 mm auf und befindet sich mehr als 4 m von der Lavaldüse entfernt. Der Clusterstrahl lässt sich leicht formen und bildet klar definierte Ränder aus.

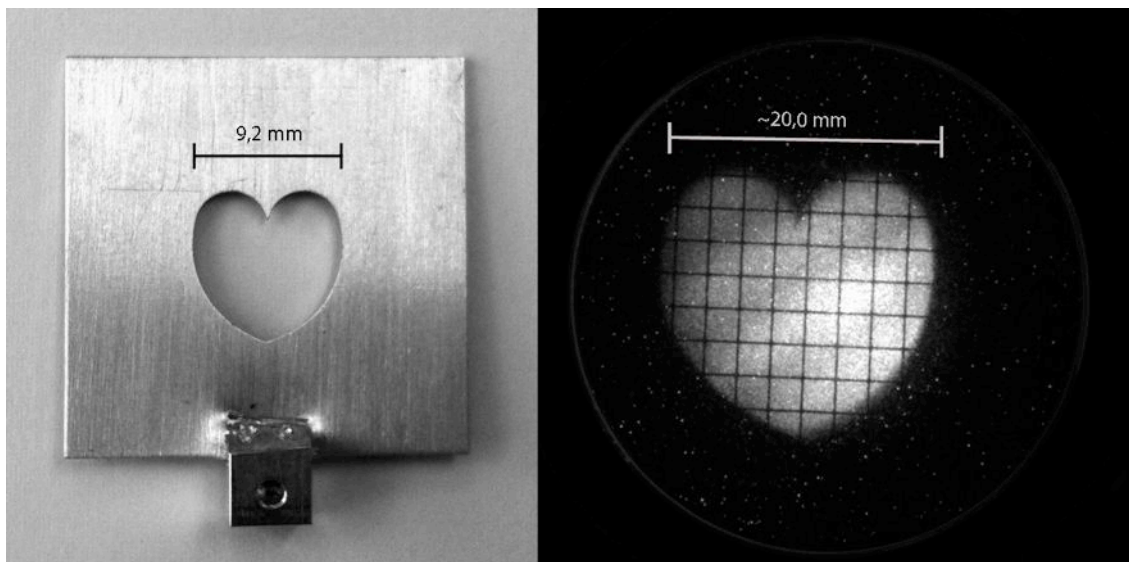


Abbildung 6.14.: Durch den Einsatz einer herzförmigen Blende (links) in der Streukammer (2 m hinter der Lavaldüse) kann der Strahl entsprechend geformt werden. Das am MCP-Detektor zu beobachtende Bild (rechts) zeigt einen herzförmigen Clusterstrahl mit einem Durchmesser von etwa 20 mm.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden drei wesentliche Komponenten für das Cluster-Jet Target untersucht: zunächst der Kaltkopf Coolpower 10MD, dieser erzeugt an der Lavaldüse die notwendigen Temperaturen $< 20\text{ K}$ um hochdichte Clusterstrahlen zu erzeugen. Dieser muss als Produktionskomponente eine ausreichende Kühlleistung und Temperaturstabilität gewährleisten. Ein schrittmotorbetriebenes Justagesystem erlaubt die systematische Ausrichtung der Stützvakuumkammer bezüglich des Skimmers, so dass die hochdichten Kernstrahlen gezielt extrahiert werden können. Zur Detektion und Visualisierung des Clusterstrahls wurde ein MCP-Detektor im Bereich des Auffängers installiert. Durch diesen ist neben der direkten Erfassung interessanter Eigenschaften des Clusterstrahls vor allem eine innovative Justagekontrolle in Echtzeit möglich.

Der Kaltkopf wurde an einem Testpumpstand erstmalig in Betrieb genommen. Die Kühlkurve zeigte ein rasches Abkühlen mit Kühlraten im Bereich von $-6,5\text{ K/min}$. Nach lediglich 36 Minuten wurde die tiefste Temperatur von etwa $10,8\text{ K}$ erreicht.

Im Anschluss erfolgte die Bestimmung der Kühlleistung an der kalten Stufe. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Kühlleistung bei verschiedenen Kaltkopfmotorgeschwindigkeiten konnte detailliert dargestellt werden, indem die Leistung der Heizkapsel im Bereich von $0 - 25\text{ W}$ systematisch geändert wurde. In dem für die Clusterproduktion interessanten Temperaturbereich um 20 K werden die größten Kühlleistungen bei einer Kaltkopfmotorgeschwindigkeit von 110 rpm erzielt. Sie betragen etwa 16 W bei 20 K . Des Weiteren haben externe Untersuchungen an vier baugleichen Kaltköpfen des Modells Coolpower 10MD gezeigt, dass diese Kühlleistungen aufweisen, die um bis zu 20% voneinander abweichen [JL10]. Das erklärt die beobachtete Differenz der gemessenen Kühlleistung im Vergleich zu den Herstellerangaben.

Der Kaltkopf weist eine sehr hohe Stabilität der Temperatur bei einem vorgegebenen Setpoint auf mit Unsicherheiten im mK -Bereich. Die Stabilität verbessert sich u.a. mit zunehmender Kaltkopfmotorgeschwindigkeit oder durch Erhöhung des Setpoints. Die vorgegebene Endtemperatur wurde bei allen Messungen konstant als Mittelwert gehalten. Beispielsweise liegt die Unsicherheit der Messwerte bei Kaltkopfmotorgeschwindigkeiten von $100 - 140\text{ rpm}$ im Bereich von $25 - 45\text{ mK}$ und

bei Setpoints von 20 – 30 K bei etwa $< 5 - 35$ mK. Dabei blieb die Temperatur bei Langzeitmessungen von mehr als 80 Stunden Länge absolut konstant auf dem Setpoint. Des Weiteren konnte die Temperatur mit einer solchen Präzision gemessen werden, dass minimale Oszillationen mit einer Amplitude im Bereich von 0,2 K entdeckt, und ihre Periodizität der Kaltkopfmotorgeschwindigkeit zugeordnet werden konnte. Ebenfalls ließen Temperaturhistogramme eine sinusförmige Verteilung der Temperaturmesswerte erkennen. Aufgrund der höheren absoluten Wärmekapazität des zukünftig montierten Gasleitungssystems und der Gaslast werden keine Temperaturoszillationen während des Betriebs bei $\bar{\text{PANDA}}$ erwartet.

Nach einem Wechsel des Displacers beträgt die tiefste Temperatur mit dem derzeitigen Aufbau etwa 12,2 K. Für Temperaturen < 30 K ist die Kühlleistung etwa 2 – 3 W geringer als zuvor. Dies geht auf das herstellungsbedingte, individuelle Verhalten jedes Kaltkopfes bzw. Displacers zurück [JL10]. Dennoch ist die Kühlleistung an der kalten Stufe ausreichend für den Einsatz des Kaltkopfes am $\bar{\text{PANDA}}$ -Experiment.

Die Montage des Gasleitungssystems sowie dessen Leckage und Überdrucktests werden zeitnah erfolgen. Nach Einbau des Kaltkopfes in die Stützvakuunkammer werden erste Kühlkurven des fertigen Aufbaus mit anliegender Gaslast aufgenommen.

Der Kreuztisch des schrittmotorbetriebenen Justagesystems wurde so konstruiert und aufgebaut, dass dieser eine sehr hohe Verfahrpriizision aufweist. Die Elektronik wird in zwei getrennte Kreisläufe unterteilt. So wird die Beeinflussung des Positionmesssystems, bestehend aus Linearpotentiometern, Messwandlern und Strommessgerät, durch die hochfrequenten Anteile des Schrittmotorstroms vermieden und es ist eine theoretische Positionsaufösung im Bereich von etwa $6,25 \mu\text{m}$ gegeben. Untersuchungen fanden zunächst für einen Schrittmotor statt. Die Positionsbestimmung ist für die Bewegung des Kreuztisches im 64tel-Schrittmodus in Intervallen der Schrittzahl 200 mit einer für den Einsatz am $\bar{\text{PANDA}}$ -Experiment sehr guten Genauigkeit von $\pm 15 \mu\text{m}$ möglich.

Messungen zur Positionsreproduzierbarkeit (jeweils 25 Wiederholungen) haben zunächst darauf hingewiesen, dass ohne eine Bewegung des Kreuztisches das Messsystem eine Positionsänderung (abfallende Stromwerte) anzeigt. Die Untersuchung des Verhaltens lieferte eine Korrekturdistribution. Die korrigierten Messwerte zeigten ein nahezu konstantes Verhalten ohne Trends, so dass eine Positionsreproduzierbarkeit mit einer Genauigkeit von etwa $10 \mu\text{m}$ möglich ist. Im Falle der Ansteuerung eines Punktes von zwei Richtungen aus betrug die Differenz der Stoppositionen etwa $11 \mu\text{m}$. Das Justagesystem bietet die Möglichkeit, den Clusterstrahl mit einer Verkippungsgenauigkeit von etwa $(\pm 5 \times 10^{-4})^\circ$ auszurichten und übertrifft somit die vorgesehene Genauigkeit von $\pm 0,1^\circ$ um mehrere Größenordnungen.

Für das \bar{P} ANDA-Experiment steht demnach ein Justagesystem zur Verfügung, welches eine sehr hohe Verfahrenpräzision und Positionsreproduzierbarkeit aufweist. Zukünftig erfolgt die Untersuchung des zweiten Schrittmotors. Dazu werden Umbauarbeiten vorgenommen, bei denen die Linearpotentiometer und die Schrittmotoren separate Erdungen bekommen, um eine gegenseitige Beeinflussung der beiden aktiven Schrittmotoren und des Positionmesssystems zu vermeiden. Ebenfalls werden die Endschalter erweitert, so dass ein zweites Stoppsignal über Relais die Stromverbindung trennt und eine Beschädigung des Kreuztisches ausgeschlossen ist.

Zur Visualisierung des Clusterstrahls wurde erstmalig ein MCP-Detektor in Betrieb genommen. Schon die ersten Aufnahmen waren sehr beeindruckend, zeigten Eigenschaften des Clusterstrahls auf und eröffneten neue Möglichkeiten der Auswertung. So konnte etwa das runde Strahlprofil des Clusterstrahls aufgrund des Einsatzes eines entsprechenden Kollimators erkannt und die Ausdehnung des Strahls von etwa 22 mm (etwa 4 m hinter der Lavaldüse) abgeschätzt werden. Sowohl das Beschleunigungsgitter als auch der Rand der Kaltbleche und des Phosphorschirms sind zu sehen. Des Weiteren konnte die zeitliche Verteilung des Targetstrahls dargestellt werden, indem von knapp 900 Bildern des Clusterstrahls der Mittelwert gebildet wurde. Die Position war über die 30 minütige Aufnahmedauer sichtbar konstant. Ebenfalls ist aus dieser Aufnahme ein relatives Intensitätsprofil erstellt worden, das proportional zur Dichteverteilung des Clusterstrahls ist.

Der MCP-Detektor kann vor allem als wichtige Justagekontrolle in Echtzeit beim \bar{P} ANDA-Experiment eingesetzt werden. Wie gezeigt wurde, kann ein dejustierter Clusterstrahl direkt erkannt und die Position durch Verfahren des Kollimators korrigiert werden.

Zur Untergrundreduzierung werden in Zukunft Kollimatoren verschiedener Öffnungsgrößen und -formen untersucht [Her12]. Es wurde dargestellt, dass beim Einsatz eines schlitzförmigen Kollimators ein ebenso geformter Clusterstrahl zu sehen ist. Dies bestätigt die leichte Formbarkeit des Clusterstrahls, ebenso wie die gezeigten Aufnahmen beim Verschieben eines Stabs durch den Clusterstrahl oder der Montage einer herzförmigen Blende im Bereich der Streukammer.

Es werden weitere Untersuchungen mit dem MCP-Detektor erfolgen, u.a. am Experimentaufbau ANKE am COSY-Beschleuniger in Jülich, bevor es für das \bar{P} ANDA-Experiment eingeplant wird.

A. Anhang

A.1. Verkabelung des Kreuztisches

Pin	Funktion	Bezeichnung	Aderfarbe Kreuztisch	Aderfarbe Zuleitung
1 bzw. 37	Schrittmotor A\	Windung A\	braun	braun
2 38	Schrittmotor A	Windung A	weiß	weiß
3 39				
4 40	Encoder A	Channel A	weiß	weiß
5 41	Encoder A\	Channel A\	braun	braun
6 42	Encoder B	Channel B	grün	grün
7 43				
8 44	Bremse +	Brake	weiß	weiß
9 45				
10 46	Endschalter 1 normally open	Endschalter 1 NO	weiß	weiß
11 47	Endschalter 2 normally open	Endschalter 2 NO	weiß	weiß
12 48	Linearpotentiometer V+	Poti +	blau	grün
13 49	Schrittmotor B	Windung B	gelb	gelb
14 50	Schrittmotor B\	Windung B\	grün	grün
15 51				
16 52	Encoder B\	Channel B\	gelb	gelb
17 53	Encoder GND	Encoder GND	grau	grau
18 54	Encoder I\	Index \	rosa	rosa
19 55				
20 56	Bremse GND	Brake GND	braun	braun
21 57				
22 58	Endschalter 1 Fußpunkt	Endschalter 1 Fußpunkt	braun	braun
23 59	Endschalter 2 Fußpunkt	Endschalter 2 Fußpunkt	braun	braun
24 60	Linearpotentiometer Schleifer	Schleifer	gelb	gelb
25 61				
26 62				
27 63				
28 64	Encoder I	Index	blau	blau
29 65	Encoder Vcc	(+V5)	rot	rot
30 66				
31 67				
32 68				
33 69				
34 70	Endschalter 1 normally closed	Endschalter 1 NC	gelb	gelb
35 71	Endschalter 2 normally closed	Endschalter 2 NC	gelb	gelb
36 72	Linearpotentiometer V-	Poti -	braun	braun

Abbildung A.1.: Verkabelung des Kreuztisches über den 72-poligen Stecker.

A.2. Korrekturfunktion

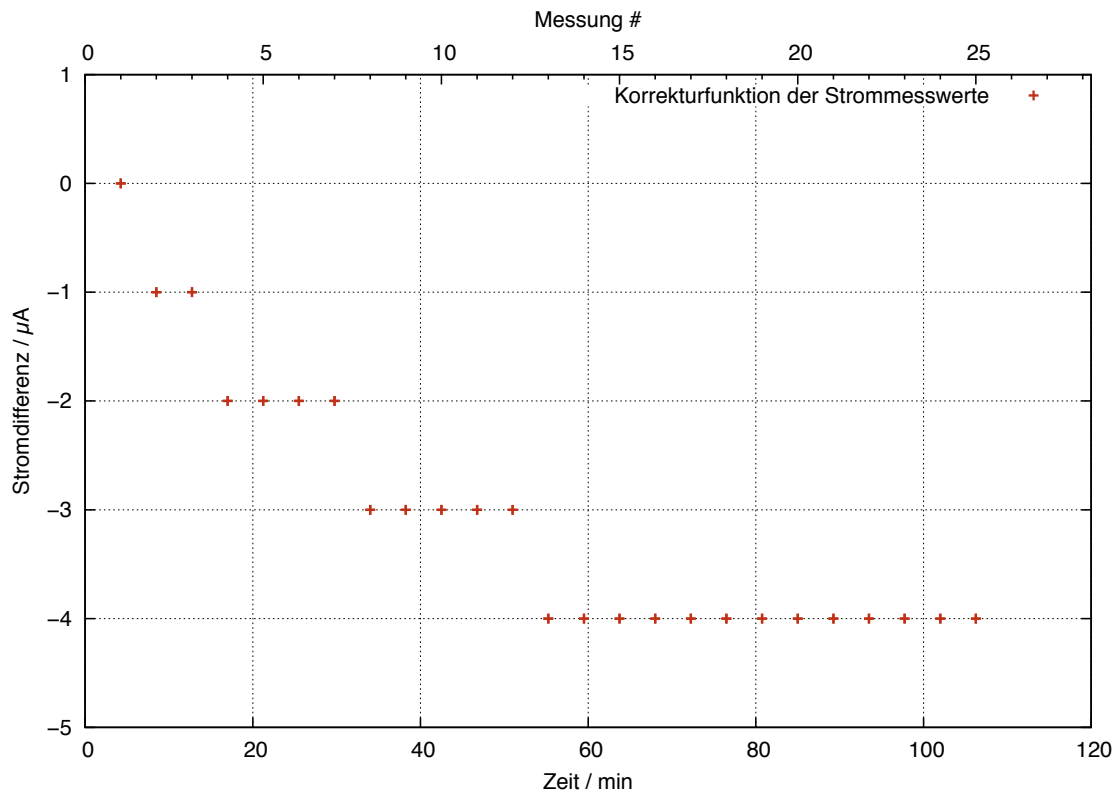


Abbildung A.2.: Die Korrekturfunktion der Strommesswerte wurde aus Abbildung 5.9 entnommen und dient der Anpassung der Messwerte in Abschnitt 5.3.3.

Literaturverzeichnis

- [Bar09] BARNSTEDT, J.: *Versuch MCP-Detektoren*. Fortgeschrittenen-Praktikum der Eberhard-Karls-Universität Tübingen, 2009. – Kepler-Zentrum für Astro- und Teilchen-Physik, Institut für Astronomie und Astrophysik
- [Bet09] BETTONI, D.: *The E835 experiment at Fermilab*. Springer Science, 2009
- [CER12] CERN, European Organization for Nuclear R.: *CERN experiments observe particle consistent with long-sought Higgs boson*. Pressemitteilung, 2012. – PR17.12 vom 04.07.2012
- [Dem09a] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 3, Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, 2009
- [Dem09b] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 4, Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. Springer, 2009
- [DGH⁺97] DOMBROWSKI, H. ; GRZONKA, D. ; HAMSINK, W. ; KHOUKAZ, A. ; LISTER, T. ; SANTO, R.: The Münster cluster target for the COSY-11 experiment. In: *Nucl. Instrum. Methods A* 626 (1997), S. 427–433. [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9474\(97\)00565-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9474(97)00565-4). – DOI 10.1016/S0375-9474(97)00565-4
- [FAI06] FAIR: *FAIR Baseline Technical Report*. 2006
- [FAI09] FAIR INTERNATIONAL STEERING COMMITTEE: *FAIR, Green Paper, The Modularized Start Version*. 2009
- [Gen08] GENERAL, S.: *Massenspektroskopische Untersuchung von Wasserstoffclustern am Münsteraner Cluster-Jet Target*. 2008
- [Ham06] HAMAMATSU: *MCP Assembly, Technical Information*. 2006
- [Her12] HERGEMÖLLER, A.-K.: *Masterarbeit*. 2012. – in Vorbereitung

- [Hig64a] HIGGS, P.W.: Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons. In: *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964), Oct, 508–509. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.508>. – DOI 10.1103/PhysRevLett.13.508
- [Hig64b] HIGGS, P.W.: Broken symmetries, massless particles and gauge fields. In: *Physics Letters* 12 (1964), Nr. 2, 132 - 133. [http://dx.doi.org/10.1016/0031-9163\(64\)91136-9](http://dx.doi.org/10.1016/0031-9163(64)91136-9). – DOI 10.1016/0031-9163(64)91136-9. – ISSN 0031-9163
- [JL10] JAKOB, G. ; LIZON, J.-L.: Advanced high-cooling power 2-stage Gifford-McMahon refrigerator systems. In: *Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation* 7739 (2010), 77393I. <http://dx.doi.org/10.1117/12.856231>. – DOI 10.1117/12.856231
- [Köh10] KÖHLER, E.: *Das Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2, ein Prototyp für das \bar{P} ANDA-Experiment, & die Analyse der Eigenschaften des Clusterstrahls.* 2010
- [Köh12] KÖHLER, E.: *Doktorarbeit.* 2012. – in Vorbereitung
- [Kuc94] KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik.* Fachbuchverlag Leipzig, 1994
- [Lak11] LAKE SHORE CRYOTRONICS, INC.: *User's Manual, Model 336, Temperature Controller.* 2011
- [Ley05] LEYBOLD VAKUUM: *Kryopumpen, Kryotechnik.* Auszug aus dem Leybold Vakuum Gesamtkatalog 2004, Ausgabe März 2005. – Produkt-Kapitel C12
- [Ott07] OTTE, J.: *Messung der Clustergeschwindigkeit und der Teilchendichte am Münsteraner Cluster-Jet Target.* 2007
- [PAN04] PANDA COLLABORATION: *Technical Progress Report for: \bar{P} ANDA, Strong Interaction Studies with Antiprotons.* 2004
- [PAN09] PANDA COLLABORATION: *Physics Performance Report for: \bar{P} ANDA, Strong Interaction Studies with Antiprotons.* 2009
- [PAN12a] PANDA COLLABORATION: *Technical Design Report for the \bar{P} ANDA Internal Targets: The Cluster-Jet Target and Developments for the Pellet Target.* 2012. – eingereicht bei FAIR
- [PAN12b] PANDA COLLABORATION: *Technical Design Report for the: \bar{P} ANDA Straw Tube Tracker.* 2012. – in Vorbereitung

- [Rau04] RAUSMANN, T.: *Arbeiten zum Aufbau eines Clustertargets für 4π -Experimente an Speicherringen und Untersuchungen zur Clusterproduktion*. 2004
- [TKOK11] TÄSCHNER, A. ; KÖHLER, E. ; ORTJOHANN, H.-W. ; KHOUKAZ, A.: High density cluster jet target for storage ring experiments. In: *Nucl. Instrum. Methods A* A660 (2011), S. 22–30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2011.09.024>. – DOI 10.1016/j.nima.2011.09.024
- [Täs12] TÄSCHNER, A.: *Doktorarbeit*. 2012. – in Vorbereitung
- [UO07] UMRATH, W. ; OERLIKON LEYBOLD VACUUM: *Grundlagen der Vakuumtechnik*. 2007
- [Wiz79] WIZA, J. L.: Microchannel plate detectors. In: *Nuclear Instruments and Methods* 162 (1979), Nr. 1-3, S. 587–601. [http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90734-1](http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X(79)90734-1). – DOI 10.1016/0029-554X(79)90734-1

Danksagung

Zum Abschluss möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mir bei dieser Arbeit und meinem bisherigen Studium besonders geholfen haben.

Prof. Dr. Alfons Khoukaz danke ich für die herzliche Aufnahme in die Arbeitsgruppe und die interessante Aufgabenstellung. Danke für die stetige Motivation und zahlreiche Ideen, die sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Dr. Christian Klein-Bösing danke ich sehr für die Übernahme des Koreferats.

Besonders herzlich möchte ich mich bei Esperanza Köhler bedanken. Es hat wirklich sehr viel Spaß gemacht, mit Dir zu arbeiten, zu blödeln und ganz manchmal auch Quatsch zu machen. Vielen Dank für die intensive Betreuung, für die super freundliche und offene Aufnahme in die Arbeitsgruppe und für die Korrektur dieser Arbeit.

Esperanza Köhler, Ann-Katrin Hergemöller, Alexander Täschner, Kay Demmich und Florian Bergmann danke ich für eine schöne Zeit sowie für die Hilfe und Unterstützung bei Fragestellungen jeder Art. Ihr seid super! Für eine wunderbare Atmosphäre innerhalb der Arbeitsgruppe bedanke ich mich des Weiteren bei Paul Goslawski, Malte Mielke, Michael Papenbrock, Daniel Schröer, Manuel

Perez-Mayo, Elena Ceballos Romero, Michael Evelt, Michele Neumann und Florian Schepers.

Ich danke dem immer gut gelaunten und oft grinsenden Daniel Bonaventura. Danke, dass ich mit jeder technischen Frage zu Dir kommen konnte und Du meine Arbeit sehr unterstützt hast. Jetzt weiß ich, wie sich 2 Nm anfühlen.

Bodo Kolipost, Roland Berendes, Marc Everding und Susanne Schriever möchte ich meinen Dank aussprechen für eine stets freundliche und angenehme Atmosphäre.

Der Feinmechanikwerkstatt unter der Leitung von Georg Bourichter danke ich für eine gute Zusammenarbeit.

Ich danke meinen Freunden Lorenz, Mathias, Hannes und Jana für eine tolle Studienzeit, viel Spaß und wirklich abgefahrene Augenblicke, die wir zusammen erlebt haben. Ihr habt mich oft dazu motiviert tolle Sachen mit Euch anzustellen und ich mag es, mit Euch zu tanzen, zu trampen (ohh war das kalt) oder einfach nur zusammen zu sein und den Moment zu genießen.

Ich danke meiner Familie für die Unterstützung während des Studiums und meines ganzen Lebens. Danke Mama und Papa, natürlich für die finanzielle Unterstützung, vor allem aber für viel Aufmerksamkeit die ihr mir zukommen lasst und Interesse an allem was ich mache. Es tut gut, dass ich mich auf Euch verlassen kann und ich weiß, dass Ihr 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 Angabe der Quelle deutlich gekennzeichnet.

Münster, den 06. August 2012

.....

(Alessandro Zannotti)