



Bachelorarbeit

Entwicklung einer Slow Control Software
zur Überwachung und Ansteuerung eines
Cluster-Jet Targets

*Development of a slow control software
for monitoring and remote controlling
a cluster-jet target*

vorgelegt von
Julian Sohn

— 23. Oktober 2013 —

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Erzeugung laserbeschleunigter Ionen	3
2.1 Laserinteraktion mit Targetmaterial	4
2.2 Neutronenstrahlerzeugung mit Ionenstrahlen	8
3 Cluster-Jet Target (MCT1S)	11
3.1 Aufbau des Targets	11
3.2 Die Clusterquelle	13
3.2.1 Clusterproduktion	15
3.3 Die Wechselwirkungskammer und der Auffänger	19
3.4 Das Vakuum- und Gassystem	20
4 Grundgerüst der Slow Control Software	23
4.1 Anforderungen und verwendete Programmiersprache	23
4.2 Die Benutzeroberfläche	25
4.3 Quellcodeüberblick	27
4.4 Ansprechen der Messgeräte	29
4.4.1 Serielle Kommunikation	29
4.4.2 Vakuummessgeräte	29
4.4.3 Gassysteminstrumente	31
4.5 Quasi-Echtzeitplotting	35
4.5.1 Speicherbereinigung	37
4.6 Weiterverarbeitung gemessener Daten	38
4.6.1 Messwertetabelle	38
4.6.2 Fehlerlogging	38
4.6.3 Webstatus	39

5 Implementation einer Temperaturregelung	41
5.1 Temperaturregelung	41
5.1.1 PID-Regler	41
5.1.2 Umsetzung	44
5.1.3 Notabschaltung	45
5.2 Kontrollmessungen	46
5.2.1 Ermittlung geeigneter Reglerparameter	46
5.2.2 Temperaturkorrektur	48
6 Betrieb des MCT1S	51
6.1 Abkühlverhalten und Reglerstabilität	51
6.2 Analyse des Clusterbetriebs	55
7 Zusammenfassung und Ausblick	59
Literaturverzeichnis	60
Danksagung	63
Eidesstattliche Erklärung	65

1 Einleitung

Der Einsatz von Neutronen bei Streuexperimenten in der modernen Material- und Biophysik ist von zentraler Bedeutung. Da Neutronen keine elektrische Ladung besitzen, findet bei Streuprozessen mit Materie ausschließlich eine Wechselwirkung mit den Kernen statt. Dies ermöglicht Strukturuntersuchungen vor allem in Bezug auf die Anordnung der Kerne in einem Festkörper. Das magnetische Moment von Neutronen erlaubt zudem die Untersuchung der magnetischen Ordnung eines Materials. Abhängig von der kinetischen Energie ist es möglich, die Absorptionswahrscheinlichkeit der Neutronen so weit zu mindern, dass sogar massive Materialen durchdringen werden können. Dadurch besteht die Möglichkeit, beispielsweise Materialfehler oder Alterserscheinungen zu identifizieren. Es gibt bereits kompakte, kommerzielle Neutronenquellen, bei denen sich allerdings die Neutronen isotrop ausbreiten und dadurch ein nicht unerheblicher Aufwand zur Abschirmung nötig ist. Neben Kernreaktoren gibt es die Möglichkeit, Neutronenstrahlen mit den beschleunigten Ionen eines Teilchenbeschleunigers, z.B. eines Zyklotrons, zu erzeugen. Diese sind allerdings, unter anderem wegen ihrer räumlichen Ausmaße, ebenfalls an recht wenigen Standorten vorhanden und häufig ausschließlich für medizinische Zwecke in Benutzung. Als Alternative kristallisiert sich aktuell eine neue, deutlich platzsparendere Methode heraus: Die Erzeugung von Ionenstrahlen durch Laserbeschleunigung. Unter Verwendung von laserbeschleunigten Ionenstrahlen wären ebenfalls kompakte, aber gerichtete Neutronenquellen für Experimente in den erwähnten Bereichen möglich.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der laserbeschleunigten Ionenstrahlen könnte in Zukunft auch der Ersatz von medizinisch verwendeten Zyklotronen sein. Hiermit sind vor allem Zyklotrone zur Erzeugung von Ionenstrahlen mit klar definierter Eindringtiefe in Gewebe für die präzise Strahlentherapie in der Onkologie gemeint. Die optischen Strahlführungsmechanismen für einen Laser wären hier deutlich günstiger und einfacher zu installieren, als Ablenk Magnete für Ionen [Kli13].

Bisher werden hauptsächlich Experimente mit dünnen Goldfolientargets durch-

geführt. Hierbei wechselwirkt ein ultrakurzpulsiger Hochleistungslaser mit der Goldfolie und löst Elektronen der Atome heraus. Zwischen dem herausgelösten Elektronenpaket und den Ionen des Materials entsteht ein so starkes elektrisches Feld, dass selbst die Ionen mit einer geringen Verzögerung aus dem Material gezogen werden. Allerdings ist der Ionennachschub endlich, da der Laserpuls das Material zerstört und die Targetfolien nach jedem Laserpuls ausgetauscht werden müssen. Gas-Jet Targets hätten diesen Nachteil nicht, aber deren Dichte bzw. das resultierende elektrische Feld reicht nicht aus, um Ionen bzw. Protonen zu beschleunigen. Eine Lösungsmöglichkeit bietet das Cluster-Jet Target. Cluster-Jet Targets werden bisher als interne Targets bei Fixed Target Experimenten wie z.B. COSY-11 (**C**Ooler **S**Ynchrotron), ANKE (**A**pparatus for **S**tudies of **N**ucleon and **K**aon **E**jectiles) [Dom97] und demnächst auch **P**ANDA (**A**nti**P**roton **A**nihilations at **D**Armstadt) [Täs11] eingesetzt. Bei diesem Targettyp wird gasförmiger Wasserstoff bei geringen Temperaturen (im Bereich von 20 K) und hohem Druck (<18 bar) durch eine spezielle Düse geführt, wodurch sich Ansammlungen von Teilchen zu Quasi-Festkörpern, den Clustern, bilden. Aufgrund der zeitlich konstanten Wasserstoffzufuhr bzw. des zeitlich konstanten Clusterstrahls ist bei jedem neuen Laserpuls neues Targetmaterial vorhanden. Die Cluster besitzen eine Relativbewegung senkrecht zu dem Laserpuls, diese kann aber im Hinblick auf Pulslänge und Intensität als stationär angesehen werden.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit und der Masterarbeit von S. Grieser wurde ein Cluster-Jet Target für die laserinduzierte Ionenbeschleunigung an einem Experiment des **I**nstituts für **L**aser und **P**lasma**p**hysik ILPP in Düsseldorf aufgebaut. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Erprobung einer sogenannten Slow Control Software. Diese überwacht und zeichnet beispielsweise verschiedenste Parameter des Gas- und Vakuumsystems auf. Zudem wird die Ansteuerung von Druck und Temperatur des Targetmaterials ermöglicht, die wesentlich für die Eigenschaften (Geschwindigkeit, Clustergröße, Dichte) der Cluster bzw. des Clusterstrahls sind. Eine implementierte automatische Temperaturregelung sorgt zudem für die Stabilität des Clusterstrahls. Es werden zunächst die gängigen Beschleunigungsmechanismen für Ionen, dann der Aufbau sowie die Funktion des Cluster Jet-Targets erläutert und im Folgenden die entwickelte Slow Control Software beschrieben. Abschließend wird anhand von Messungen die korrekte Funktion der Programmbestandteile untersucht und ein Einfluss bestimmter Geräte auf den Clusterbetrieb validiert sowie der Betrieb des Targets selbst erläutert.

2 Erzeugung laserbeschleunigter Ionen

Die laserinduzierte Beschleunigung von Ionen ermöglicht die kompakte Bereitstellung von Ionenstrahlen und gerichteten Neutronenquellen. Bei der Wechselwirkung eines Hochleistungslasers mit einem Target wird ein Plasma erzeugt. Die freien Ladungsträger innerhalb dieses Plasmas können durch verschiedene Mechanismen beschleunigt werden, die von der Leistungsfähigkeit des Lasers und der Dichte des Targets abhängen. Die Experimente zur alternativen Ionenstrahlerzeugung werden derzeit mit Goldfolientargets durchgeführt, deren entscheidender Nachteil es ist, dass das Protonen liefernde Material (z.B. eine wenige μm dicke Goldfolie) beim Laserbeschuss zerstört wird. Alternativ könnte ein Gas-Jet Target eingesetzt werden, das kontinuierlich Targetmaterial nachliefert, jedoch reicht die Dichte bzw. die Stärke des elektrischen Feldes innerhalb des Plasmas nicht aus, um Ionen zu beschleunigen. Cluster-Jet Targets hingegen liefern einen kontinuierlichen Targetstrahl mit Flächendichten im Bereich von über 10^{15} Atomen/ cm^2 [Täs11] und eignen sich daher optimal für den Einsatz an Laserexperimenten.

Am ILPP in Düsseldorf ist derzeit ein Laser mit rund $200 \mu\text{J}$ Energiedeposition am Target und demnächst der 200 TW Darcturus Hochleistungslaser verfügbar [BG13], an denen zunächst Untersuchungen bezüglich der gerichteten Neutronenpulse mit einem Cluster-Jet Target durchgeführt werden sollen. Das dafür vorgesehene Cluster-Jet Target wurde an der Westfälischen Wilhelms–Universität Münster im Rahmen dieser Bachelorarbeit und Masterarbeit von S. Grieser aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen.

Bevor im Folgenden das geplante Prinzip der Neutronenstrahlerzeugung erklärt wird, ist es wichtig, zuerst auf die genauen Vorgänge bei der Erzeugung von Ionenstrahlen mittels eines Lasers einzugehen.

2.1 Laserinteraktion mit Targetmaterial

Um Ionen direkt zu beschleunigen sind Laserintensitäten von mehr als 10^{24} W/cm^2 notwendig. Derzeit erreichbare Laserintensitäten liegen mindestens drei Größenordnungen darunter [Rei12]. Die Beschleunigung muss demnach zweistufig erfolgen. Bei der Interaktion eines Hochleistungslasers mit dem Targetmaterial wird dieses zunächst ionisiert, indem Valenzelektronen mehrere Photonen absorbieren (Photoeffekt) oder der elektrische Feldanteil des Lasers das Coulombfeld verzerrt und Elektronen entweichen können. Darauf folgend bildet sich ein starkes elektrisches Feld zwischen den herausgelösten Elektronen und den verbleibenden Protonen, sodass diese ebenfalls beschleunigt werden [Sch08] [Rei12]. In Abb. 2.1 wird dieser Vorgang schematisch gezeigt. Es existieren unterschiedliche Verfahren zur Erzeugung der Ionenstrahlen, die hauptsächlich von der Targetart/-beschaffenheit und der Intensität und Polarisation des Lasers abhängig sind.

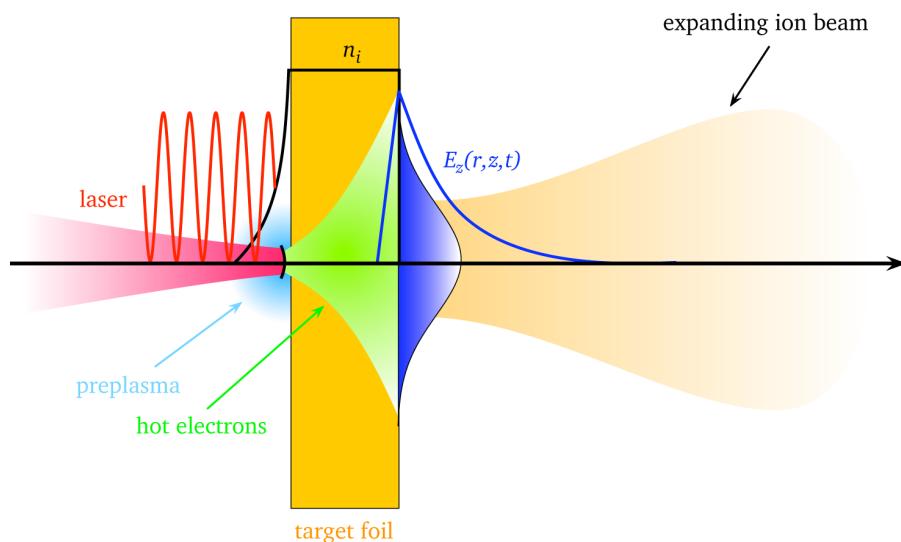


Abbildung 2.1: Grundprinzip der Laserbeschleunigung von Ionen. Der Prepuls des Lasers erzeugt ein Preplasma, d.h. trennt Ionen und Elektronen auf der Vorderseite des Targetmaterials der Dichte n_i , sodass der Hauptanteil des Pulses damit wechselwirken und somit heiße Elektronen¹ in Vorförwärtsrichtung beschleunigen kann. Die durch die Elektronen entstandene Ladungstrennung E_z beschleunigt die zurückgebliebenen Ionen [Sch08].

¹Elektronen mit einer mittleren Energie, die über dem entsprechenden Gleichgewichtswert der Gittertemperatur liegt [Tech1].

Bei dem TNSA („Target Normal Sheath Acceleration“)-Prinzip, dargestellt in Abb. 2.2, wechselwirkt ein linear polarisierter Laserstrahl mit einem Folientarget. Bei dieser Polarisation werden die Elektronen im entstandenen Plasma aufgeheizt und bilden die dichteste Ansammlung („sheath“) in Vorwärtsrichtung hinter dem Target. Die Ionen werden dementsprechend senkrecht („normal“) zum Targetmaterial beschleunigt. Allerdings oszillieren ebenfalls herausgelöste Elektronen senkrecht und in Rückwärtsrichtung zum Laser, da sie durch das Magnetfeld des Lasers und der propagierenden Elektronen Lorentzkräfte erfahren. Diese Elektronen heizen das Plasma zusätzlich auf, was zu einem recht breiten Energiespektrum von bis zu 100% des maximalen Energiewertes der Ionen führt [Sch08] [Rei12].

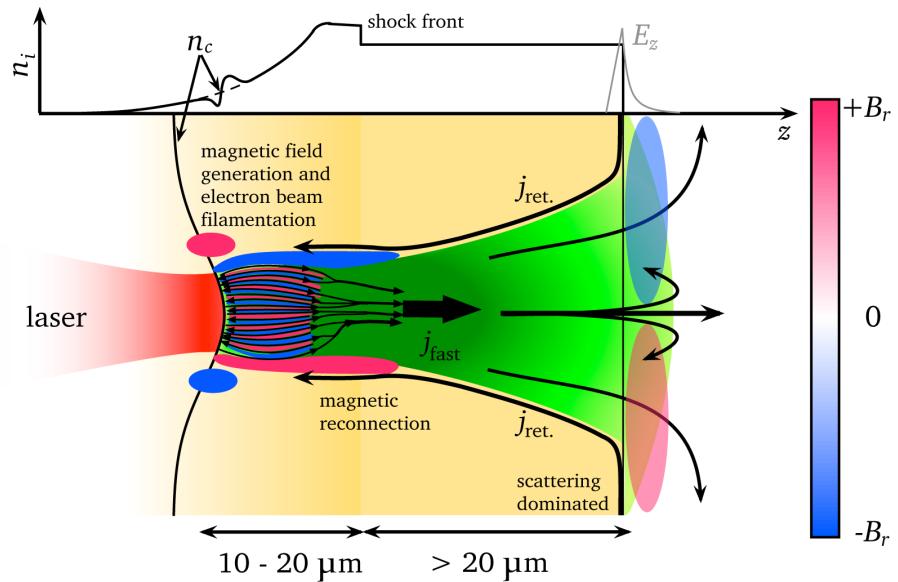


Abbildung 2.2: Der Strahlungsdruck bzw. die ponderomotiven² Kräfte des Lasers verdichten das Targetmaterial bis zur kritischen Dichte n_c (oben). In dem dahinter entstandenen Plasma bewegen sich die Elektronen j_{fast} mit hoher Geschwindigkeit entlang der Schockwelle zur Rückseite des Targets. Der Elektronenstrom erzeugt ein magnetisches Feld B_r , das zu entgegengesetzt strömenden Elektronen $j_{\text{ret.}}$ führt, welche das Plasma weiter aufheizen. Stöße der propagierenden Elektronen mit dem Material führen zu einer Verbreiterung des Elektronenstroms, der nach Verlassen des Targets den „Sheath“ bildet und durch die Ladungstrennung E_z die Ionen beschleunigt [Sch08].

²Zeitlich gemittelte Kräfte, die in einem räumlich inhomogenen elektromagnetischen Feld auf Elektronen wirken [BF99].

Wie bereits beschrieben, reichen die Laserintensitäten bislang nicht aus, um Ionen direkt zu beschleunigen. Im Gegensatz zu TNSA ist beim RPA („**R**adiation **P**ressure **A**cceleration“)-Prinzip, dargestellt in Abb. 2.3, die Polarisation des Lasers anders. Mit Hilfe eines zirkular polarisierten Lasers lässt sich das Aufheizen des Plasmas verringern, da fast keine Elektronen durch den Laser Lorentzkräfte erfahren [Rei12]. Die beschleunigende Elektronenansammlung befindet sich in diesem Fall innerhalb des Materials. Es bewegt sich gewissermaßen eine Schicht aus Elektronen und eine aus Ionen als Ganzes zur Rückseite des Targets. Insgesamt erhält man im Vergleich zu TNSA ein schmaleres Energiespektrum bei höheren Ionenenergien, welches aber von Laserpuls zu Laserpuls variiert und mit herkömmlichen Detektoren noch nicht eindeutig beziffert werden kann [Rei12].

Die Interaktion des Lasers mit einem Cluster-Jet Target unterscheidet sich von der des Lasers mit Folientargets. Einzelne Cluster besitzen einen Durchmesser von weniger als einem μm , was typischerweise deutlich geringer als der Durchmesser

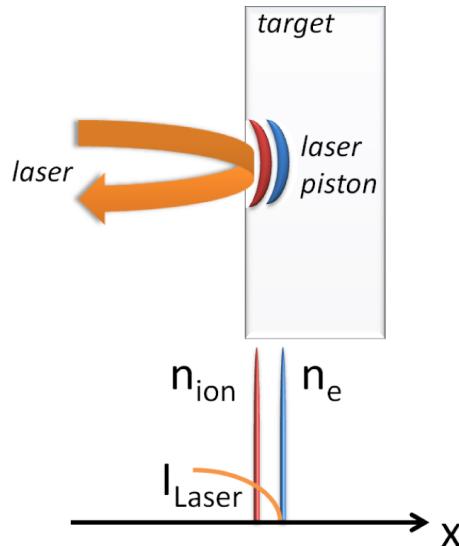


Abbildung 2.3: Die ponderomotiven Kräfte des Lasers erzeugen eine Elektron-Ion-Doppelschicht n_{ion} , n_e („*laser piston*“), die sich in Vorwärtsrichtung durch das Targetmaterial bewegt. Die Intensität des Lasers I_{Laser} nimmt mit zunehmender Eindringtiefe x solange ab, bis der Puls an der Elektronenschicht reflektiert wird. Die Entstehung von heißen und in Rückwärtsrichtung strömender Elektronen, die ebenfalls eine Aufheizung des Targetmaterials unterstützen, wird durch die zirkulare Polarisation des Lasers verringert [Rei12].

eines vollständig kollimierten Lasers ist [Gre13]. Die Menge an beschleunigbaren Ionen hängt also stark von der tatsächlichen Größe und der Anzahl der Cluster ab, die vom Laser getroffen werden. Erste Schätzungen gehen von rund 100 pro Laserpuls getroffenen Clustern aus [BG13]. In Abb. 2.4 ist eine Simulation einer Laser-Protonenansammlungsinteraktion dargestellt, die vergleichbar mit einer Laser-Clusterinteraktion ist. Zu sehen ist, wie ein Laserpuls die Protonenansammlung in Zeitabständen von 50 fs aufweitet.

Wenn der Laser einen Cluster trifft, können zwei verschiedene Vorgänge, die sozusagen dem TNSA und RPA entsprechen, stattfinden. Auf der einen Seite können die vom Strahlungsdruck getroffenen Elektronen die Clusterstruktur

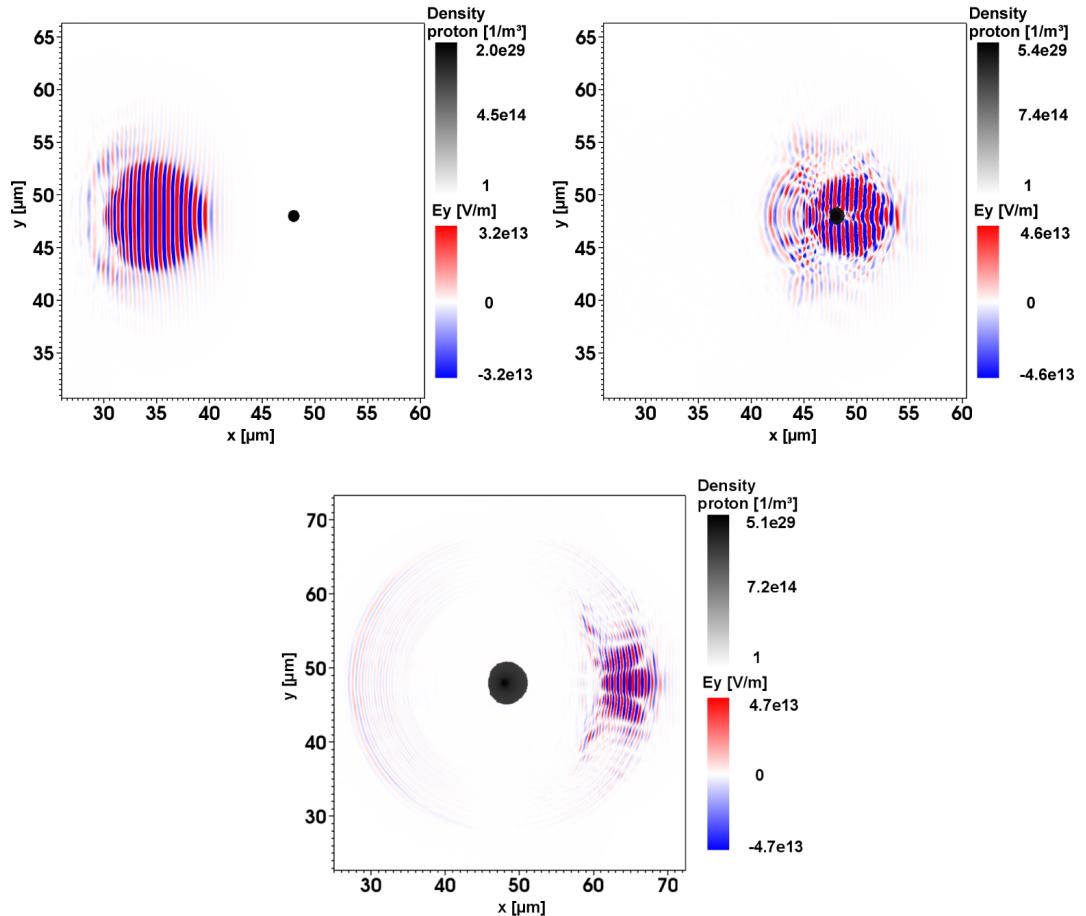


Abbildung 2.4: Simulation einer Laser-Protonenansammlungsinteraktion nach 100 fs, 150 fs und 200 fs mit EPOCH an JUROPA. Dargestellt sind die E-Feldstärken des Lasers (farbig) und die Protonendichte (schwarz) zu den jeweiligen Zeitpunkten. Erkennbar ist eine Aufweitung der Protonenansammlung [Gre13].

vergrößern und direkt die Protonen mitziehen (vgl. RPA). Auf der anderen Seite kann sich aus den angeregten Elektronen ein Plasma bilden, das ebenfalls die Clusterstruktur vergrößert [Gre13]. Die Ionen werden wiederum durch die entstehende Ladungstrennung zwischen herausgeschlagenen Elektronen und den innenliegenden Ionen beschleunigt.

2.2 Neutronenstrahlerzeugung mit Ionenstrahlen

Die Neutronenstrahlerzeugung erfolgt durch die Wechselwirkung eines laserinduzierten Ionenstrahls mit einem Berylliumtarget (s. Abb 2.5). Dieses Target hat sich bei einem früheren Experiment bereits als guter Konverter erwiesen [Rot13]. Die Reaktionen ${}^9\text{Be}(d,n)$, ${}^9\text{Be}(p,n)$ und (d,np) , der *deuteron breakup*, wandeln hier die Ionen in Neutronen um. Beryllium eignet sich gerade deshalb besonders,

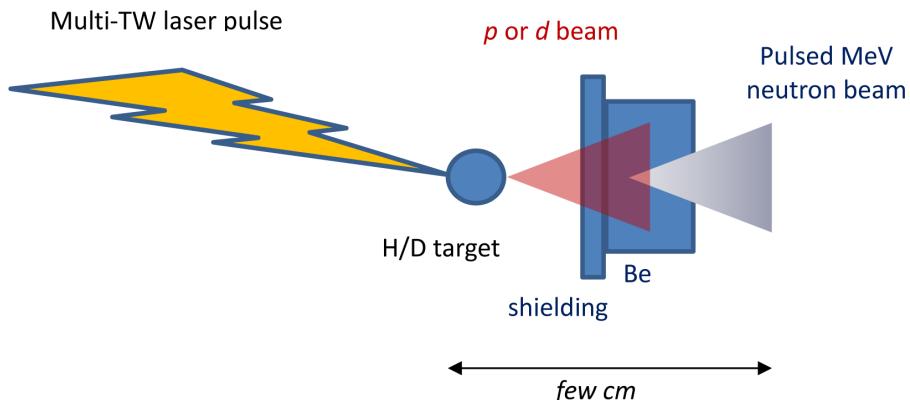


Abbildung 2.5: Neutronenstrahlerzeugung. Die durch den gepulsten Laserbe- schuss beschleunigten Ionen treffen auf ein Berylliumtarget, wo durch die Reaktionen ${}^9\text{Be}(d,n)$, ${}^9\text{Be}(p,n)$ und (d,np) ein hochenergetischer, gepulster Neutronenstrahl ensteht. Eine Ab- schirmung aus Kupfer und Plastik stoppt Plasmreste [Büs13].

da es einen hohen Wirkungsquerschnitt zur Neutronenproduktion aufweist, aber gleichzeitig die Entstehung von hochenergetischer Bremsstrahlung minimiert. Eine sandwichartige Kombination aus dünnen Kupfer- und Plastikplatten dient zur Abschirmung der mit dem Ionenstrahl austretenden Plasmreste [Rot13]. Am Experimentaufbau am ILPP in Düsseldorf werden die zur Neutronenstrahlerzeugung benötigten Ionenstrahlen zukünftig durch die Wechselwirkung eines Lasers mit einem Cluster-Jet Target induziert.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Entwicklung einer Software zur Überwachung und Ansteuerung dieses Targets, um einen optimalen Langzeitbetrieb am ILPP zu gewährleisten. Bevor auf die speziell entwickelte Slow Control Software eingegangen wird, werden die wesentlichen Komponenten des Targets im folgenden Kapitel näher beschrieben.

3 Cluster-Jet Target (MCT1S)

Im Frühjahr diesen Jahres wurde an der Westfälischen Wilhelms-Universität in Münster das Cluster-Jet Target MCT1S aufgebaut. Nach bestandenen Leck- und Überdrucktests bis 18 bar konnte das Target mit Erfolg in Betrieb genommen werden. Eingesetzt wird dieses Target zukünftig am Experimentaufbau zur Erzeugung gerichteter Ionenstrahlen am ILPP in Düsseldorf. Durch die Bereitstellung eines kontinuierlichen Clusterstrahls mit Dichten im Bereich von 10^{15} Atomen/cm² [Täs11] stellt das MCT1S eine optimale Alternative zu den bisherig genutzten Folien bzw. Gas-Jet Targets dar. Im Folgenden werden der aktuelle Aufbau des MCT1S, die Entstehung der Cluster und das Vakuumsystem beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 4 und 5 die Entwicklung und Implementierung einer Slow Control Software präsentiert, die essentiell für den Targetbetrieb ist und den Fokus dieser Bachelorarbeit bildet.

3.1 Aufbau des Targets

Der komplette Targetaufbau, zu sehen in Abb. 3.1, setzt sich aus zwei Hauptkomponenten zusammen. Zum einen aus dem Quellwagen, auf dem sich die Quelle, die Wechselwirkungskammer und angeschlossene Turbopumpen befinden und zum anderen aus dem Pumpstand, der aus einer Vorpumpe und zwei Rootspumpen besteht. Details zum Gas- bzw. Vakuumsystem werden in Abschnitt 3.4 näher erläutert. Abhängig vom Gasfluss in die Targetquelle kann das Vakuumsystem erweitert werden, beispielsweise durch eine weitere Rootspumpe (s. Zusatzpumpstand in Abb. 3.1). Der Pumpstand wird über einen Wellbalg mit dem Quellwagen verbunden, um mögliche Vibrationen, verursacht durch den Betrieb der Roots- und Vorpumpen, abzufangen. Beide Komponenten sind beweglich auf Rollen montiert. Der Pumpstand wird auf zwei fest angebrachten Schienen geführt, der Quellwagen hingegen ist, zwecks besserer Transportabilität, auf frei

beweglichen Rollen mit Feststellbremsen montiert. Durch die kompakte Bauweise der beiden Hauptkomponenten besteht neben der Integration des Quellwagens auch die Möglichkeit, den Pumpstand am Experimentaufbau am ILPP bei Bedarf einzusetzen.

Der Quellwagen enthält zudem sämtliches weiteres Zubehör, wie in Abb. 3.2 gezeigt ist. Angefangen bei dem Kompressor für den Kaltkopf (A), den Ausleseeinheiten für die Messgeräte (B), über das Gasreinigungsaggregat (C) bis hin zu dem PC (D), auf dem die Slow Control Software zur Überwachung und Ansteuerung des Targets, die im Zusammenhang dieser Arbeit entwickelt wurde, installiert ist. Das Verstauen aller nötigen Komponenten auf dem Quellwagen hat ebenfalls den Hintergrund, einen einfachen Ortswechsel zum Experiment in Düsseldorf zu gewährleisten.

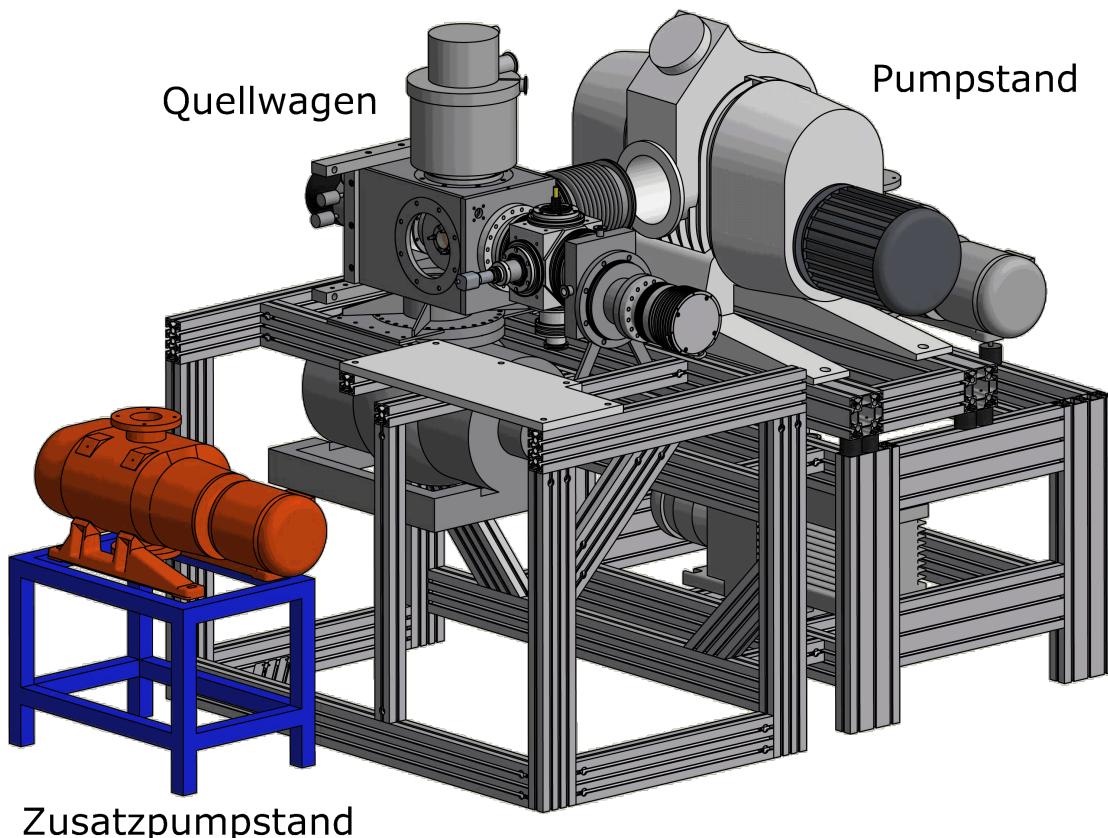


Abbildung 3.1: CAD-Zeichnung des gesamten Clustertargets. Links ist eine Zusatzpumpe installiert, mittig befindet sich der Quellwagen und rechts ist der zugehörige Hauptpumpstand abgebildet. Die Abmessungen betragen (exkl. Zusatzpumpstand) rund $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ (Zeichnung: D. Bonaventura, ergänzt).

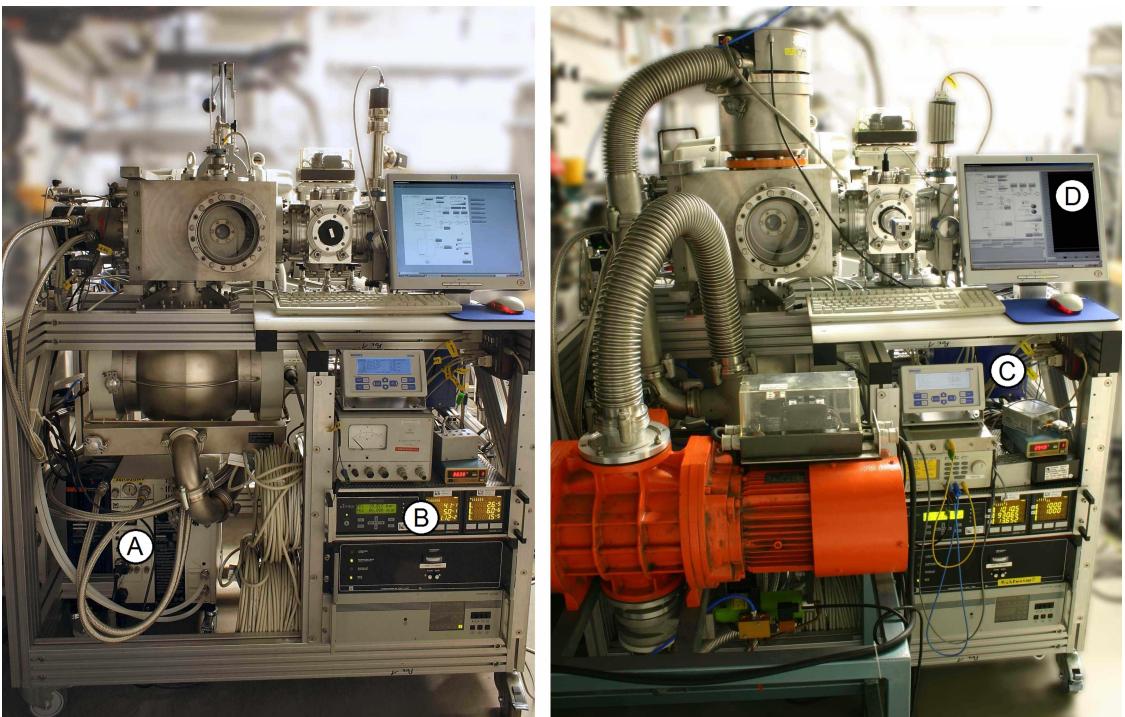


Abbildung 3.2: Links: Der aktuelle Aufbau des Clustertargets mit dem Kompressor für den Kaltkopf (A), den Ausleseeinheiten für die Messgeräte (B), dem H₂-Reiniger (C) und dem Monitor des Mess-PCs (D). Im Hintergrund (nicht sichtbar) befindet sich der Hauptpumpstand. Rechts: Version des Aufbaus mit integrierter Zusatzpumpe (Fotos: W. Hassenmeier, bearbeitet).

3.2 Die Clusterquelle

Herzstück des Cluster-Jet Targets MCT1S bildet die Clusterquelle. Diese stammt ursprünglich vom Cluster-Jet Target MCT1 [Täs13], dem Vorgängermodell des PANDA-Target Prototypen. In Abb. 3.3 ist die verwendete Quelle im Detail abgebildet. Bestehend aus einem Kaltkopf mit Gaskühlssystem mit zwei sich anschließenden Vakuumkammern. Das verwendete Targetgas, in diesem Fall Wasserstoff, strömt über das Gaskühlssystem durch die Lavaldüse in eine Vakuumkammer, die Skimmerkammer. Dort kondensiert ein geringer Teil des Gases zu Clustern. Eine detaillierte Beschreibung der Clusterproduktion ist im nächsten Abschnitt gegeben. Als Kaltkopf kommt der zweistufige RGD 1245 der Firma Leybold zum Einsatz, der auf dem Gifford-McMahon-Prinzip beruht [LbV96]. Die Kühlleistung beträgt etwa 45 W an der warmen Stufe bei einer Temperatur von 80 K und etwa 12 W an der kalten Stufe bei 20 K [LbV96].

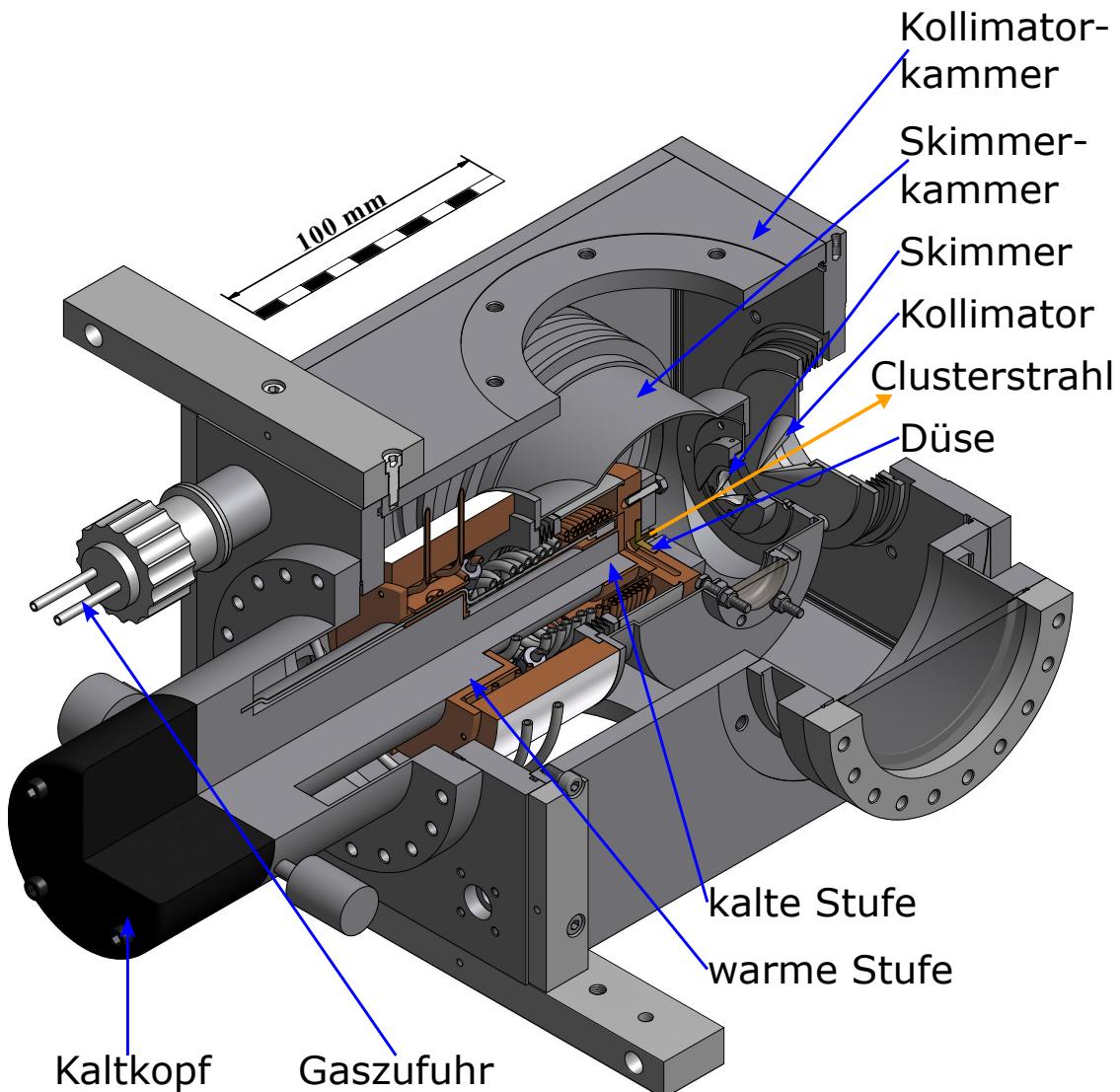


Abbildung 3.3: CAD-Zeichnung der Clusterquelle bestehend aus Kaltkopf sowie Skimmer- und Kollimatorkammer. Die Skimmerkammer ist über einen Wellbalg mit dem Außengehäuse verbunden, wo der Pumpstand angrenzt. Der untere rechte Flansch der Kollimatorkammer und die Skimmerkammer enthalten ein Sichtfenster zur Beobachtung des Clusterstrahls kurz nach dessen Entstehung [Täs13].

Die Quelle arbeitet mit einem differentiellen Pumpsystem. In der ersten Vakuumkammer, der Skimmerkammer, findet der Clusterproduktionsprozeß statt. Der Gasfluss in diese Kammer beträgt bei höchsten Dichten $2 \ell/\text{min}$. Um den Clusterstrahl vom Restgas zu trennen, wird der Clusterstrahl durch den sogenannten Skimmer in die anschließende Kollimatorkammer extrahiert. In der Kollimatorkammer sorgt

eine weitere Blende, der Kollimator, für die Definition der Größe und Form des Clusterstrahls. Zudem ist die Targetquelle so aufgebaut, dass das Vakuum der Kollimatorkammer (Drücke im Bereich 10^{-4} mbar) das Gaskühlsystem und die Skimmerkammer (Drücke im Bereich 10^{-1} mbar) umgibt und deshalb gleichzeitig als Stützvakuum dient. Somit können Temperaturen an der Lavaldüse von bis zu 20 K erreicht werden. An der Skimmer- und Kollimatorkammer befinden sich zwei direkt hintereinander liegende Sichtfenster, so dass der Clusterstrahl direkt nach seiner Entstehung beobachtet werden kann (s. Abb. 3.4). Der Clusterstrahl lässt sich hier von vier weißen und vier infraroten LEDs beleuchten. Ein weiteres nützliches Bauteil ist die Düsenklappe, die ebenfalls in der Skimmerkammer angebracht ist und von außen verstellt werden kann. Wird der Schieber in den Strahlgang geschoben, so platzen die Cluster an ihm auf, werden von den Pumpen abgesaugt und am Eintreten in die Kollimatorkammer und sich anschließende Wechselwirkungskammer (s. Abschnitt 3.3) gehindert.

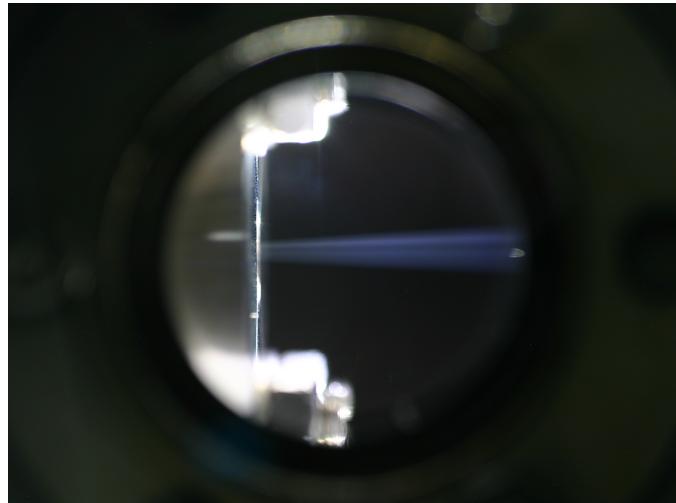


Abbildung 3.4: Clusterstrahl in der Skimmerkammer nach dem Austritt aus der Lavaldüse (links) trifft auf die Skimmerspitze (rechts) (Foto: W. Hassenmeier).

3.2.1 Clusterproduktion

Das an dem Kaltkopf anliegende Gaskühlsystem ist in Abb. 3.5 detailliert dargestellt. Mit dem Cluster-Jet Target MCT1S wird ein Bereich nahe der Dampfdruckkurve von H₂ (s. Abb. 3.6) erreicht, der bei sehr geringen Temperaturen liegt

und sich deshalb für die Erzeugung von Clustern höchster Dichte besonders eignet [Köh10] [Täs13]. Das Gas wird dazu durch sehr gut wärmeleitende Kupferleitungen, die durch Verlötzung und eine Indiumdichtung direkt mit der warmen Stufe des Kaltkopfes in Verbindung stehen, vorgekühlt. Damit auf dem Weg zur kalten Stufe nicht zuviel Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, bestehen dort die Leitungen aus um eine Größenordnung weniger gut wärmeleitendem Edelstahl [Täs13]. An der kalten Stufe wird wieder das gleiche Prinzip mit Kupferleitungen

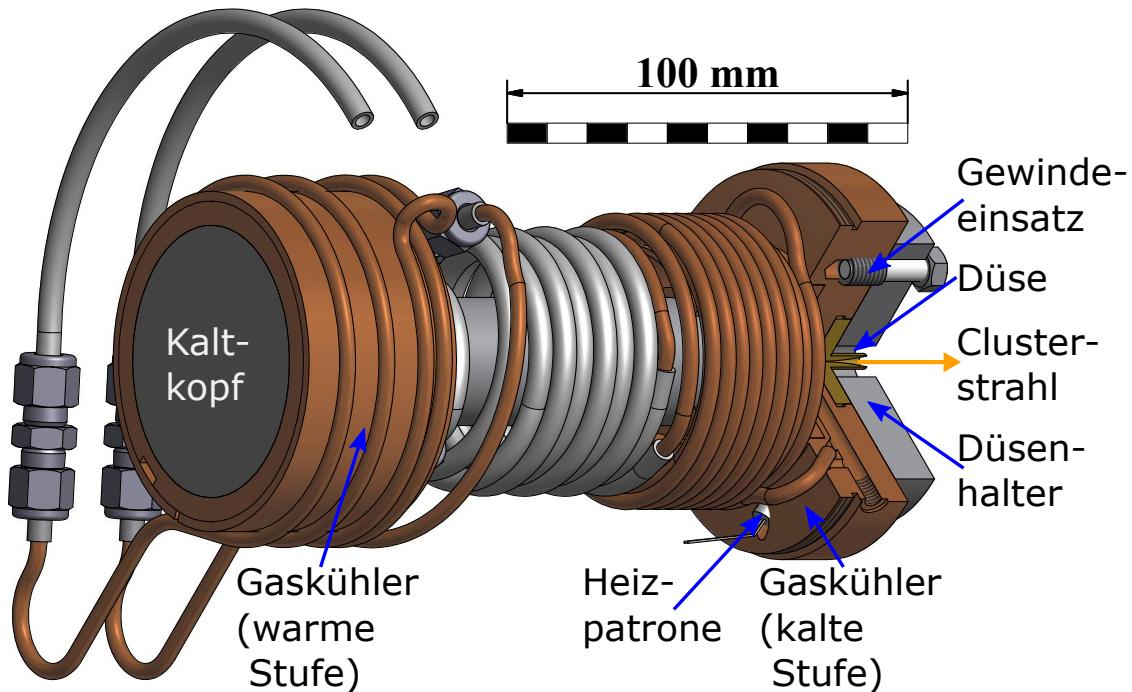


Abbildung 3.5: CAD-Zeichnung des Verwendeten Systems zur Gaskühlung. Die Gasleitungen sind mit den Kupferummantelungen der warmen und kalten Stufe des Kaltkopfs direkt verlötet. Die Rückleitung wird zur Druckmessung an der Lavaldüse und zum Ablassen von möglichem Überdruck benötigt [Täs13].

angewendet, um das Gas auf die endgültige Temperatur zu kühlen. Die Lavaldüse ist ebenfalls mit einer Indiumdichtung in Kontakt mit der kalten Stufe gebracht. Eine Gasrückleitung erlaubt das Messen des Drucks an der Düse mit einem MKS Baratron und ein Ablassen von möglichem Überdruck. Ein wichtiges Bauteil ist die an der kalten Stufe sitzende Heizpatrone mit bis zu 50 W Heizleistung, über die sich die Temperatur dort verändern lässt.

Bei der Clusterproduktion, der Erzeugung von Quasi-Festkörpern, wird sich zunutze gemacht, dass ein Volumenanstieg bei gleichbleibendem oder abfallendem

Druck zu einer Verringerung der Temperatur führt (adiabatische Expansion). Die H₂-Moleküle weisen vor der Laval Düse, die aus einem konvergenten Einlass und

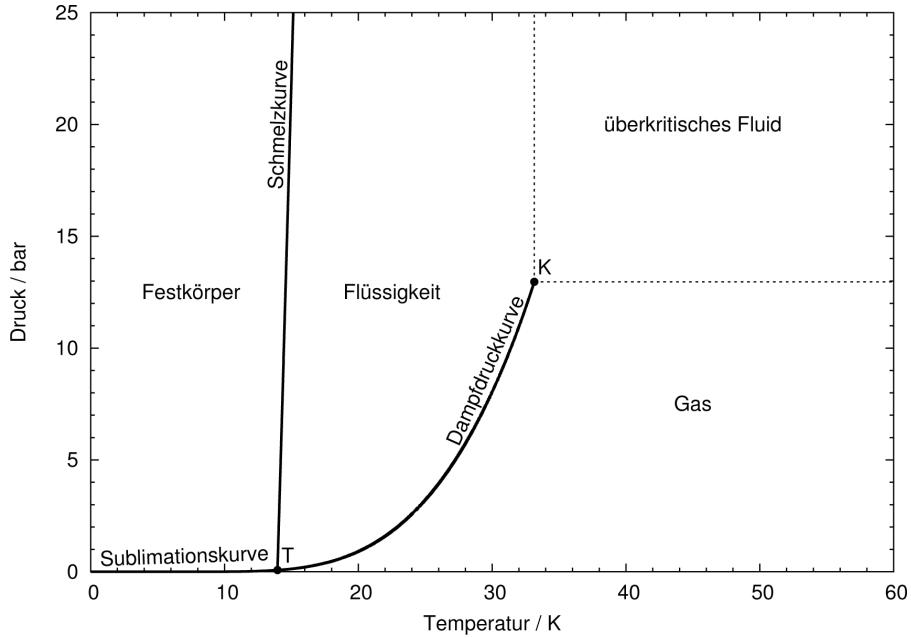


Abbildung 3.6: Phasendiagramm von Wasserstoff. Abgebildet sind der kritische Punkt K, der Tripelpunkt T, die Sublimationskurve, die Schmelzkurve und die Dampfdruckkurve. Der Arbeitsbereich des MCT1S liegt bei 20 – 50 K und Drücken < 18 bar [Täs13].

hinter dem engsten Querschnitt aus einem divergenten Auslassbereich besteht, eine zufällige Geschwindigkeitsverteilung auf, wie in Abb. 3.7 zu erkennen. Der vergleichsweise hohe Einlassdruck von bis zu 18 bar und die Verengung des Düsenquerschnitts auf aktuell etwa 20 µm führt zu Stößen zwischen den Molekülen und einer gewissen Homogenität der Geschwindigkeitsverteilung, weshalb sich Kondensationskeime bilden. Im weiteren Verlauf durch die Laval Düse verbreitert sich der Querschnitt wieder, was einer Volumenerhöhung entspricht. Zusätzlich beträgt der Druck in der sich anschließenden Skimmerkammer rund 10^{-1} mbar (im Betrieb höchster Dichte). Insgesamt können dadurch einzelne Keime zu Clustern kondensieren. Einmal kondensiert halten Van-der-Waals-Kräfte die Cluster zusammen [Pau00]. Das Gemisch aus Gas und Clustern bewegt sich von der Laval Düse mit hoher Geschwindigkeit (200 – 1000 m/s) [Köh10] [Täs13] auf den konkav geformten Skimmer zu, an dessen Oberfläche die Cluster mit abweichender Flugbahn aufplatzen und das Restgas von den Pumpen abgesaugt wird. Der aktuell verwendete Skimmer hat einen Öffnungs durchmesser von 0,7 mm. Passierende

Cluster treten in die Kollimatorkammer ein, wo ein noch geringerer Druck (weniger als 10^{-4} mbar im Betrieb höchster Dichte) aufgrund des differentiellen Pumpsystems und geringeren Gasflusses herrscht. Der Kollimator dient dazu, den Clusterstrahl in Bezug auf Größe und Form zu definieren. Der Öffnungs durchmesser des aktuell eingesetzten Kollimators beträgt 0,7 mm. Die Clusterproduktion, Extraktion und Definition sind schematisch dargestellt in Abb. 3.7.

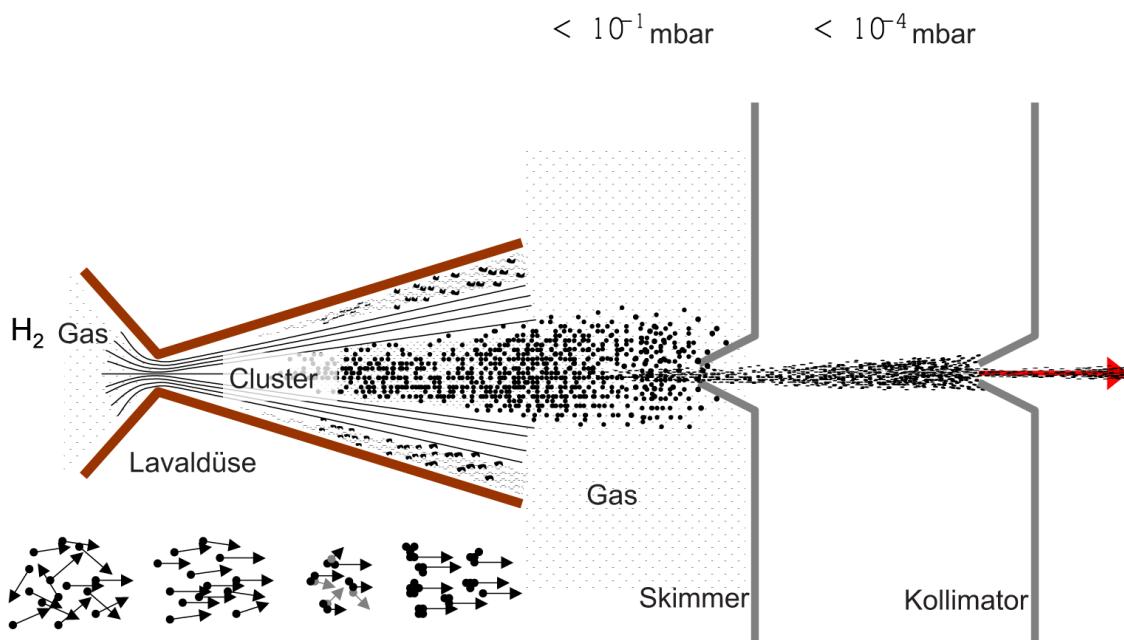


Abbildung 3.7: Clusterproduktion. Durch den Volumenanstieg auf der Ausgangsseite der Lavaldüse können Kondensationskeime zu Clustern kondensieren. An dem Skimmer wird Restgas abgeschieden und der Targetstrahl extrahiert. Der Kollimator definiert Form und Größe des Strahls am Wechselwirkungspunkt. Zusätzlich sind die Geschwindigkeitsverteilungen der H_2 -Moleküle bei dem Durchgang durch die Lavaldüse dargestellt. Die Kondensationskeime bilden sich kurz hinter der engsten Stelle der Lavaldüse durch Dreikörperstöße, da sich die Geschwindigkeitsverteilung verengt (Zeichnung: E. Köhler, bearbeitet).

3.3 Die Wechselwirkungskammer und der Auffänger

In Abb. 3.8 ist ein Querschnitt durch das gesamte Kammersystem abgebildet. Die Übergänge zwischen den einzelnen Vakkumkomponenten sind jeweils mit Kupfer- und Vitondichtungen vakuumdicht verschlossen. An die Targetquelle schließt sich eine Wechselwirkungskammer an, an der zwei Glasfenster im Winkel von 90° zueinander angebracht sind. Durch ein Fenster kann der Clusterstrahl derzeit mit einem

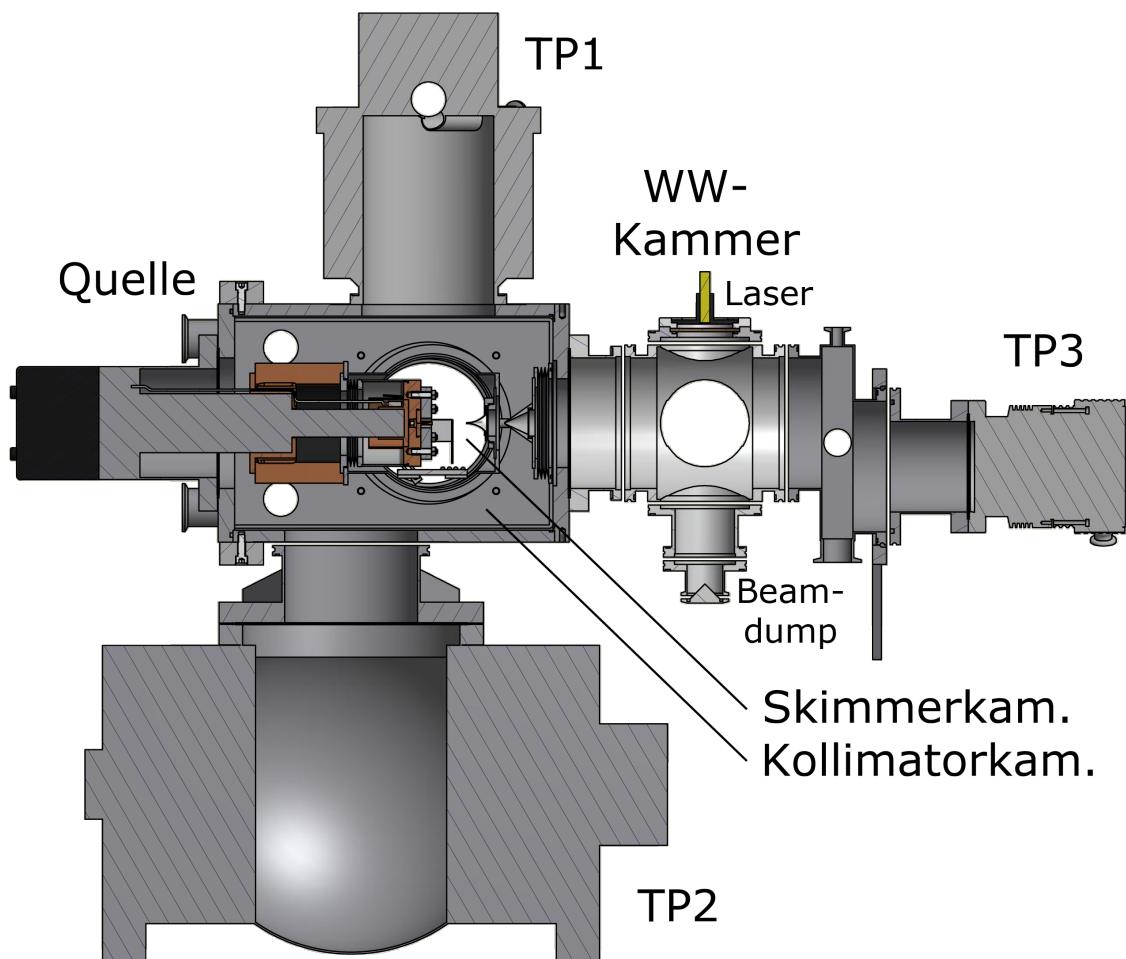


Abbildung 3.8: Schnittebene durch die Vakuumkammern des Targets. Zu sehen sind die Quelle mit Kaltkopf, Skimmer- und Kollimatorkammer sowie die an diese angeschlossenen Turbopumpen (TP), die Wechselwirkungskammer und der Auffänger mit Turbopumpe (Zeichnung: D. Bonaventura, ergänzt).

Laser der Klasse 2 mit 1 mW Leistung bei 650 nm Wellenlänge von oben beleuchtet werden. Ausserhalb des zweiten Vakuumfensters ist eine empfindliche CCD-Kamera der Firma PCO angebracht (zu erkennen in Abb. 3.1 und 3.2), mit deren Hilfe und längerer Belichtungszeit Aufnahmen vom Clusterstrahl gemacht werden können. Damit ist es erstmal gelungen, Clusterstrahlen hinter der Kollimatkorkammer in einem Abstand von rund 30 cm zu der Düse zu beobachten und zu untersuchen [Gri14]. Die Intensität des Clusterstrahl ist proportional zur Clusterdichte und erlaubt somit Dichtebestimmungen nahe und unterhalb der Dampfdruckkurve. Der Laser wird auf der ihm gegenüber liegenden Seite in einem Beadmump aufgefangen (vgl. Abb. 3.8), um eventuelles Streulicht zu unterdrücken. Aufgrund der Abstände Lavaldüse - Skimmer und Skimmer - Kollimator von wenigen cm sowie den Öffnungs durchmessern wird eine Breite des Clusterstrahls im Zentrum der Wechselwirkungskammer von etwa 2 mm erwartet und konnte experimentell bestätigt werden [Gri14]. Zwischen Wechselwirkungskammer und Turbopumpe ist ein Versatzstück eingebaut, sodass der Clusterstrahl die Schaufelblätter dieser trifft. So kann das Saugvermögen der Turbopumpe optimal ausgenutzt werden.

3.4 Das Vakuum- und Gassystem

In Abb. 3.9 ist der Aufbau des Vakuumsystems detailliert dargestellt. Der schon kurz erläuterte Pumpstand besteht im Detail aus einer Vorpumpe (VP), eine Leybold Varovac Drehschieberpumpe mit $175 \text{ m}^3/\text{h}$ Saugvermögen, die an das ATEX¹-gerechte Abluftsystem gekoppelt ist, gefolgt von einer Leybold Rootspumpe (RP2) mit $500 \ell/\text{min}$ Saugvermögen und einer weiteren Leybold Rootspumpe (RP1) mit $2000 \ell/\text{min}$ Saugvermögen. Der Vorvakuumdruck und Druck an der zweiten Rootspumpe wird von zwei 1000 Torr -Ceravac CTRs aufgenommen. Ein weiteres 10 Torr -Ceravac CTR misst den Druck in der Skimmerkammer. Das Hauptpumpsystem dient zur Evakuierung der Skimmerkammer (Gasflüsse hier von bis zu $2 \ell/\text{min}$) und gleichzeitig als Vorpumpensystem der eingesetzten Turbomolekularpumpen.

Die sich daran anschließende Kollimatkorkammer wird von zwei Turbopumpen gepumpt, einer Leybold Turbovac (TP1) mit $1000 \ell/\text{min}$ Saugvermögen und einer

¹Atmosphère Explosibles - Explosionsschutzverordnung.

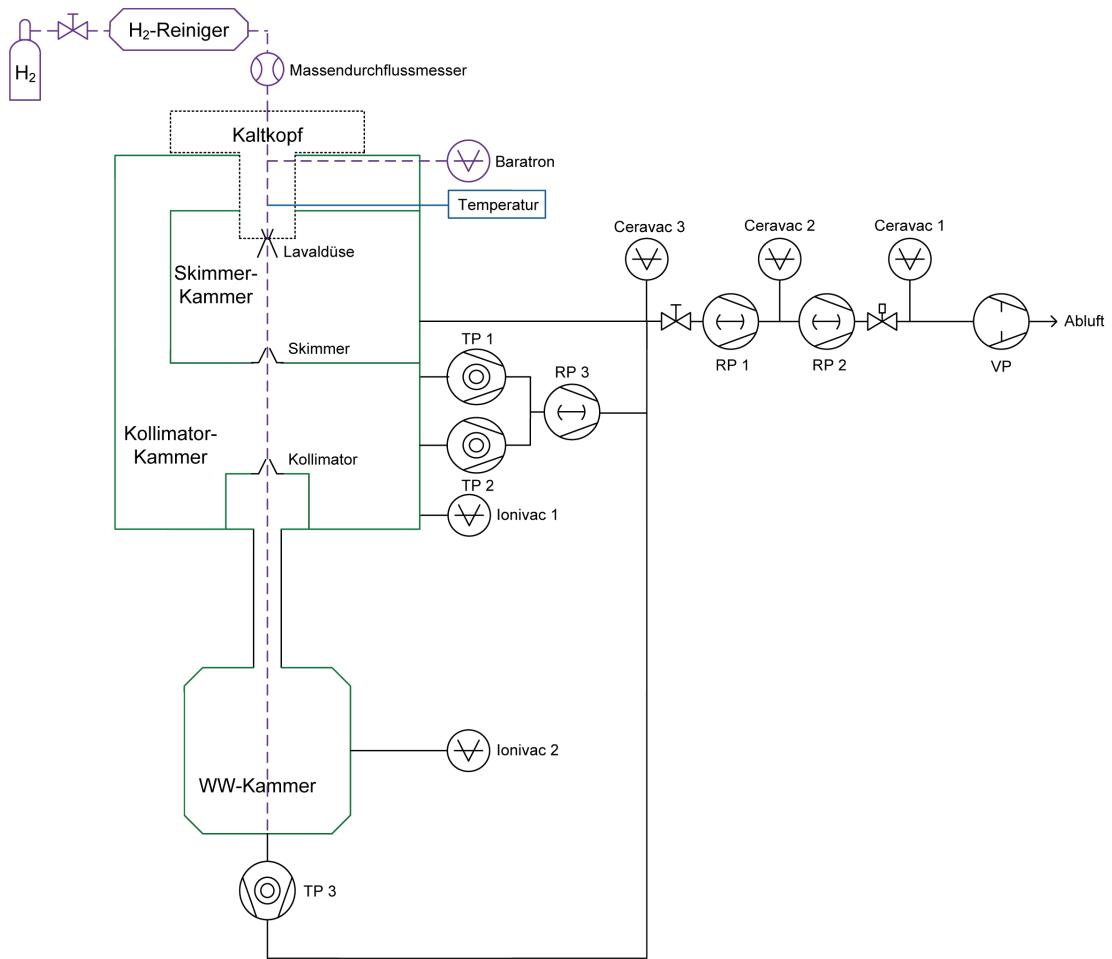


Abbildung 3.9: Schemaskizze des Vakuumsystems des Clustertargets. Dargestellt sind die verwendeten Pumpentypen, die Gaszufuhr und die Messgeräte (Ursprüngliche Version angefertigt von S. Grieser).

Pfeiffer PS3 Turbo (TP2) mit 2200 l/min Saugvermögen. Eine Alcatel Rootspumpe (RP3) mit 600 l/min Saugvermögen sorgt für eine zusätzliche Verdichtung zwischen Turbopumpen und dem Hauptpumpstand. Der Druck in der Kollimatkorkammer wird von einem Ionivac ITR200S gemessen.

Die Wechselwirkungskammer bzw. der Auffänger wird von einer Leybold Turbovac SL (TP3) mit 300 l/min Saugvermögen evakuiert. Ein Ionivac ITR200S dient hier wieder der Druckmessung.

Das zur Clusterproduktion genutzte hochreine H₂-Gas (99,999%) wird zusätzlich noch durch einen bereits erwähnten H₂-Reiniger HP-50 der Firma Johnson Matthey geleitet. In dem Reiniger diffundiert das Gas durch eine aufgeheizte Palladiummembran. Nur die Wasserstoffatome können diesen Diffusionsprozess

3 Cluster-Jet Target (MCT1S)

vollziehen, sodass Wasserstoff am Auslass des Reinigers mit einem Reinheitsgrad von bis zu 9.0 zur Verfügung steht. Die bei Zeiten angesammelten Rückstände können über ein Bleed-Out Ventil aus dem Reiniger entfernt werden. Der Reiniger arbeitet mit einem Druck von maximal 18 bar. Nach dem Durchgang durch den Reiniger wird mit einem, auf H₂ kalibrierten, Brooks Massendurchflussmesser und anschliessendem regelbaren Ventil die Gasflussmenge und somit der Druck an der Lavaldüse regel- und messbar. Die für einen Targetbetrieb bei höchster Dichte nötige Information über die Temperatur der Cluster wird kurz vor der Lavaldüse von einer Temperaturdiode mit angeschlossenem LakeShore 208 Messgerät geliefert. Die Überwachung und Ansteuerung der einzelnen Komponenten wird im nächsten Kapitel im Detail dargestellt.

4 Grundgerüst der Slow Control Software

Zur Überwachung und Ansteuerung des Cluster-Jet Targets MCT1S wurde in dieser Arbeit eine spezielle Slow Control Software entwickelt und erfolgreich implementiert. Bevor die Hauptfunktionen detailliert betrachtet werden können, müssen zunächst die Anforderungen an die Software diskutiert und eine Übersicht vorgestellt werden. Auch eine Einführung in die verwendete Programmiersprache ist an dieser Stelle sinnvoll, damit die im Folgenden dargestellten Quellcodeabschnitte verständlich bleiben.

4.1 Anforderungen und verwendete Programmiersprache

Um einen reibungslosen und vor allem sicheren Betrieb des Targets mit Wasserstoff zu garantieren, muss die überwachende Software einige Anforderungen erfüllen. Zu aller erst muss diese in der Lage sein, sämtliche an dem Aufbau angebrachten Messgeräte in regelmäßigen Abständen auszulesen, die Daten abzubilden und für spätere Verwendung in Logfiles abzuspeichern. Diese Eigenschaften machen die Bezeichnung „Slow Control“ aus, da hauptsächlich Rohdaten geliefert werden, die nicht direkt intensiver Echtzeit-Weiterverarbeitung unterliegen. Gleichermaßen soll jedoch auch ein gewisser Eingriff in einige Parameter möglich sein, der die Ansteuerbarkeit realisiert. Mit der Ansteuerbarkeit sind hauptsächlich der Gasdruck und die Temperatur an der Lavaldüse gemeint, da diese beiden Parameter essentiell für einen Betrieb des Cluster-Jet Targets bei höchsten Dichten sind. Es ist möglich, dass z.B. eine Vakuumpumpe ausfällt oder ein Messgerät (gerade bei serieller Kommunikation) kurzzeitig nicht ansprechbar ist. Die Software muss solche

Vorgänge bemerken, Fehler melden, aber weiterhin stabil laufen. Ein kritischer Punkt ist insbesondere die Temperatur am Kaltkopf. Sollte die Temperatur hier auf über 50 °C [LbV96] ansteigen, z.B. durch eine hohe Heizleistung an der Heizpatrone, die zur Temperaturveränderung eingesetzt wird (vgl. Kapitel 3, Abb. 3.5), könnte die Funktion des Kaltkopfs beeinträchtigt werden. Zusätzlich zu der eingebauten elektrischen Notabschaltung muss die Software die Heizung jedoch bei Bedarf sperren können. Um den Status des Cluster-Jet Targets im Langzeitbetrieb aus der Ferne einsehen zu können, ist es wünschenswert, die Daten auf eine Website zu projizieren. Hierzu lässt sich die Software an einen vorhandenen, von A. Täschner entwickelten Webserver anbinden.

Die für das Programm verwendete Programmiersprache bzw. Entwicklungsumgebung ist National Instrument's LabView, die, im Gegensatz zu herkömmlichen Programmiersprachen wie Java, C# oder C++, eine grafische Programmiersprache ist. Eine Übersicht über die wichtigsten Funktionen dieser Sprache ist in Abb. 4.1 gegeben. LabView wurde speziell für in dieser Arbeit beschriebene Anwendungen

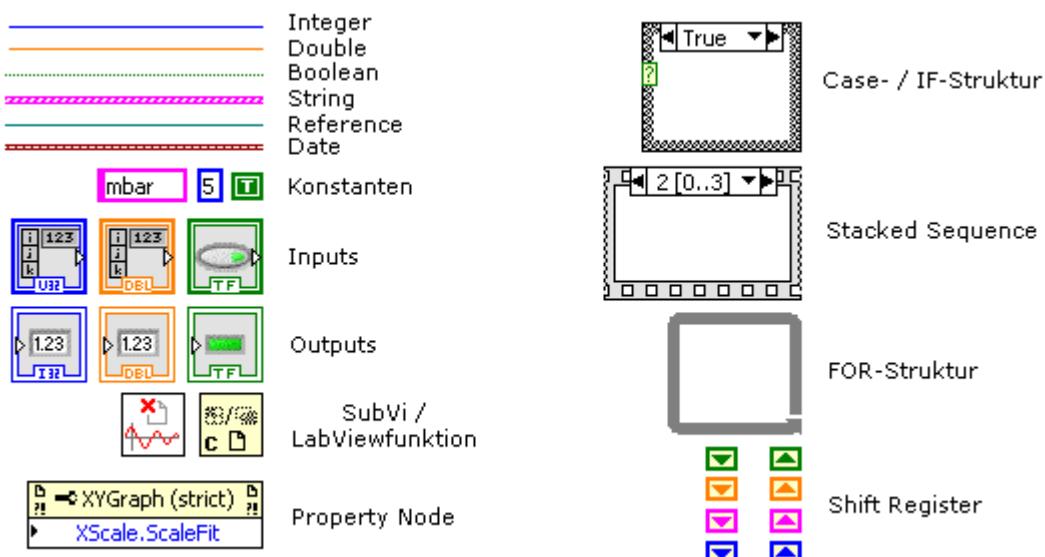


Abbildung 4.1: Übersicht über die wichtigsten verwendeten LabView-Module. Angefangen bei den Variablentypen, den zugehörigen Konstanten und Ein- bzw. Ausgabefunktionen, über LabViewfunktionen und lokale Variablen (den Property Nodes) bis hin zu sequentiellen Strukturen und Schleifen, in denen sich mit einem Shift Register Werte in den nächsten Durchlauf übergeben lassen.

und Herausforderungen entwickelt und eignet sich deshalb sehr gut für den Einsatz am Cluster-Jet Target MCT1S.

4.2 Die Benutzeroberfläche

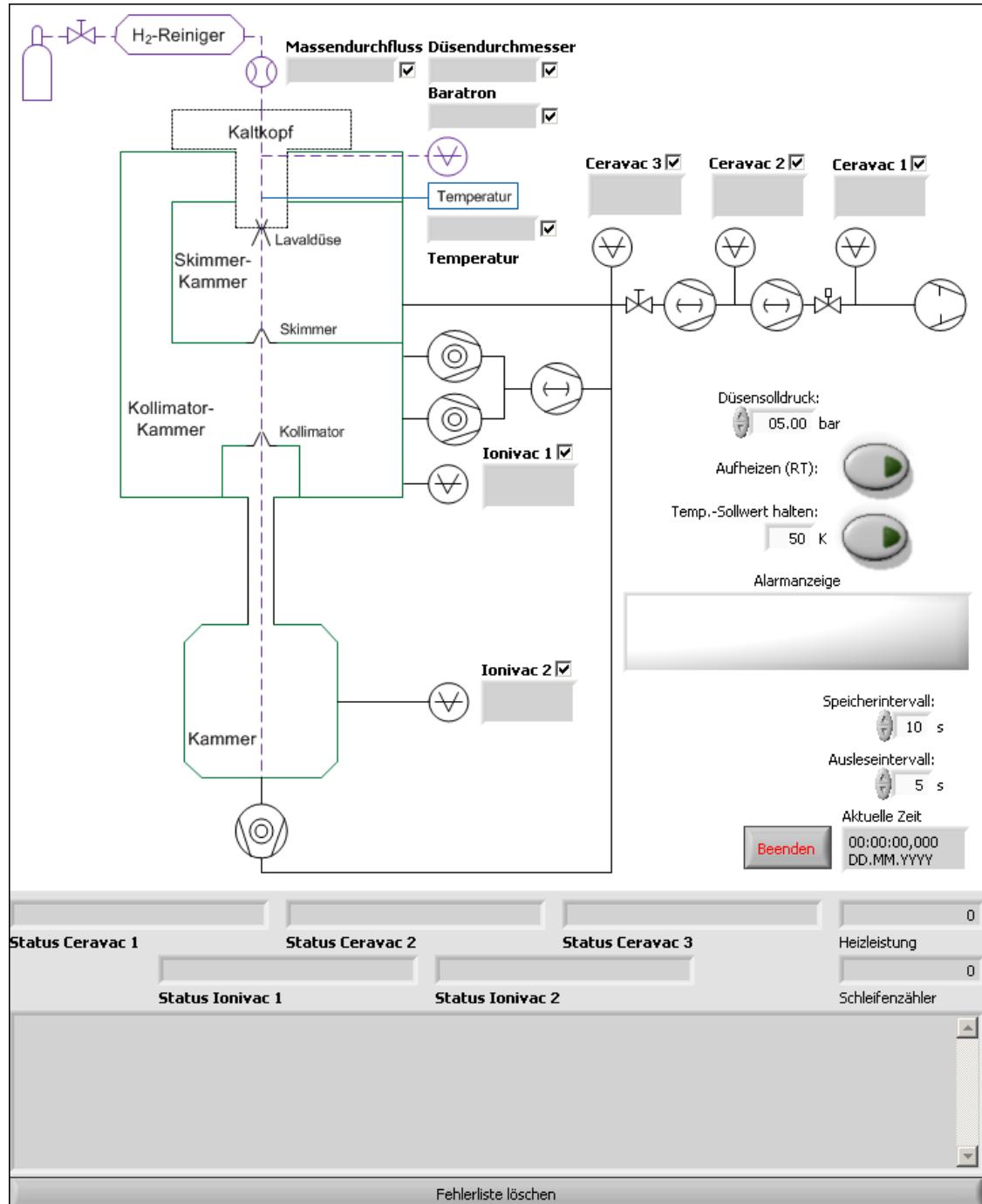


Abbildung 4.2: Linke Seite der grafischen Benutzeroberfläche (Frontpanel) der Slow Control Software, auf der die Messwerte passend zur Skizze des Vakuumsystems, Steuerungselemente und Alarm- bzw. Fehleranzeigen zu sehen sind.

4 Grundgerüst der Slow Control Software

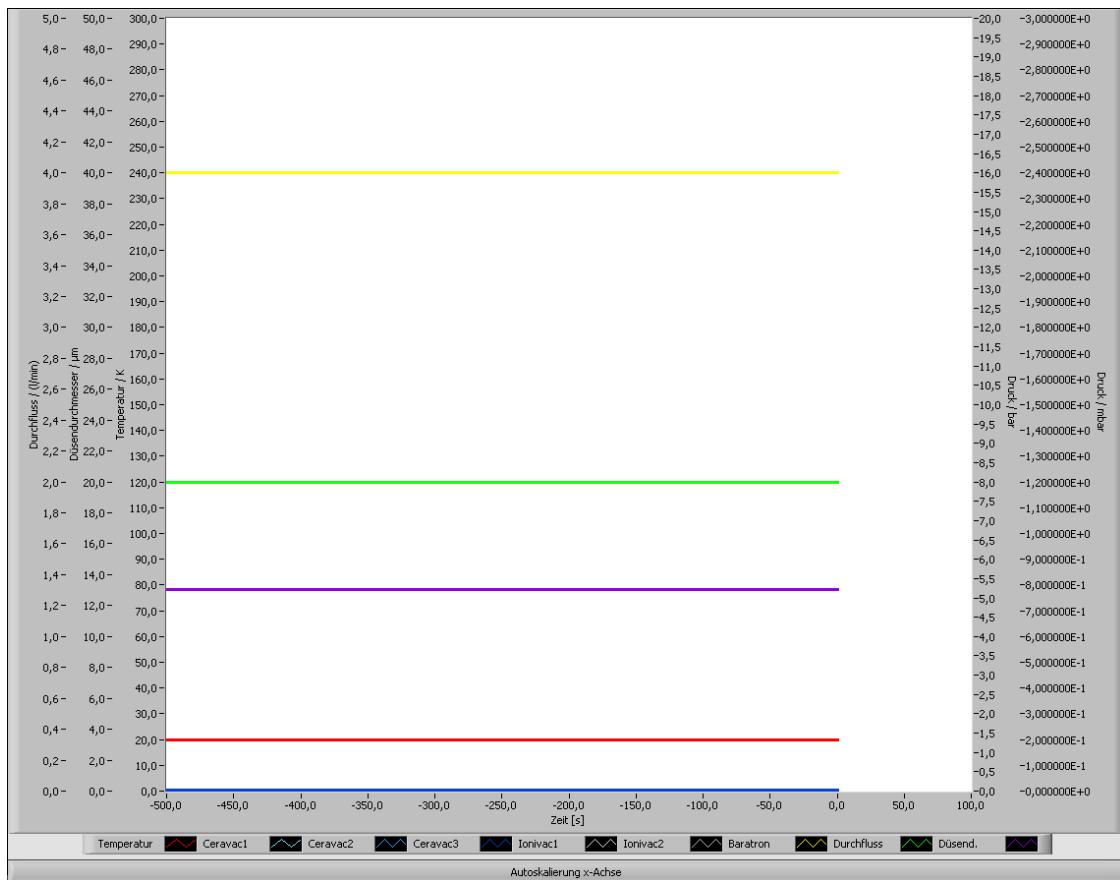


Abbildung 4.3: Rechte Seite der Benutzeroberfläche der Slow Control Software, welche zum Plotten der Messwerte dient und sich dynamisch an die gewählten Plots anpasst.

Die entwickelte Benutzeroberfläche besteht aus zwei Hauptelementen, die in Abb. 4.2 und 4.3 dargestellt sind. Abbildung 4.2 zeigt eine leicht abgewandelte Version der Schemaskizze des Vakuumsystems aus Kapitel 3, Abb. 3.9 und dient als Grundlage, um die Messwert-Textfelder übersichtlich den jeweiligen Instrumenten zuzuordnen. Dadurch ist sehr schnell zu lokalisieren, um welches Instrument oder welchen Vakuumabschnitt es sich bei einem bestimmten Wert handelt. Das Ausleseintervall der Messgeräte kann ebenso gesetzt werden wie das Speicherintervall der zugehörigen Daten in das Logfile. Ferner lässt sich der Gasdruck- und Temperatursollwert an der Lavaldüse festlegen oder ein Aufheizvorgang einleiten. Falls das Programm, wie bereits angedeutet, Unregelmäßigkeiten oder Fehler registriert, wird der Experimentierende durch eine blinkende Alarmanzeige oder die Einträge in der Fehlerliste darauf aufmerksam gemacht. Ein zusätzliches Feature bietet der in Abb. 4.3 gezeigte, sich automatisch anpassende Graph. Über

die Checkbox am Textfeld des jeweiligen Instruments kann vorgegeben werden, welcher Messverlauf geplottet werden soll. Der Auswahl entsprechend werden die zugehörigen Ordinatenachsen angezeigt oder ausgeblendet. Der Plot ist mitlaufend, d.h. in Standardeinstellung werden immer die letzten 500s gezeichnet. Es ist zusätzlich auch eine Autoskalierung der Abszissenachse wählbar.

4.3 Quellcodeüberblick

In Abb. 4.4 ist die oberste Ebene des Quellcodes abgebildet. Nach dem Programmstart werden zunächst die Kopfzeilen des Datenlogfiles erstellt und an das Temperaturmessgerät eine Alarmschwelle inklusive der gewünschten Einheit übergeben (A). Die oberste Ebene besteht hauptsächlich aus einer For-Schleife, die im eingestellten Ausleseintervall durchlaufen wird. Eine kurze Logik (B) verhindert im Anschluss sowohl ein zu geringes Auslese- als auch Speicherintervall, da das in Abschnitt 4.4.3 näher beschriebene Temperaturmessgerät nur eine Übertragungsrate von 300 Baud (1 Baud = 1 Bit/s) unterstützt. Für das Speicherintervall können immer nur ganzzahlige Vielfache des Ausleseintervalls gewählt werden. Wenn der Schleifenzähler dem Speicherintervall entspricht, wird die rechts daneben liegende Case-Struktur getriggert, die für den Speichervorgang des Datenlogfiles sorgt und den Schleifenzähler zurücksetzt. Ein weiterer Bereich (C) ist für das Auslesen und Ansprechen der Vakuum- und Gassysteminstrumente einschließlich Anzeige auf der Benutzeroberfläche, das Zusammenführen der Daten für das Logfile, das Fehlerlogging, Alarne und die Bereitstellung der Daten für den Webserver zuständig. Die Unterprogramme, sogenannte SubVis, sind in den Abschnitten 4.4.2, 4.4.3, 4.6.2 und 4.6.3 genauer erläutert. Im Bereich (D), der das grafische Darstellen der gewählten Werte ermöglicht, werden die ausgelesenen Messwerte sowie die zugehörige Zeit in Arrays abgelegt. Die Arrays versorgen das Graphen erzeugende SubVi, dargestellt in Abschnitt 4.5. Die Checkboxen zur Auswahl der zu plottenden Werte befinden sich ebenfalls hier. Darüber (E) befindet sich die Routine zur Temperaturregelung. Hier stellen Abfragen sicher, dass bei zu hoher Düsentemperatur oder akuten Fehlermeldungen die Heizung ausgeschaltet wird. Zusätzlich lassen sich an dieser Stelle die für ein korrektes Verhalten des verwendeten und in Abschnitt 5.1.2 betrachteten Regelmechanismus benötigten Parameter festlegen.

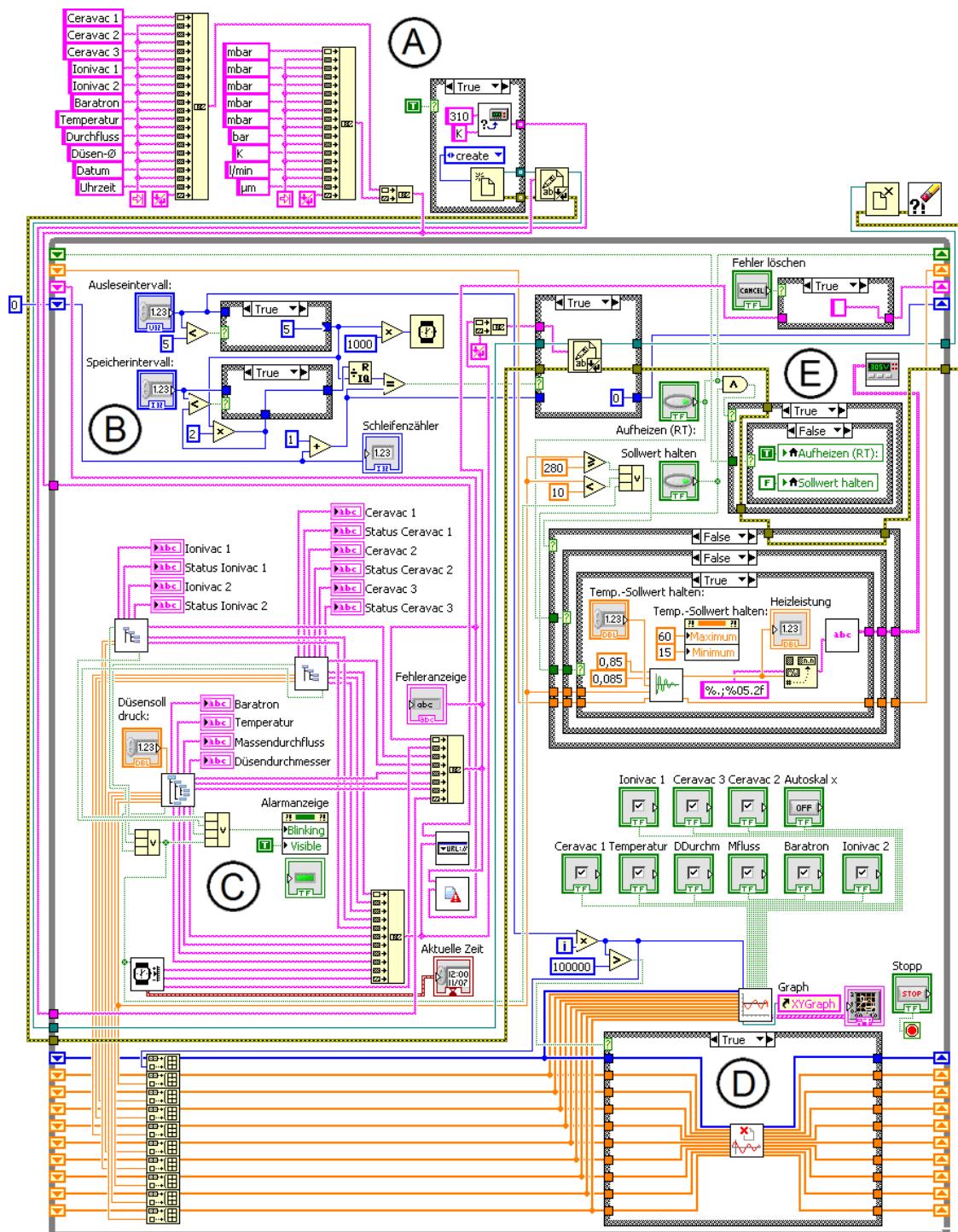


Abbildung 4.4: Das Blockdiagramm bzw. der Quellcode der Slow Control Software.

4.4 Ansprechen der Messgeräte

Alle an das Target angebrachten Mess- und Steuerungsgeräte sind an eine Meilhaus Electronic Serial-to-USB Mehrfachkonverterbox angeschlossen. Die Box stellt demnach über einen einzelnen USB Port mehrere COM Ports zur Verfügung. In diesem Abschnitt wird erst kurz erläutert, wie serielle Schnittstellen aufgebaut sind, bevor die Implementation im Programm betrachtet wird.

4.4.1 Serielle Kommunikation

Es gibt eine Vielzahl verschiedener serieller Schnittstellen. Genau genommen handelt es sich bei der USB („Universal Serial Bus“)-Schnittstelle auch um eine serielle Schnittstelle. Der Begriff „Serielle Schnittstelle“ bezieht sich allerdings im täglichen Gebrauch in der Regel auf die RS-232 Schnittstelle mit 9-poligen D-Sub Steckern. Auch bei dem RS-232 Standard gibt es wieder unterschiedliche Polungen der Steckverbindungen, weshalb an dieser Stelle nicht näher auf diese eingegangen sei. Wichtiger ist, auch mit Blick auf die Software, der zu programmierende Teil der Schnittstelle.

Bei jeder Initialisierung der Schnittstelle müssen diverse Parameter angegeben sein. Zu aller erst muss der gewünschte *COM Port* festgelegt werden. Ein *Timeout*-Wert verhindert langes Warten auf Antworten der angeschlossenen Geräte, das ein Aufhängen des Programms verursachen würde. Die *Übertragungsrate* wird in Baud (1 Baud = 1 Bit/s) angegeben. Weiterhin muss die Anzahl an *Data bits*, der Zeichenlänge in bit, festgelegt werden. Die *Parity* dient zur Behandlung von Übertragungsfehlern. Um das Ende einer Nachricht zu definieren werden *Stop bits* gesendet, deren Anzahl geräteabhängig ist. Zum Schluss muss ein *Flow control*-Mechanismus gesetzt werden, der bei langsamen Empfängern ein Überlaufen verhindert. Im LabView-Code, beispielsweise in Abb. 4.9 zu sehen, sind die Parameter in dieser Reihenfolge angegeben.

4.4.2 Vakuummessgeräte



Die Messgeräte des Vakuumsystems sind an Mehrfachauslese- und Versorgungsgeräte, die CenterThrees der Firma Leybold, angeschlossen. Insgesamt sind zwei Geräte im Einsatz, eines für die drei verwendeten Ceravacs und das andere für

die beiden Ionivacs. Die für das Auslesen der CenterThrees zuständigen, identisch strukturierten SubVIs sind in Abb. 4.5 und 4.6 dargestellt.

Die Kommunikation über die Schnittstelle übernimmt ein offizieller, in LabView von der Firma Leybold entwickelter Treiber (A). Es müssen lediglich die entsprechenden COM Ports gesetzt werden. In der LabView Standardeinstellung übernimmt eigentlich ein automatischer Errorhandler den Umgang mit auftretenden Fehlern. Da dieser automatische Errorhandler jedoch das Programm aufgrund von erscheinenden Dialogen unterbricht, konnte auf diese Weise kein sicherer Betrieb des Cluster-Jet Targets garantiert werden. Ein manueller Errorhandler (B) ignoriert die Dialoge und leitet den Fehlerzustand und die zugehörige Meldung an das eigentliche Programm weiter. Die Hauptaufgabe dieser beiden SubVis ist es, den Instrumentenstatus und die Messwerte mit Einheit für die Abbildung auf der Benutzeroberfläche sowie ohne Einheit für die Speicherung im Logfile und den Plotarrays zu liefern (C). Das letzte Feature prüft, ob die Werte signifikant von den im Betrieb höchster Dichte üblichen abweichen und löst in diesem Falle den Alarmzustand aus (D).

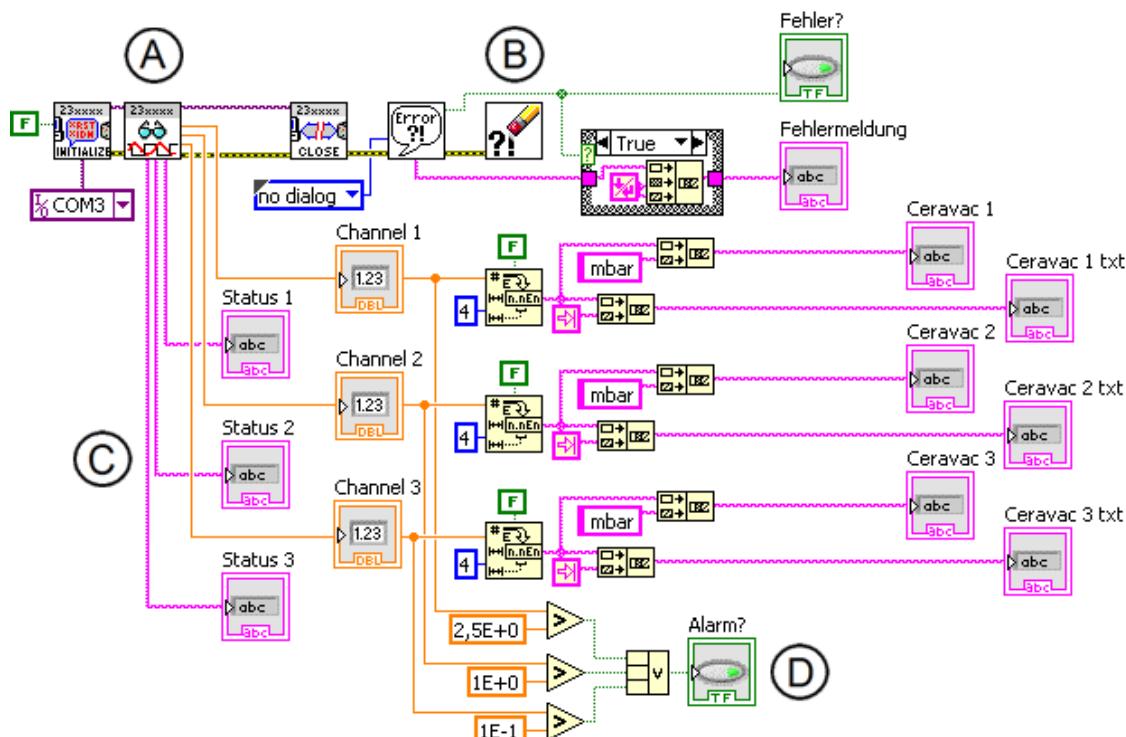


Abbildung 4.5: Blockdiagramm des SubVis zur Auslese des CenterThree Mehrfachmessinstruments, an das die Ceravacs angeschlossen sind.

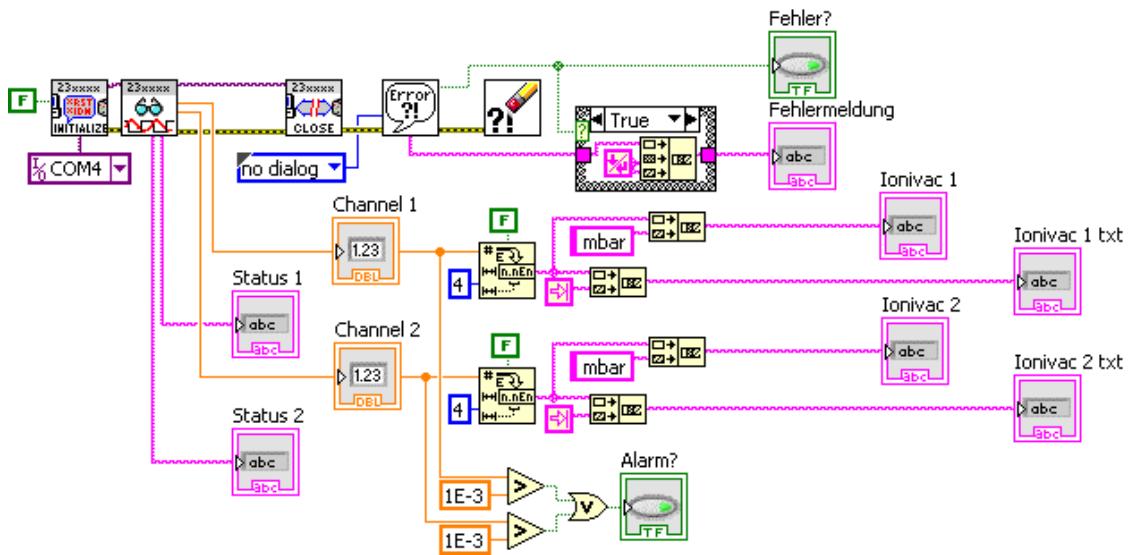


Abbildung 4.6: Blockdiagramm des SubVis zur Auslese des anderen CenterThree Mehrfachmessinstruments, an dem die Ionivacs angeschlossen sind.

4.4.3 Gassysteminstrumente

Die mit dem Gassystem in Verbindung stehenden Instrumente werden in dem in Abb. 4.7 gezeigten SubVi behandelt. Die Auslese des MKS PR4000B Messgeräts, an welches das Baratron zur Düsendruckmessung angeschlossen ist, übernimmt auch hier ein von MKS entwickelter Treiber (A). Analog zu dem vorher genannten Treiber muss ebenso nur der COM Port angegeben und der Errorhandler eingerichtet werden. Das Ansprechen des LakeShore 208 Temperaturmessgeräts, der Brooks 0254 Einheit, welche den Massendurchflussmesser und das Druckventil versorgt, und die Düsendurchmesserberechnung sind in den weiteren SubVis realisiert (B), die in den folgenden Unterabschnitten erläutert werden. An den Ausgabewert der Düsendurchmesserberechnung ist eine Abfrage gekoppelt, die nötig ist, um den Tabulator im Logfile bei einem Massendurchfluss von null aufzufüllen. Diese verhindert, dass zwischenzeitlich einzelne Zeilen verrutschen und dadurch eine Weiterverarbeitung mit dritten Programmen erschwert wird. Neben den Messwerten für die Benutzeroberfläche und das Logfile werden auch hier wieder die Werte im passenden Format für die Plotarrays geliefert und Alarmschwellen überprüft (C).

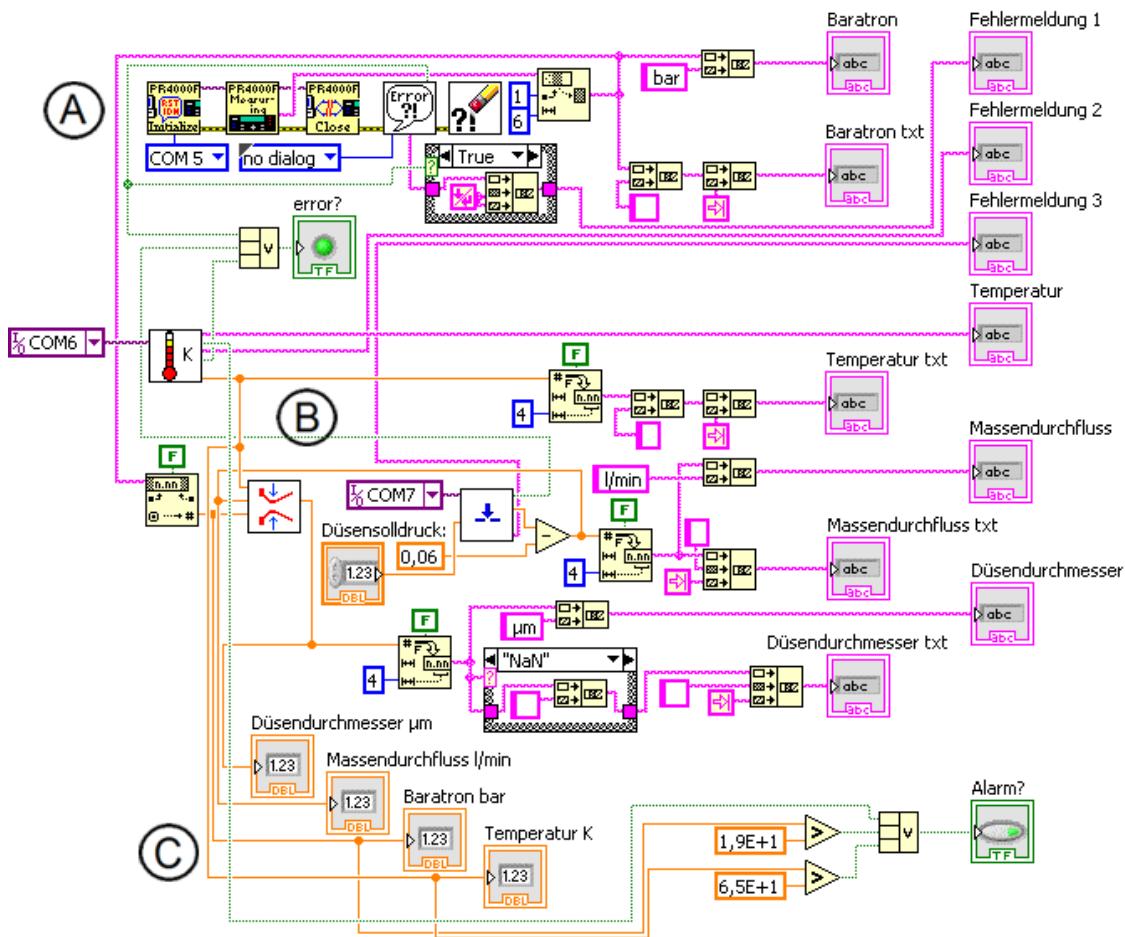


Abbildung 4.7: Blockdiagramm des SubVis zur Kommunikation mit den Gassysteminstrumenten. Zusätzlich findet hier die Düsendurchmesserberechnung statt.

Brooks-Massendurchflusssensor und -Druckregler

Die Brooks 0254 Messeinheit bietet umfangreiche, per Remote konfigurierbare Funktionen, die von einem offiziellen Treiber unterstützt werden. Da jedoch nur zwei der Funktionen wirklich benötigt werden und die restliche Konfiguration am Gerät selbst vorgenommen wurde, erschien es sinnvoller, einen eigenen Treiber zu entwickeln. Der Treiber bzw. das SubVi ist in Abb. 4.8 zu sehen. Es beginnt mit der Initialisierung der RS-232 Schnittstelle (A), bei der die von der Messeinheit verlangten Parameter, wie in Abschnitt 4.4.1 besprochen sortiert, übergeben werden müssen. Darauf folgend wird der Befehl AZ.01K inklusive EOL-Konstante gesendet, der das Gerät dazu veranlasst, den aktuellen Massendurchfluss

zurückzuliefern, welcher mit einer kurzen Verzögerung von 250 ms gelesen wird (B). Diese Nachricht besteht nicht nur aus dem Massendurchflusswert, sondern auch aus weiteren Informationen, wie z.B. Kanalnummer, da das Gerät mehrere Anschlussmöglichkeiten bietet. Aus dem Grund muss der benötigte Teil der Nachricht ausgeschnitten werden (C). Danach wird der gewählte Düsensolldruck mit dem Befehl AZ.04P01 gesendet (D). Ein interner Regelkreis steuert daraufhin das Ventil, bis der hinter dem Ventil eingebaute Drucksensor den gewünschten Druck registriert. Abschließend wird die Schnittstelle geschlossen und der bereits bekannte Errorhandler behandelt wieder etwaige Fehler.

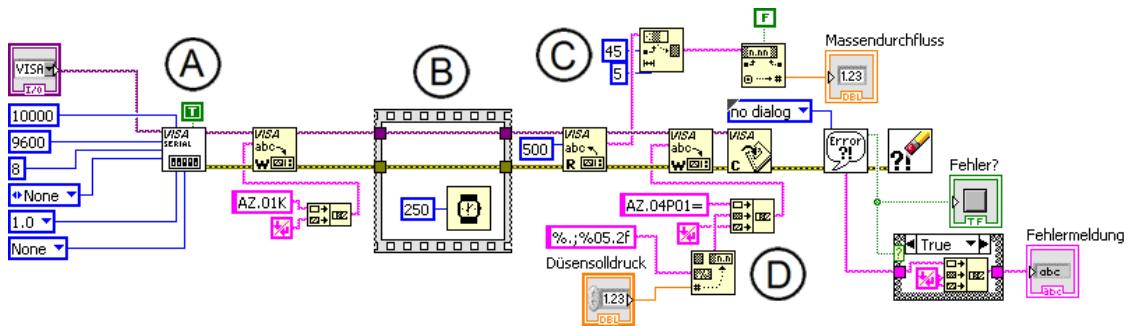


Abbildung 4.8: Treiber zur Ansteuerung der Brooks 0254 Einheit. V.l.n.r.: Initialisierung der Schnittstelle, Schreib-/Lesebefehle und Errorhandler.

LakeShore- Temperaturmessgerät

Für das verwendete Temperaturmessgerät 208 der Firma LakeShore ist altersbedingt kein Treiber für LabView verfügbar, was auch in diesem Fall eine Eigenentwicklung nötig machte. Diese ist in Abb. 4.9 abgebildet. Die Kernelemente sind, wie bei dem vorherigen Treiber, das Initialisieren der Schnittstelle, das Senden der Anfrage mit dem Befehl WS und LF-Konstante, das Lesen der Antwort und Schließen der Schnittstelle sowie der Errorhandler (A). Die Antwortnachricht wird aber zusätzlich diversen Vergleichsoperationen (B) unterzogen. Hintergrund ist der, dass die zurückgelieferte Einheit erkannt und passend formatiert werden sollte. Die Antwortnachricht setzt sich aus der Kanalnummer, getrennt durch ein Komma, dem Messwert mit Einheit und dem Alarmzustand, auch getrennt durch ein Komma, zusammen (z.B. 1,00.00K,A). Im ersten Schritt werden Alarmzustand und Kanal separiert und ausgewertet. Da nur eine Temperaturdiode angeschlossen ist, ist die

Kanalinformation im weiteren Programmverlauf nicht explizit implementiert, aber so optional nutzbar gehalten. Danach werden überflüssige leitende Nullen entfernt und zwischen Wert und Einheit ein Leerzeichen eingefügt. Für Grad Fahrenheit und Grad Celsius werden die Gradzeichen hinzugefügt. Das eigentliche Programm ist zwar derzeit für den Betrieb mit Kelvin ausgelegt, aber für eine eventuelle andere Verwendung des Messgeräts in der Zukunft sollte der Treiber diese Funktionen besitzen.

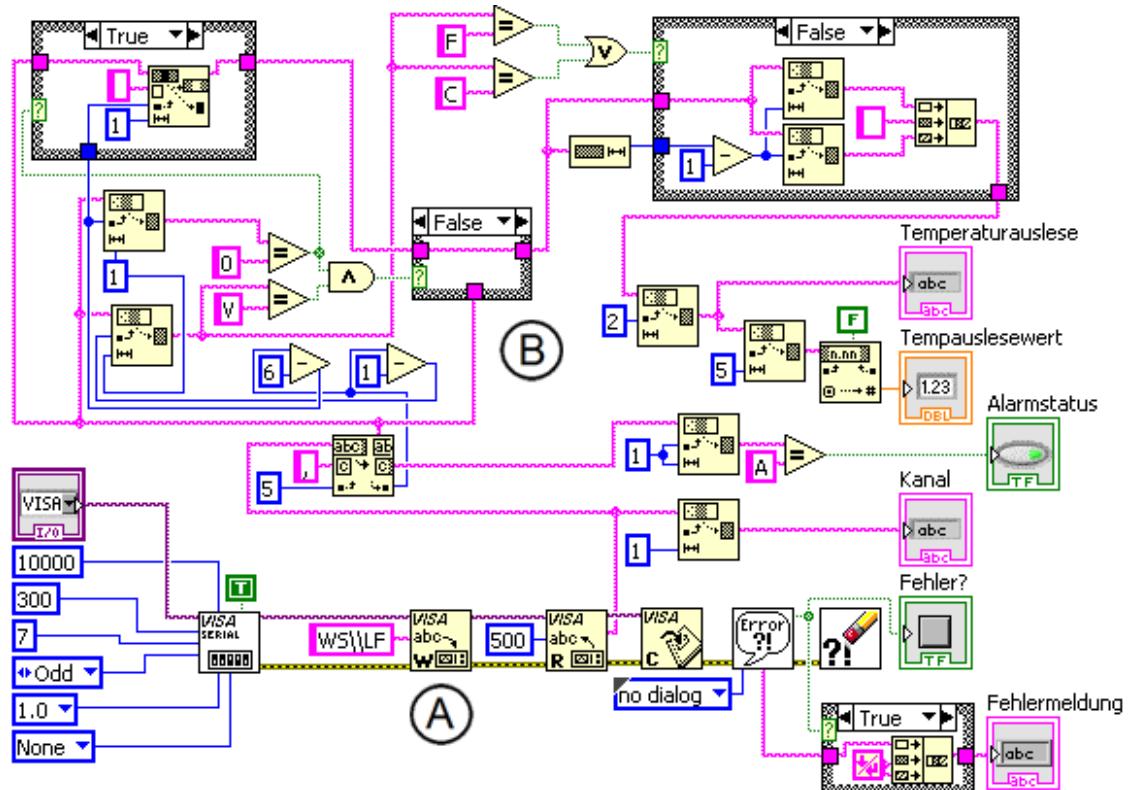


Abbildung 4.9: Treiber zur Auslese des LakeShore 208 Temperaturmessgeräts. Implementiert sind eine Reihe von Vergleichsoperationen, die eine korrekte Weiterverarbeitung mit der gewünschten Einheit ermöglichen.

Düsendurchmesserberechnung

Die Berechnung des (Laval-)Düsendurchmessers erlaubt eine schnelle Einsicht in den Zustand an der Düse. Es kann nämlich unter Umständen passieren, dass die Düse im Betrieb verstopft oder einfriert.

Die zur Berechnung nötige Formel lässt sich aus dem Gesetz zur Bestimmung des Volumendurchflusses q_V [WAW88],

$$q_V = A^* \frac{p_0}{\sqrt{MT_0}} \frac{T_N}{p_N} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} \sqrt{\kappa R}, \quad (4.1)$$

unter Berücksichtigung von $A^* = \pi(d/2)^2$ herleiten zu

$$d = 2 \sqrt{\frac{q_V \sqrt{MT_0}}{\pi p_0 \sqrt{\kappa R} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}}} \frac{T_N}{p_N}}. \quad (4.2)$$

A^* ist die Querschnittsfläche an der engsten Stelle, T_N und p_N Normaltemperatur und -druck, R die universelle Gaskonstante, M die molare Masse des Gases, T_0 und p_0 Düsentemperatur und -druck sowie κ der Adiabatenindex. Für H_2 ist $M = 2,01588 \text{ g/mol}$ [Taf07] und im Bereich tiefer Temperaturen gilt $\kappa = 5/3$. Die Implementation von Formel 4.2 in LabView ist in Abb. 4.10 veranschaulicht.

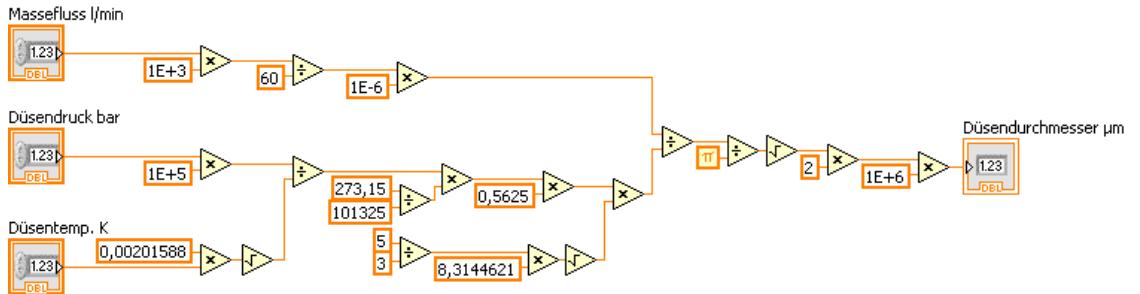


Abbildung 4.10: LabView-Realisierung der Formel zur Düsendurchmesserberechnung.

Die Formel ist aufgrund des κ nur bei tiefen Temperaturen und im Cluster-Betrieb abhängig vom Aggregatzustand des Wasserstoffs gültig. Sie gilt, wenn klassisch Gas durch die Lavaldüse geschickt wird, nicht jedoch bei Flüssigkeit. Die Eigenschaft, einen Verschluss der Düse zu erkennen, bleibt aber bestehen.

4.5 Quasi-Echtzeitplotting

Wie schon in der Übersicht erwähnt, lassen sich Messwerte auswählen, welche in Quasi-Echtzeit, d.h. im Abstand des Ausleseintervalls bzw. Schleifendurchlaufs,

geplottet werden und dadurch einen Eindruck von den aktuellen Änderungsraten und zeitlichen Verläufen vermitteln. In Abb. 4.11 ist das Unterprogramm gezeigt, welches das Verhalten der Plots definiert und sie erzeugt. Im Hauptprogramm werden pro Umlauf das Zeitarray mit der aktuellen Zeit durch Multiplikation des Schleifenzählers mit dem Ausleseintervall und die Messwertearrays mit den aktuellen Werten aufgefüllt. Die Arrays („Zeit“, „Temp“, „Cera1“, ...) werden an

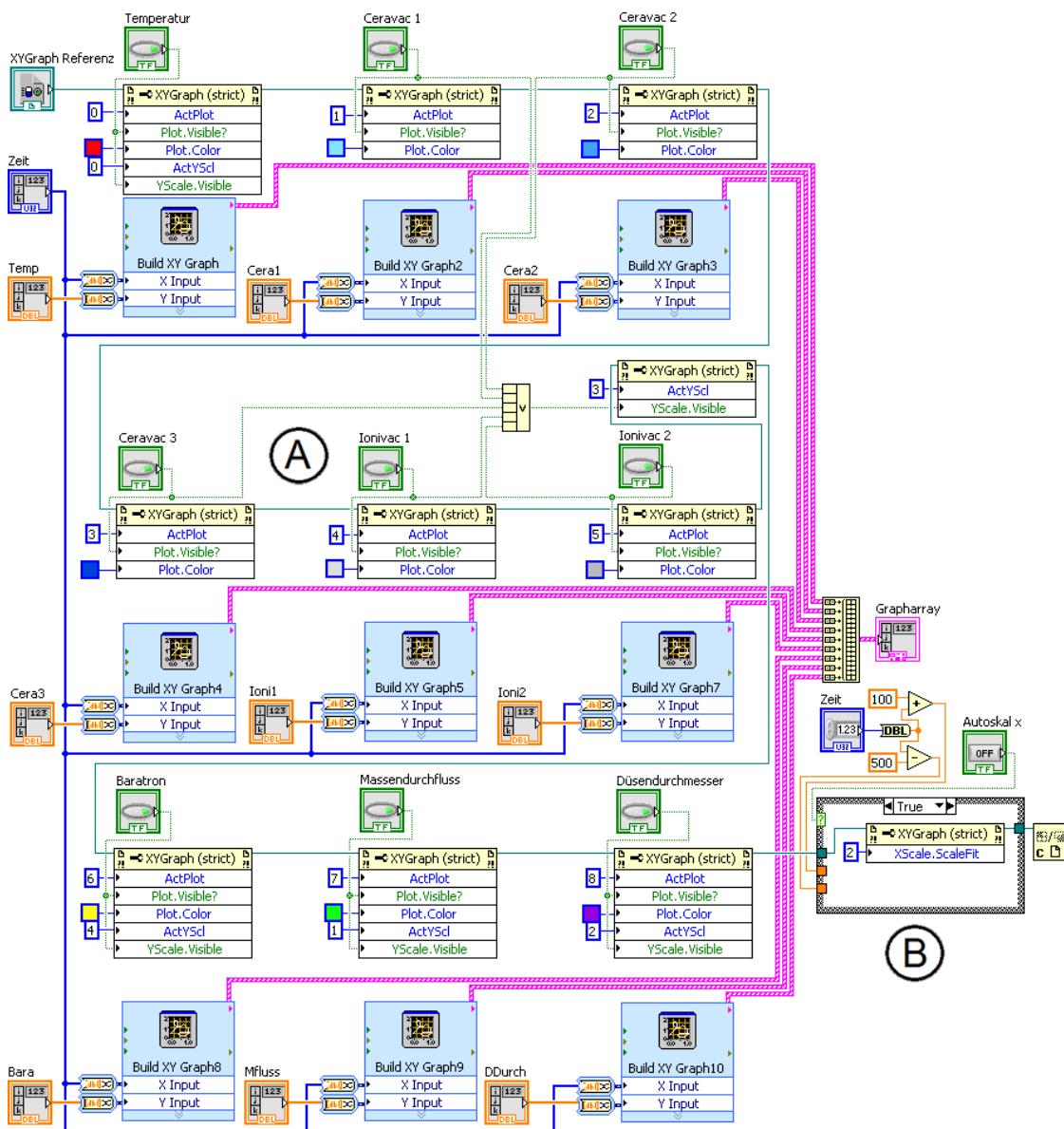


Abbildung 4.11: Blockdiagramm des SubVis zur Erzeugung der Plots. Mit Hilfe von LabView ExpressVis werden die Plots erstellt und über die zugehörigen Property Nodes ihre Farbe sowie Sichtbarkeit definiert und die passende Ordinatenachse ein- und ausgeblendet.

dieses SubVi übergeben und versorgen die LabView-eigenen ExpressVis zur Erzeugung der Plots (A). Die Funktion, die den Graphen auf der Benutzeroberfläche darstellt, befindet sich im Hauptprogramm. Über Referenzen (Zeiger) sind im Unterprogramm Einstellungen per Property Nodes an diesem Graphen möglich. Diese Property Nodes regeln die Farbe des jeweiligen Plots und Sichtbarkeit, wenn die entsprechenden Checkboxen aktiviert sind. Darüber hinaus blenden sie die passenden Ordinatenachsen ein und aus, da nicht alle Messwerte die selbe Einheit besitzen. Die erzeugten Plots werden zum Schluss zu einem Array zusammengefügt, das von der Graphenfunktion im Hauptprogramm gelesen und dargestellt werden kann. Die nächste Aufgabe dieses SubVis ist entweder die Festlegung eines 600 s breiten Zeitintervalls um die aktuelle Zeit, welches den Graphen mitlaufend macht, oder das Umschalten auf Autoskalierung (B), um alle aufgenommenen Werte einsehen zu können.

4.5.1 Speicherbereinigung

Im experimentellen Betrieb wird die Software auf dem Messcomputer teilweise Wochen, wenn nicht gar Monate, ohne Unterbrechung ausgeführt. Deshalb sollte sie so ausgelegt sein, dass der eingebaute Arbeitsspeicher nicht überläuft. Sobald das Programm länger als 10^5 s, also etwas mehr als einen Tag, läuft, wird diese, in Abb. 4.12 gezeigte, Routine ausgeführt. Diese hat die recht simple Aufgabe, bei jedem Durchlauf das letzte Arrayelement zu löschen. Es werden demnach immer maximal die letzten 10^5 s bei der Autoskalierung dargestellt. Dieser Wert wurde vorerst so gewählt, um die Übersichtlichkeit der Plots zu gewährleisten, kann aber bei Bedarf deutlich erhöht werden.

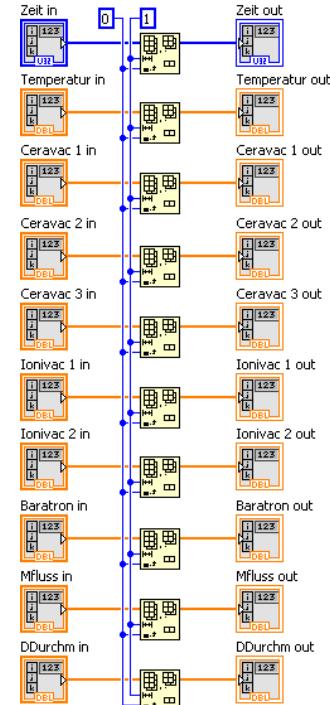


Abbildung 4.12: SubVi zum Löschen der letzten Arrayelemente.

4.6 Weiterverarbeitung gemessener Daten

Zur Weiterverarbeitung der gemessenen Daten, weitreichender Nachverfolgbarkeit einer möglichen Fehlerhistorie und Einsicht in den aktuellen Status des Cluster-Jet Targets im Internet werden vom Programm diverse Logfiles erzeugt.

4.6.1 Messwertetabelle

Der Anwender muss in der Lage sein, möglichst einfach und schnell die aufgenommenen Messwerte grafisch darstellen und analysieren zu können. Während der Graph auf der Benutzeroberfläche hauptsächlich einen guten Überblick über die Messwertverläufe geben soll, ermöglicht das Format des Logfiles, zu sehen in Abb. 4.13, eine effiziente Weiterverwendung.

Ceravac 1	Ceravac 2	Ceravac 3	Ionivac 1	Ionivac 2	Baratron	Temperatur	Durchfluss	Dumen-Ø	Datum	Uhrzeit
mbars	mbars	mbars	mbars	mbars	bar	K	l/min	µm		
7.4994E-1	5.6950E-1	2.0407E-2	1.0000E-4	4.6000E-5	13.941	32.2300	0.8100	23.5956	16.08.2013	11:41:38
7.4994E-1	5.6474E-1	2.0497E-2	1.0000E-4	4.6000E-5	13.947	32.2400	0.7600	22.8526	16.08.2013	11:41:48
7.0828E-1	5.6277E-1	2.0445E-2	1.0000E-4	4.6000E-5	13.948	32.2300	0.7800	23.1488	16.08.2013	11:41:58
7.4994E-1	5.7166E-1	2.0526E-2	1.0000E-4	4.6000E-5	13.943	32.2200	0.8100	23.5921	16.08.2013	11:42:08
7.4994E-1	5.5751E-1	2.0593E-2	1.0000E-4	4.6000E-5	13.949	32.2300	0.8300	23.5659	16.08.2013	11:42:18
7.4994E-1	5.5159E-1	2.0764E-2	1.0000E-4	4.7000E-5	13.941	32.2200	0.8000	23.4477	16.08.2013	11:42:28
7.4994E-1	5.5246E-1	2.0798E-2	1.0000E-4	4.7000E-5	13.950	32.2000	0.7900	23.2896	16.08.2013	11:42:38
7.4994E-1	5.5969E-1	2.0834E-2	1.0000E-4	4.8000E-5	13.936	32.1800	0.7900	23.2977	16.08.2013	11:42:48
7.4994E-1	5.5302E-1	2.0893E-2	1.0000E-4	4.9000E-5	13.939	32.1700	0.8000	23.4100	16.08.2013	11:42:56
7.4994E-1	5.5462E-1	2.1048E-2	1.0000E-4	4.9000E-5	13.940	32.1600	0.8300	23.8731	16.08.2013	11:43:08
7.4994E-1	5.5679E-1	2.1211E-2	1.0000E-4	4.9000E-5	13.944	32.1500	0.7900	23.2855	16.08.2013	11:43:18
7.4994E-1	5.5143E-1	2.1246E-2	1.0000E-4	5.0000E-5	13.939	32.1400	0.8300	23.8702	16.08.2013	11:43:28
7.4994E-1	5.5143E-1	2.1257E-2	1.0000E-4	5.0000E-5	13.936	32.1300	0.7600	23.4241	16.08.2013	11:43:36
7.4994E-1	5.5132E-1	2.1330E-2	1.0000E-4	4.9000E-5	13.936	32.1300	0.7800	23.1407	16.08.2013	11:43:48
7.4994E-1	5.4801E-1	2.1255E-2	1.0000E-4	4.9000E-5	13.939	32.1300	0.7400	22.5372	16.08.2013	11:43:58
7.4994E-1	5.4856E-1	2.1184E-2	1.1000E-4	4.9000E-5	13.954	32.1300	0.7400	22.5250	16.08.2013	11:44:08
7.4994E-1	5.4890E-1	2.1097E-2	1.0000E-4	4.9000E-5	13.945	32.1300	0.7200	22.3778	16.08.2013	11:44:18
7.4994E-1	5.5281E-1	2.1173E-2	1.0000E-4	4.9000E-5	13.938	32.1300	0.7300	22.3552	16.08.2013	11:44:28
7.4994E-1	5.5053E-1	2.1125E-2	1.0000E-4	4.9000E-5	13.950	32.1400	0.7300	22.3773	16.08.2013	11:44:38
7.4994E-1	5.4752E-1	2.1010E-2	1.0000E-4	4.9000E-5	13.945	32.1400	0.7600	22.8365	16.08.2013	11:44:48
7.4994E-1	5.4449E-1	2.1070E-2	1.0000E-4	4.9000E-5	13.938	32.1400	0.7300	22.3869	16.08.2013	11:44:58
7.4994E-1	5.5402E-1	2.1035E-2	1.0000E-4	4.9000E-5	13.951	32.1400	0.7900	23.2779	16.08.2013	11:45:08

Abbildung 4.13: Beispielhafter Auszug aus dem Messdatenlogfile.

4.6.2 Fehlerlogging

Das Datenlogfile wird bei jedem Programmstart neu angelegt, wohingegen die gelogten möglichen Fehler in eine einzelne, übergreifende Datei geschrieben werden. Dies ermöglicht eine Rekonstruktion der Ereignisse bei Systemausfällen. In der programminternen Fehleranzeige werden pro Schleifendurchlauf immer alle aktuellen Fehlermeldungen gelistet. Bei der Speicherung muss eine Routine ein Überschreiben älterer Fehlermeldungen verhindern. In Abb. 4.14 ist diese abgebildet. Dabei wird verglichen, ob die Länge der aktuellen Fehlerliste kleiner oder gleich der Liste aus dem vorherigen Schleifendurchlauf ist. Auch kleiner deshalb, weil sie vom Anwender in der Zwischenzeit gelöscht worden sein könnte. Ist sie größer, bedeutet das mindestens einen neuen Fehlereintrag. In der Datei wird dann lediglich der hinzugekommene Text an das Ende angehängt.

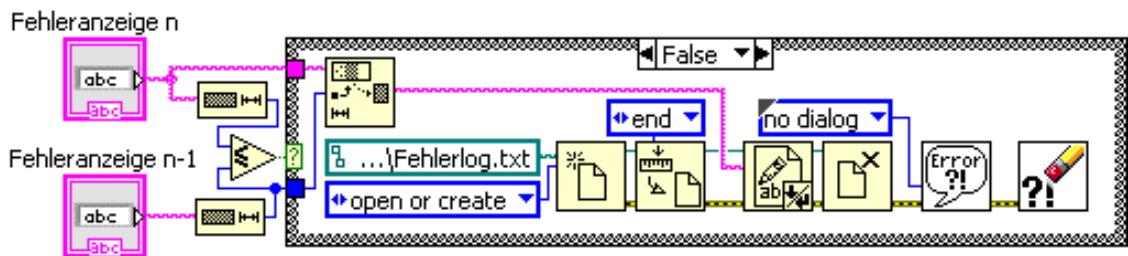


Abbildung 4.14: Routine zur Erstellung des Fehlerlogfiles.

4.6.3 Webstatus

Zur Projektion der Messwerte auf eine Website liest der von A. Täschner entwickelte Webserver die vom in Abb. 4.15 gezeigten SubVi erzeugte Textdatei ein. Die Struktur der Datei entspricht sozusagen der des Datenlogfiles aus Abb. 4.13, bis auf den Unterschied, dass kontinuierlich die aktuellen Werte in einer einzelnen Zeile aktualisiert werden. Ein Ausschnitt aus der Website ist in Abb. 4.16 dargestellt. Der Webserver vergleicht darüber hinaus noch die Messwerte mit den gleichen Alarmschwellen, wie die Software, und verschiickt im Alarmfall Notifizierungs-E-Mails.

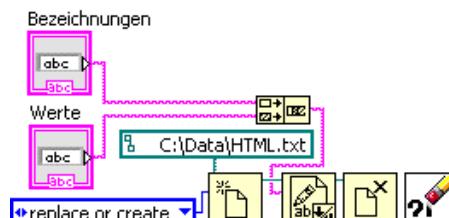


Abbildung 4.15: Schreiben des Webstatus-Files.

Gassystem	Clusterquelle				
Düsendruck	15.10	bar	Vorpumpe	1.29e+0	mbar
Düsenter Temperatur	22.70	K	Rootspumpe 1	5.8e-1	mbar
Gasfluss	1.18	l/min	Skimmerkammer	4.0e-2	mbar
Düsendifurchmesser	25.1	µm	Kollimatorkammer	3.90e-4	mbar
Auffänger					
Ionivac				9.00e-5	mbar

17.08.2013 14:11:08

Abbildung 4.16: Ausschnitt aus der Website des MCT1S im Clusterbetrieb.

5 Implementation einer Temperaturregelung

Die Düsentemperatur steuern und auf einen bestimmten Wert einstellen zu können ist, wie bereits beschrieben, essentiell für einen optimalen Targetbetrieb. Sei es, um eine Dichteanalyse des Clusterstrahls bei verschiedenen, komfortabel einstellbaren Temperaturen durchzuführen. Eine stabile Temperatur bedeutet gleichzeitig eine stabile Dichte, was wichtig für die Vergleichbarkeit von Analysen ist, vor allem mit Blick auf den Experimentaufbau am ILPP in Düsseldorf.

5.1 Temperaturregelung

Die entwickelte Temperaturregelung ist in der Lage alle diese Aspekte zu realisieren. Bevor die Implementation in der Software besprochen wird, muss der gängiste Mechanismus zur Regelung einer bestimmten Größe vorweg erläutert werden: Der PID-Regler.

5.1.1 PID-Regler

Der Proportional-Integral-Differential-Regler kann automatisch einen definierten Sollwert erreichen und halten, was ihn zu einem wertvollen Instrument in vielen modernen und alltäglichen Anwendungen macht. Die Temperatur eines Backofens, der Tempomat im Auto oder der Autopilot (über mehrere Achsen) eines Flugzeugs sind alles Anwendungsbereiche eines PID-Reglers oder einer abgewandelten Version. Der Regler macht im Prinzip das, was der Mensch z.B. beim Finden der gewünschten Wassertemperatur unter der Dusche unterbewusst verarbeitet. Gemeint ist der ständige Vergleich des aktuellen Istwerts mit dem Sollwert und

eine weitere Anpassung bei Nicht-Übereinstimmung. Der Ausgabewert des Reglers ist eine Summe aus den jeweiligen Komponenten (nach [LsM13]),

$$f(t) = Pe(t) + I \int_0^t e(t)dt + D \frac{de(t)}{dt}. \quad (5.1)$$

Hierbei sind P die Proportionalitätskonstante, I die Konstante des Integralteils, D die Konstante des Differentialteils und $e(t)$ die aktuelle Abweichung des Istwerts vom Sollwert.

Der **Proportionalteil**,

$$f_P(t) = Pe(t), \quad (5.2)$$

gibt immer einen zur Abweichung proportionalen Wert aus. Es kann mit einem Proportionalteil alleine ein gewünschter Wert niemals gehalten werden, da die Ausgabe null wird, wenn die Abweichung verschwindet. Weiterhin können entweder starke Oszillationen um den Wert auftreten, wenn die Konstante zu groß, oder der Wert nicht erreicht werden, wenn die Konstante zu gering gewählt ist. Dieser Teil des Reglers muss deshalb so eingestellt werden, dass der Bereich der späteren Sollwerte grob erreicht werden kann.

Der **Integralteil**,

$$f_I(t) = I \int_0^t e(t)dt, \quad (5.3)$$

summiert alle Abweichungen, multipliziert mit der Konstante, auf. Im Gegensatz zum Proportionalteil kann, bei korrekt eingestelltem Regler, immer der Sollwert erreicht werden. Als Faustregel gilt $I \approx 0,1P$ [LsM13]. Um eine einigermaßen sinnvolle Regelgeschwindigkeit zu erhalten werden Proportional- und Integralteil eigentlich immer zum sogenannten PI-Regler gekoppelt. PI-Regler werden in der Regel für träge Systeme, wie Temperatursteuerungen, verwendet, da die Regelung recht sanft erfolgt.

Der **Differentialteil**,

$$f_D(t) = D \frac{de(t)}{dt}, \quad (5.4)$$

reagiert auf die aktuelle Änderung der Abweichung. Dies macht ihn zu einer sehr schnellen Komponente, die dann eingesetzt wird, wenn auf Störungen direkt reagiert werden muss und kann. Für Temperatursteuerungen wird dieser Teil demnach meist außen vor gelassen. Anhand von Temperaturkurven sind in Abb. 5.1 Beispiele verschiedener Reglereinstellungen gegeben.

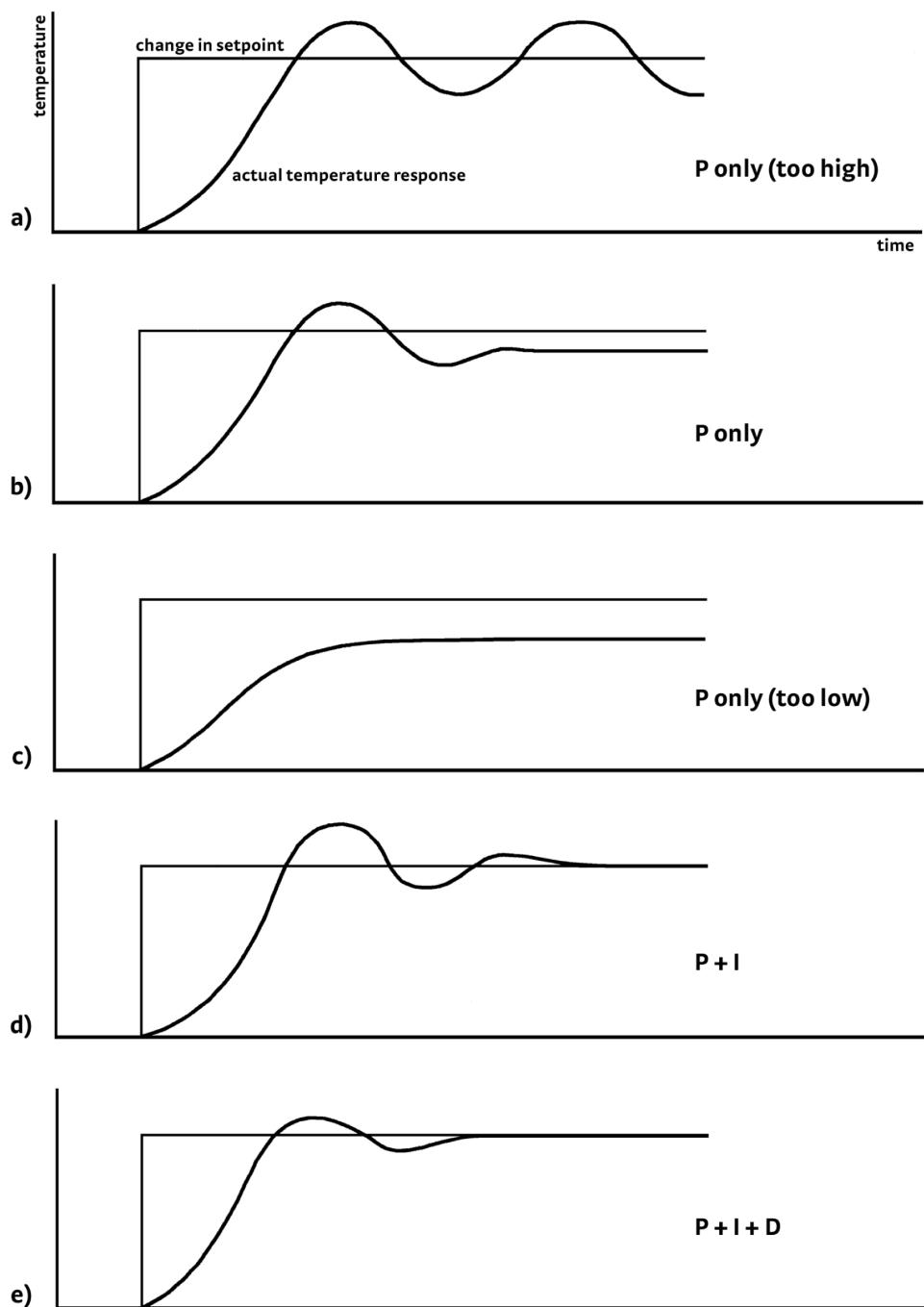


Abbildung 5.1: Beispielhafte Darstellung verschiedener Reglerelemente bzw. Parameter. Es treten entweder Oszillationen um den Sollwert bei zu großem P auf (a), mit P-Anteil alleine ist der Sollwert nicht haltbar (b), bei zu kleinem P kann der Sollwert nicht erreicht werden (c), ein PI-Regler sorgt für das Erreichen des Sollwerts (d) und ein PID-Regler führt allgemein zu schnelleren Angleichvorgängen (e) [LsM13].

5.1.2 Umsetzung



Da das Temperaturmessgerät auf eine Übertragungsrate von 300 Baud begrenzt ist und sich so derzeit nur ein Ausleseintervall von maximal 5 s als stabil herausgestellt hat, erweist sich der PI-Regler als sinnvolle Kombination zur Implementation. In Abb. 5.2 ist das entsprechende SubVi gezeigt.

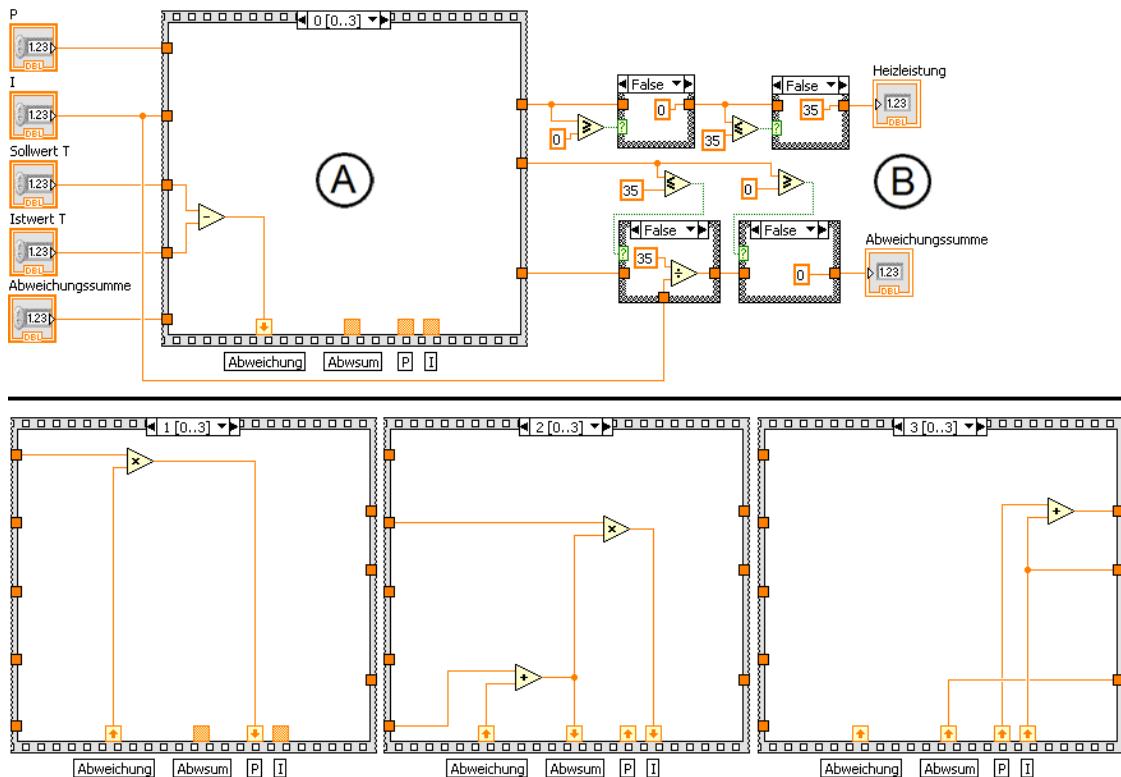


Abbildung 5.2: Implementation des Temperaturreglers. Es wird sequenziell die Heizspannung berechnet und in sinnvollem Maße begrenzt.

An dieses SubVi werden die P - und I -Konstante, der einstellbare Soll- und aktuell ausgelesene Istwert übergeben. In einer sequenziellen Struktur (A) wird im ersten Schritt die Abweichung, im zweiten der Proportionalteil, im dritten der Integralteil und im letzten die Summe beider, entsprechend Gl. (5.1), berechnet. Die Summe wird als Heizspannung an das Netzgerät gesendet, an welches die Heizpatrone im Gaskühlsystem angeschlossen ist. Eigentlich handelt es sich bei der Heizpatrone um eine 50 W (d.h. bis 50 V bei 1 A belastbare) Patrone. Für den Targetbetrieb des MCT1S ist der Bereich von 0 – 35 V aber ausreichend, weshalb diese Begrenzung vorliegt (B). Über ein Shift Register wird in jedem Schleifendurchlauf der vorherige

Wert der Integralsumme wieder an dieses Unterprogramm übergeben, um die aktuelle Integralsumme berechnen zu können. Auch die Integralsumme wird so begrenzt, dass sie selbst nicht mehr als 0 – 35 V ausmachen kann, wenn sie mit dem *I*-Parameter multipliziert wird (B). Hierdurch werden beim Wechsel zwischen zwei stark unterschiedlichen Sollwerten die entstehenden Überschwinger gedämpft. Es könnte ohne diese Begrenzung auch passieren, dass der Regler bei sehr hohen Temperaturen eingeschaltet wird, um eine niedrige Temperatur zu halten, und so die Integralsumme einen hohen negativen Wert erreicht. Durch den geringen Temperaturspielraum nach unten würde ein Ausgleich sehr viel Zeit in Anspruch nehmen, beispielsweise wenn der Sollwert auf einen Wert von 2 K über dem mit der vorhanden Kühlleistung maximal erreichbaren Tiefpunkt läge. Die Integralsumme müsste sich anhand dieser geringen Abweichung erst wieder bis in den positiven Bereich füllen.

5.1.3 Notabschaltung

Zusätzlich zu den implementierten Schutzvorrichtungen im Programm ist zwischen Netzgerät und Heizpatrone eine elektrische Notabschaltung geschaltet, die bei Systemausfällen eingreift. Sie dient als Sicherheitsmechanismus gegen eine Überhitzung und damit einhergehende Beschädigung des Kaltkopfs.

Eine Logik vergleicht die an der Temperaturdiode anliegende Spannung mit einem festlegbaren Schwellwert und schaltet bei Erreichen dieser ein Relais um, das die Spannungsversorgung der Heizpatrone unterbricht.

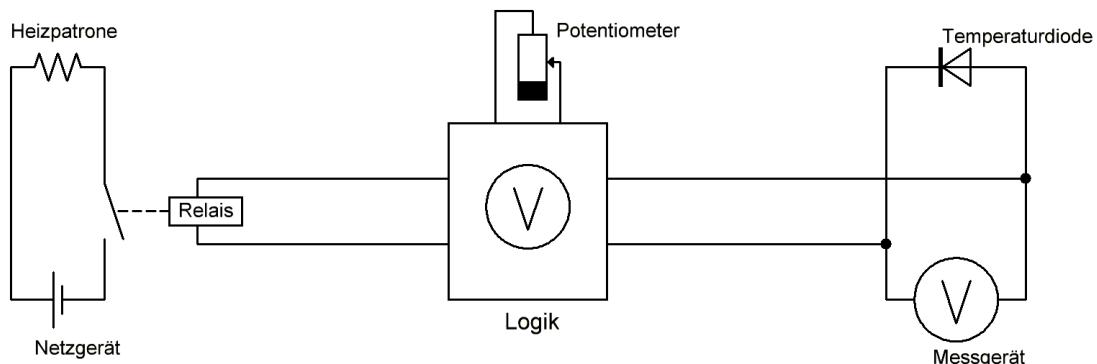


Abbildung 5.3: Stark vereinfachtes Ersatzschaltbild der Notabschaltung.

5.2 Kontrollmessungen

Das Finden geeigneter Reglerparameter basiert meist auf Trial-and-Error-Basis. Dieser Abschnitt behandelt die Suche und Optimierung des P - und I -Parameters. Zudem wird der Einfluss der Notabschaltung auf die Messresultate der Düsentemperatur überprüft.

5.2.1 Ermittlung geeigneter Reglerparameter

Für den ersten Testlauf des Reglers wurden die Parameter $P = 0,4$ und $I = 0,1$ gewählt, wie in Abb. 5.4 dargestellt ist. Es zeigte sich, dass ab dem Zeitpunkt, ab dem der Einschwingvorgang eigentlich abgeschlossen sein müsste, recht starke Schwankungen von bis zu $\pm 0,3\text{ K}$ um den Sollwert (40 K bei 5 bar) auftraten. Nach weiteren Justierungen stellten sich Parameter von $P = 0,85$ und $I = 0,085$ als geeignet heraus, was auch in Abb. 5.5 deutlich zu erkennen ist. Die Schwankungen wurden so auf $\pm 0,05\text{ K}$ minimiert. Auch während des Targetbetriebs bei hohen Drücken, beispielsweise bei 16 bar , zeigen sich bei den ausgewählten Temperaturen (22 K , $22,5\text{ K}$, $26,5\text{ K}$) in Abb. 5.6 lediglich geringe Abweichungen von der Solltemperatur.

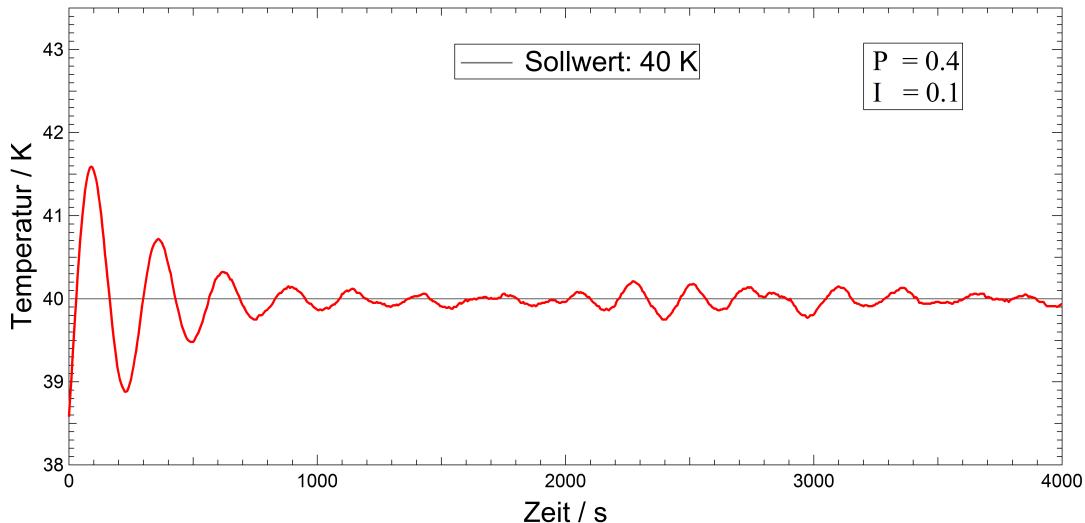


Abbildung 5.4: Einschwingvorgang des Reglers auf einen Sollwert von 40 K bei 5 bar Düsendruck. Es ist zu erkennen, dass der Wert mit Schwankungen von bis zu $\pm 0,3\text{ K}$ nicht stabil gehalten wird.

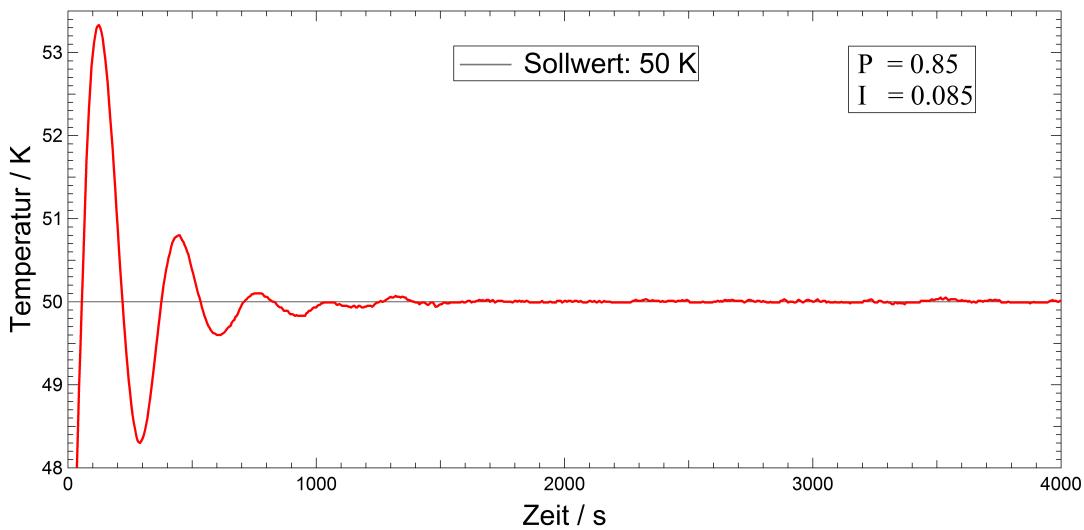


Abbildung 5.5: Einschwingvorgang des endgültigen Reglers auf einen Sollwert von 50 K bei 5 bar Düsendruck. Die Überschwinger sind zwar aufgrund des größeren Abstands zur Starttemperatur ein wenig stärker als in Abb. 5.4, aber der Wert wird mit Schwankungen von bis zu $\pm 0,05$ K stabil gehalten.

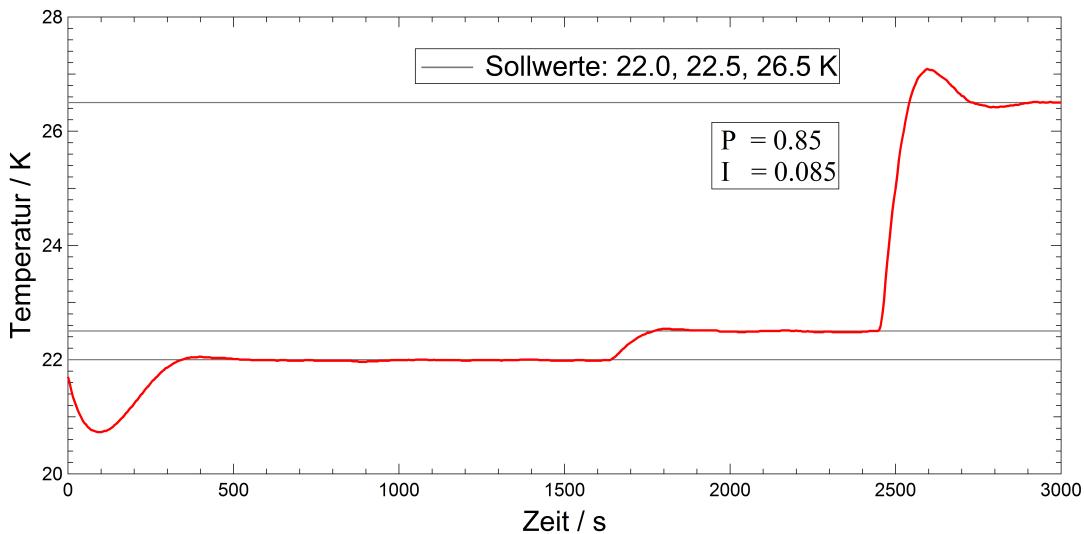


Abbildung 5.6: Verhalten des Reglers im Clusterbetrieb. Zu erkennen sind schnelle Einschwingvorgänge bei geringen Temperatursprüngen und sehr geringe Abweichungen ($< 0,05$ K) von den Sollwerten 22 K, 22,5 K und 26,5 K bei 16 bar Düsendruck.

5.2.2 Temperaturkorrektur

Die Notabschaltung ist über ein Y-Kabel zwischen Temperaturdiode und Messgerät angeschlossen und erzeugt somit keinen zusätzlichen elektrischen Widerstand, über den, bzw. die resultierende Spannung, bekanntlich die Temperatur vom Messgerät berechnet wird. Die Notabschaltung besitzt aber eine Spannungsversorgung, weshalb eine ungewollte Einspeisung nicht von vornherein ausgeschlossen werden kann. Um zu überprüfen, ob die Spannungsversorgung einen Einfluss auf die Ausgabe des Messgeräts hat, wurden Messungen mit und ohne angeschlossener Notabschaltung aufgenommen und miteinander verglichen. Hierbei wurden pro Messpunkt je acht Messwerte mit und ohne Notabschaltung aufgenommen, um den statistischen Fehler minimal zu halten. In Abb. 5.7 sind die Resultate abgebildet. Unter Fehlerfortpflanzung geht der vom Auflösungsvermögen des Messgeräts verursachte Fehler um eine Größenordnung geringer in die Gesamtabweichung ein, als der aus der Standardabweichung resultierende. Der vom Auflösungsvermögen des Messgeräts verursachte Fehler ist deshalb vernachlässigbar und so spiegelt sich nur die Standardabweichung in den Fehlerbalken wider. Der Fit mit einer Ausgleichsgeraden vom Typ $y = ax + b$ liefert $a = 1,0003 \pm 0,0003$ und $b = -0,01 \pm 0,01$, bestätigt dementsprechend keine messbaren Unterschiede zwischen dem Betrieb

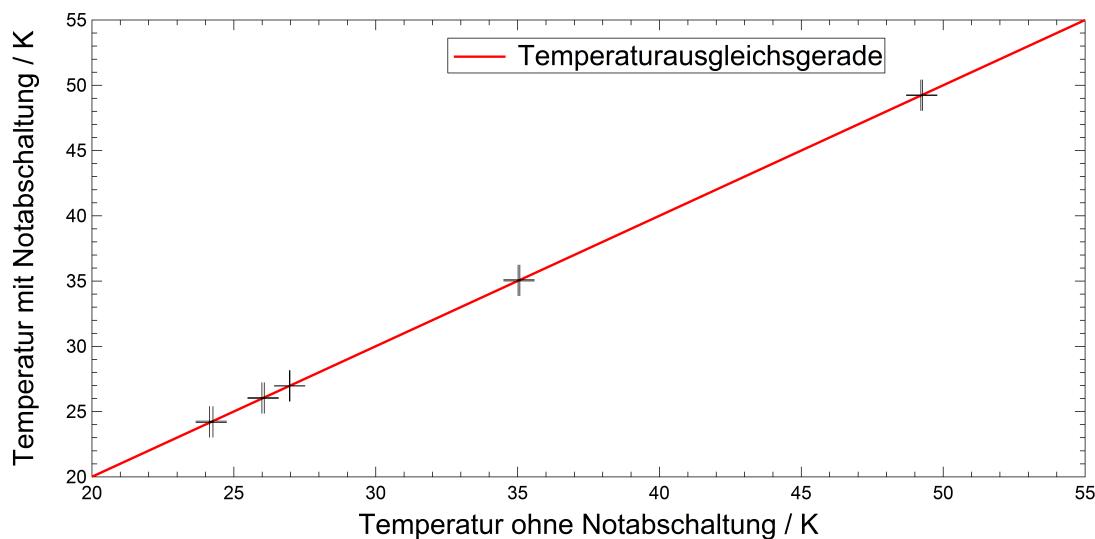


Abbildung 5.7: Vergleich der Temperaturanzeige mit und ohne angeschlossener Notabschaltung. Es lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen, die Notabschaltung muss bei weiteren Arbeiten am Target nicht berücksichtigt werden.

mit und ohne angeschlossener Notabschaltung. Zur Verdeutlichung ist in Abb. 5.8 die Temperaturdifferenz mit und ohne Notabschaltung dargestellt. Auch hier sind keine signifikanten Unterschiede sichtbar.

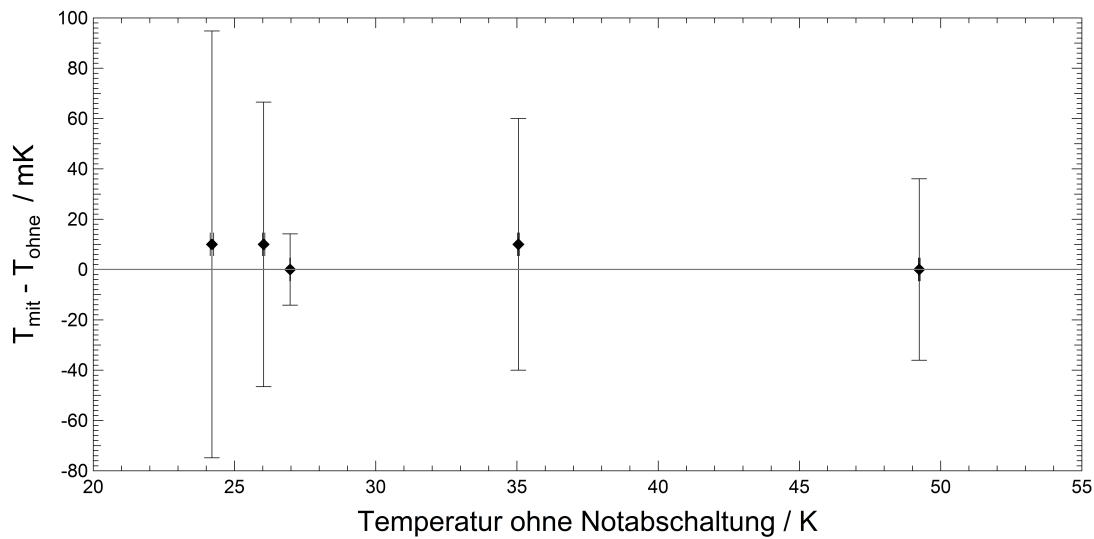


Abbildung 5.8: Verdeutlichung der mit und ohne Notabschaltung gemessenen, minimalen Temperaturdifferenzen. Die leichte Tendenz zu positiven Differenzen ist durch einen minimalen Temperaturabfall während der Messungen zu erklären.

6 Betrieb des MCT1S

Für den reibungslosen Betrieb des Cluster-Jet Targets muss die Slow Control Software über lange Zeitabschnitte unterbrechungslös und stabil ausgeführt werden können. Über einen Zeitraum von mehreren Wochen wurde dies validiert und es konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Auch der Arbeitsspeicherbedarf ist in dieser Zeit nicht angestiegen. In diesem Kapitel werden einige ausgewählte typische Betriebsvorgänge und Parameter des MCT1S in Bezug auf die in dieser Arbeit entwickelte Slow Control Software vorgestellt.

6.1 Abkühlverhalten und Reglerstabilität

Die implementierte Slow Control Software ermöglicht bei jeder Inbetriebnahme des Targets die Aufnahme einer Kühlkurve sowie die Beobachtung der Temperatur beim Aufwärmen und im Standby. In Abb. 6.1 und 6.2 sind ein Kühl- und ein Aufwärmvorgang dargestellt. Während sich die Kühlkurve hauptsächlich linear und erst ab Temperaturen von 50 K exponentiell verhält, weil langsam die maximale Kühlleistung erreicht wird, nähert sich die Temperatur beim Aufwärmvorgang über die gesamte Dauer exponentiell der Raumtemperatur. Der Aufwärmvorgang dauert mit etwa 18 Stunden deutlich länger, als der Kühlvorgang mit rund einer Stunde. Dies zeugt von einer guten Wärmeisolierung des Systems und lässt sich unter Einsatz der Heizung verkürzen. Die sich aus der Software ergebende Möglichkeit, das Target im Standby bei 50 K zu halten, verringert die Wartezeit bis zum Erreichen der gewünschten Temperatur von etwa einer Stunde auf wenige Minuten.

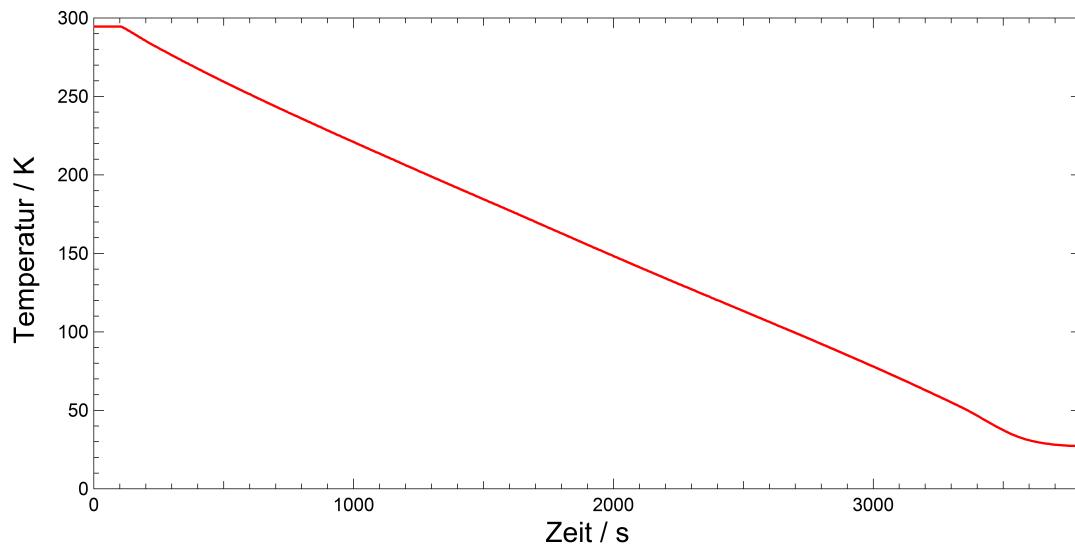


Abbildung 6.1: Darstellung einer Kühlkurve des MCT1S bei 5 bar Düsendruck von Raumtemperatur bis in den Temperaturbereich des Clusterbetriebs. Auffallend ist der lineare Abfall der Temperatur bis hin zu 50 K, von wo an die Kühlleistung des Kaltkopfes bzw. Kompressors in eine Sättigung kommt. Der Abkühlvorgang dauert rund eine Stunde.

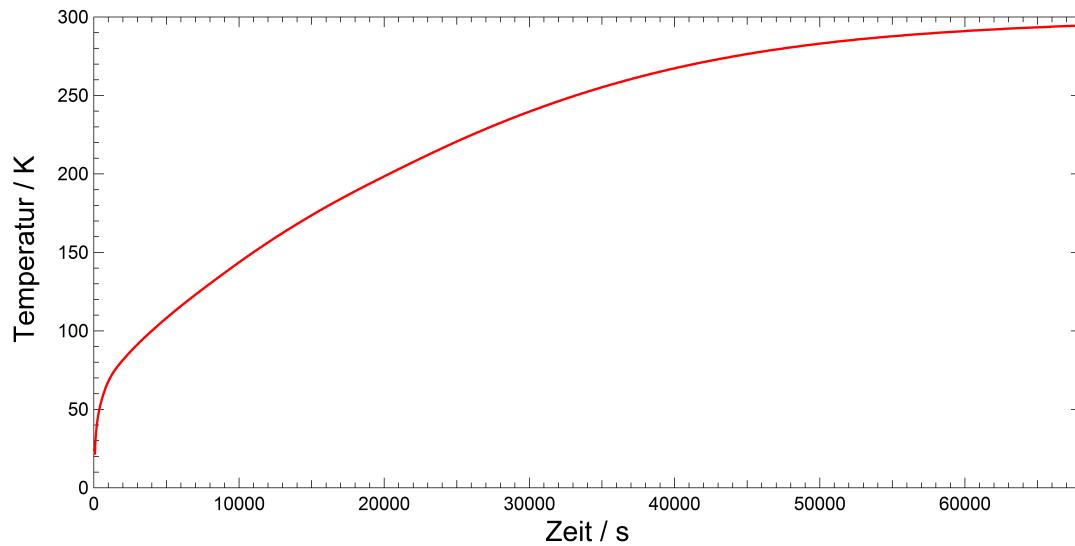


Abbildung 6.2: Aufwärmvorgang von Betriebstemperaturen bis zur Raumtemperatur (ohne zugeschaltete Heizung) bei 5 bar Düsendruck. Im Vergleich zum Abkühlvorgang dauert der Aufwärmvorgang rund 18 Stunden, was für eine gute Isolierung spricht und sich durch Zuschalten der Heizung bei Bedarf verkürzen lässt.

In Abb. 6.3 ist eine Langzeitmessung im Standby über 24 Stunden dargestellt. Die Schwankungen von bis zu $\pm 0,05\text{ K}$ sind insbesondere deshalb nicht noch weiter minimierbar, weil das Temperaturmessgerät nur ein Auflösungsvermögen von $0,01\text{ K}$ besitzt. Hinzu kommt, dass das Netzgerät für die Heizpatrone in $0,02\text{ V}$ -Schritten schaltet. Der Regler findet deshalb einen genaueren Wert für die Heizspannung, als das Netzgerät liefern kann, was die leichte Periodizität der Abweichungen erklärt.

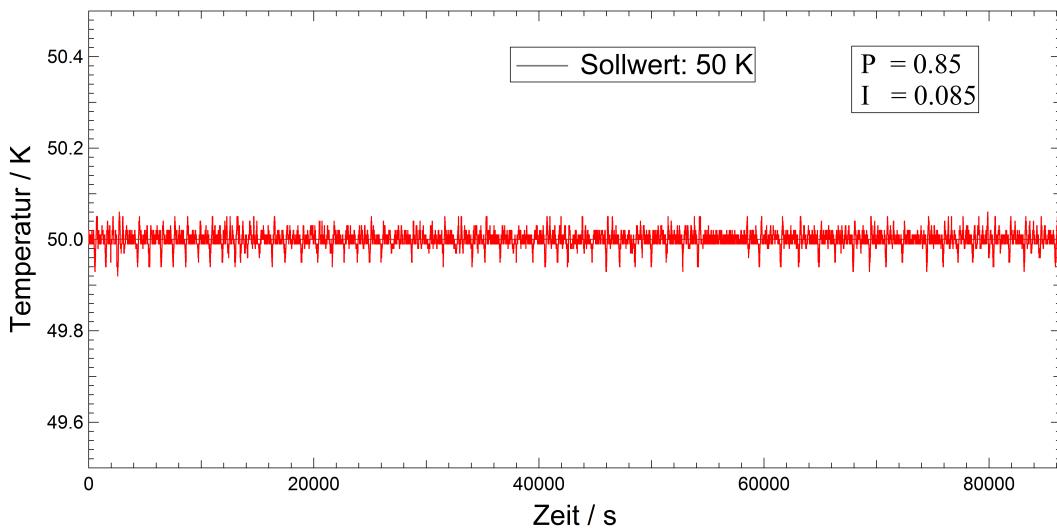


Abbildung 6.3: Langzeitmessung der Temperatur im Standby bei 50 K über 24 Stunden bei 5 bar Düsendruck. Trotz der Trägheit des Systems sind die Schwankungen minimal. Die leichte Periodizität ergibt sich aus der Schaltgenauigkeit des Netzgeräts.

Die Stabilität der Temperatur im Clusterbetrieb wird in Abb. 6.4 betrachtet. Es ist zu erkennen, dass auch in diesem Fall keine signifikanten Schwankungen um den eingestellten Sollwert auftreten. Da das Cluster-Jet Target MCT1S Wasserstoff aus dem Verteiler des $\overline{\text{P}}\text{ANDA}$ -Cluster-Jet Target Prototyps bezieht, tritt bei der Veränderung von Druck oder Temperatur eine Veränderung des Gasflusses auf. Beide Targets weisen einen minimalen Einfluss aufeinander auf, der durch die angewandten Regelmechanismen optimal ausgeglichen wird. In Abb. 6.5 sind diese minimalen Einflüsse auf die Temperatur sichtbar. Der Regler gleicht auftretende Störungen erfolgreich aus.

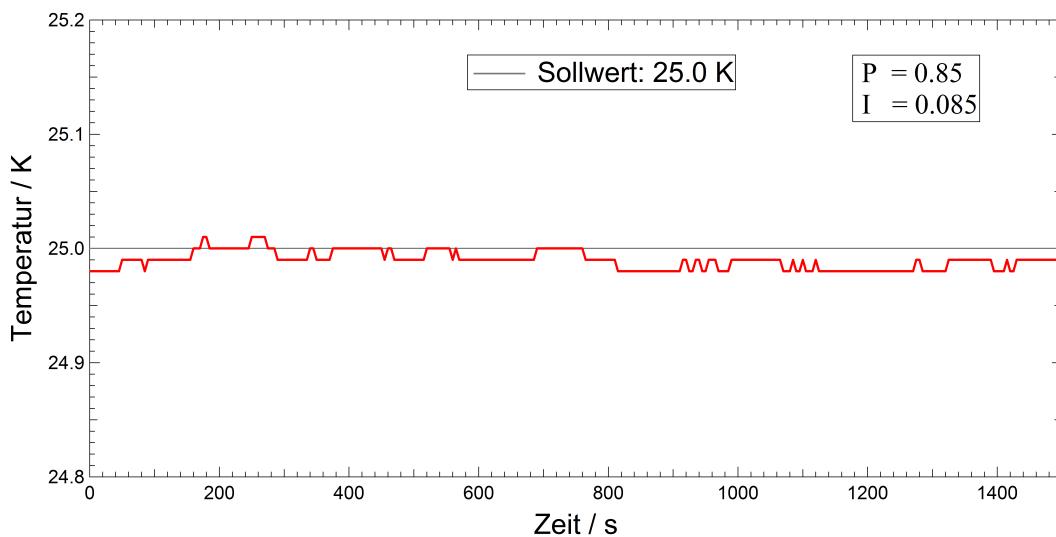


Abbildung 6.4: Messung der Temperatur im Clusterbetrieb bei 25 K und 16 bar Düsendruck. Auch hier sind die Abweichungen minimal. Zu erkennen ist zusätzlich das Auflösungvermögen des Temperaturmessgeräts.

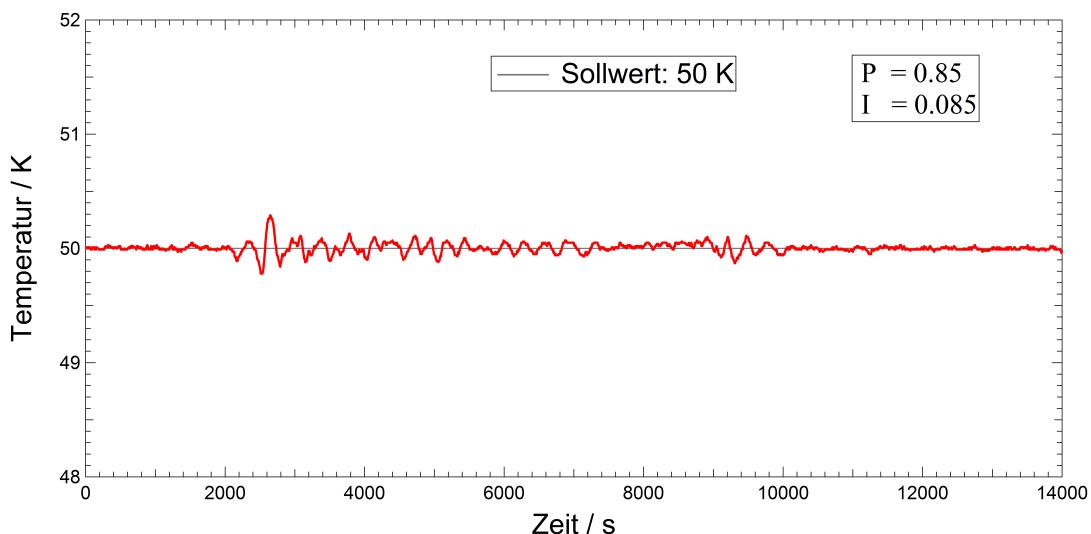


Abbildung 6.5: Verhalten des Reglers im Standby bei auftretenden Störungen. Die Störungen werden erfolgreich ausgeglichen.

6.2 Analyse des Clusterbetriebs

Aufgezeichnete Betriebsparameter der von S. Grieser im Rahmen ihrer Masterarbeit durchgeföhrten Untersuchung zeigen in diesem Abschnitt die Funktionalität der Slow Control Software. In Abb. 6.6 sind die Temperatur-, Gasfluss- und Düsendruckverläufe zu einer ausgewählten Messung abgebildet. Mit Hilfe der Slow Control Software können die Messwerte aufgenommen und zur Weiterverarbeitung bereitgestellt werden. Die implementierte Temperaturregelung und Düsendruckansteuerung sorgt im Rahmen dieser Messung dafür, dass verschiedene Temperaturen bei unterschiedlichen Drücken in Stufen durchgegangen werden können, was beispielsweise zur Dichteanalyse notwendig ist. An der Temperaturkurve sind nach jedem Einschwingen des Reglers kleine Temperatureinbrüche erkennbar. Diese stammen vom Schließen der in Kapitel 3 erwähnten Düsenklappe, was Untergrundbestimmungen in der Wechselwirkungskammer als Teil der Messung erlaubt. Eine Temperatur- oder Düsendruckänderung führt zu einem Nachregeln des Gasflusses durch die Brooks 0254 Messeinheit.

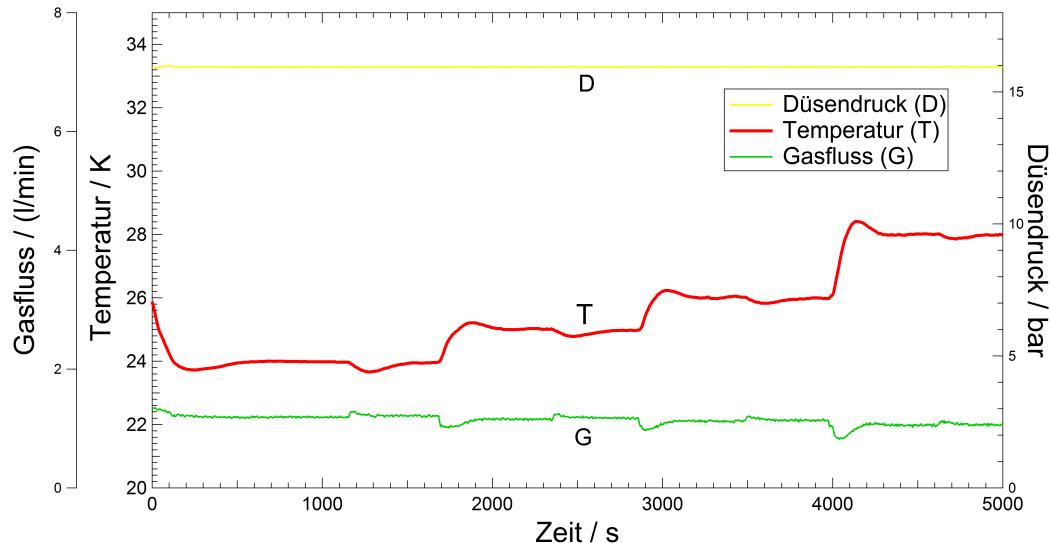


Abbildung 6.6: Einfluss der Temperatur auf den Gasfluss bei konstantem Düsendruck. Mit Hilfe des Reglers wird die Temperatur in kleinen Schritten erhöht. Dies und das Stoppen des Clusterstrahls mit der Düsenklappe bewirkt eine Änderung des Skimmerkammerdrucks und beeinflusst somit die Düsenter temperatur und gleichzeitig den Gasfluss, der zum Halten des Düsendrucks geregelt wird (zugrundeliegende Messung: S. Grieser).

In Abb. 6.7 ist darüber hinaus der entsprechende Verlauf des Skimmer- und Kollimatorkammerdrucks dargestellt. Der Kollimatorkammerdruck reagiert stark auf das Schließen der Düsenklappe, da diese in der Skimmerkammer bereits den Strahl unterbricht und der Clusterstrahl deshalb am Eintritt in die Kollimatorkammer gehindert wird. Der Gasfluss in die Skimmerkammer bleibt trotz Düsenklappe annähernd gleich (vgl. Abb. 6.6) und nur ein geringer Bruchteil des Gesamtclusterstrahls wird in die Kollimatorkammer extrahiert. Daher sind keine signifikanten Anstiege zu erwarten, wie in Abb. 6.7 ebenfalls gezeigt wird.

Der in Abb. 6.8 dargestellte Vorpumpendruck zu der behandelten Temperaturkurve veranschaulicht, dass für den Betrieb mit Wasserstoff auch hier, selbst bei hohen Düsendrücken, kein kritischer Druck vorliegt.

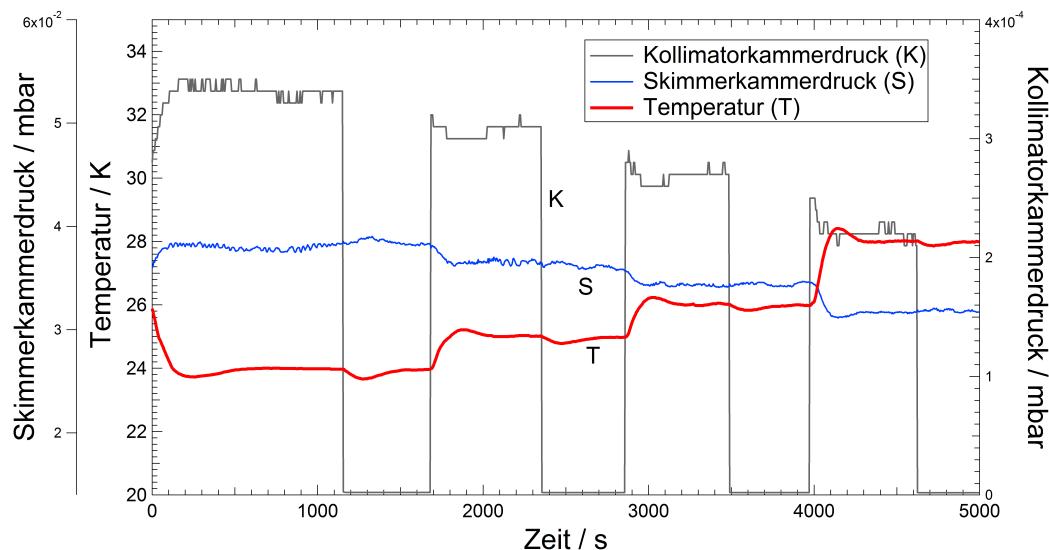


Abbildung 6.7: Vergleich des Skimmer- und Kollimatorkammerdrucks mit dem selben Temperaturverlauf, wie in Abb. 6.6. An dem Kollimatordruck wird erwartungsgemäß auch das Schließen der Düsenklappe sichtbar. Skimmer- und Kollimatorkammerdruck fallen zu höheren Temperaturen ab (zugrundeliegende Messung: S. Grieser).

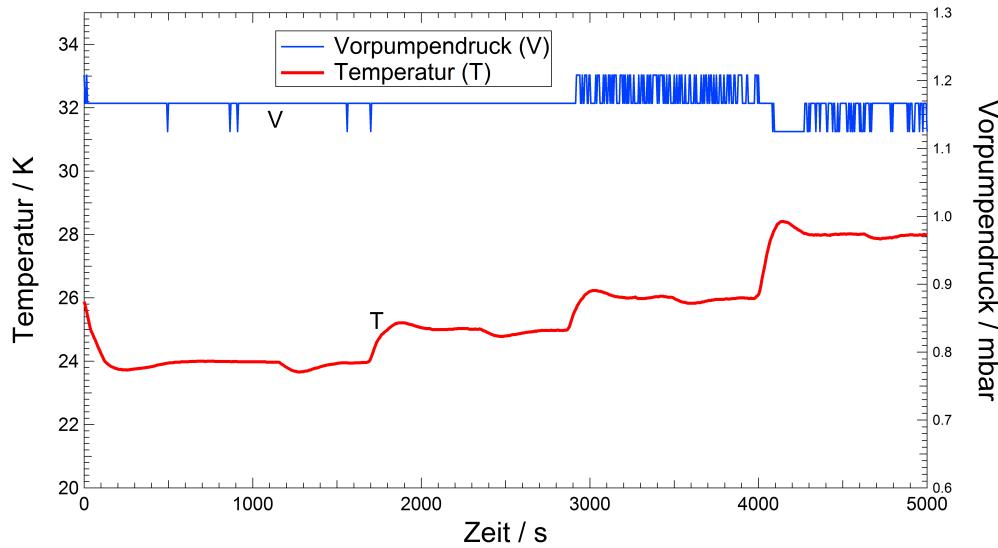


Abbildung 6.8: Vergleich des Vorpumpendrucks mit dem Temperaturverlauf aus Abb. 6.6. Es lässt sich schnell feststellen, dass im Clusterbetrieb auch an der Stelle des höchsten Drucks kein kritischer Druck in Bezug auf den Betrieb mit Wasserstoff erreicht wird. Auch ist das Auflösungsvermögen des Ceravacs zu erkennen (zugrundeliegende Messung: S. Grieser).

Der Zusammenhang zwischen den geringen Temperatureinbrüchen nach jedem Einschwingen des Reglers und der Düsenklappe wird besonders beim Betrachten des Auffängerdrucks in Abb. 6.9 deutlich. Zu den entsprechenden Zeiten fällt dieser, ebenso wie der Kollimatorkammerdruck, rapide ab, da die Cluster am Eindringen in die Wechselwirkungskammer gehindert werden. Die generelle Tendenz des Auffängerdruckverlaufs ermöglicht Vorhersagen über die höchste Dichte, nämlich bei einem Maximum des Drucks.

In Abb. 6.10 ist der seltene Fall einer eingefrorenen Düse abgebildet. Mit Hilfe der in der Slow Control Software implementierten Formel zur Düsendurchmesserberechnung kann die eingefrorene Düse schnell erkannt werden. Durch den gehemmten Gasfluss liefert die Berechnung einen verschwindenden Düsendurchmesser. Zusätzlich ist die stark abfallende Temperatur unterhalb der typischen Temperatur (20 K bei 18 bar) ein weiteres Indiz.

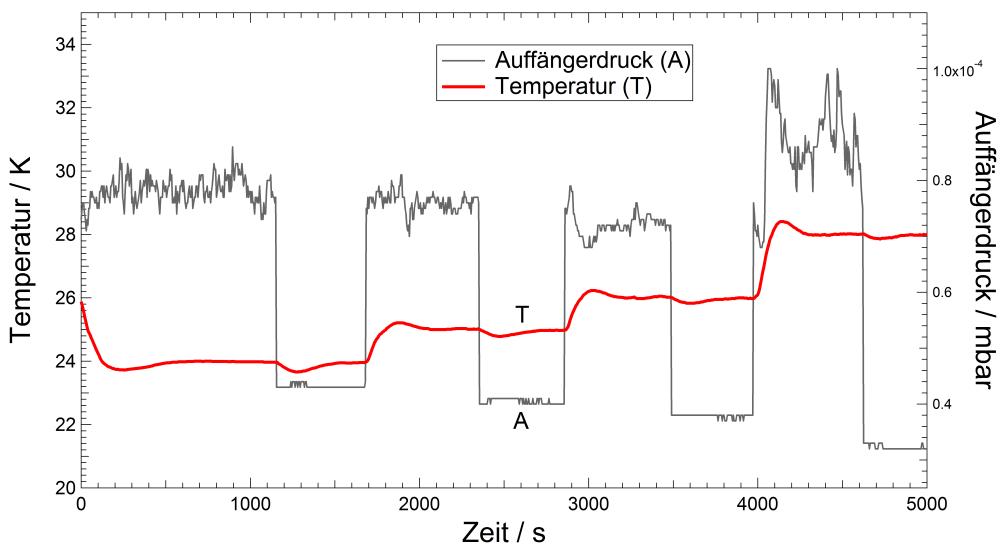


Abbildung 6.9: Vergleich des Auffänger- bzw. Wechselwirkungskammerdrucks mit der in Abb. 6.6 eingeführten Temperaturkurve. Der Auffängerdruck fällt bei geschlossener Düsenklappe rapide ab. An diesen Stellen sind die minimalen Temperatureinbrüche erkennbar (zugrundeliegende Messung: S. Grieser).

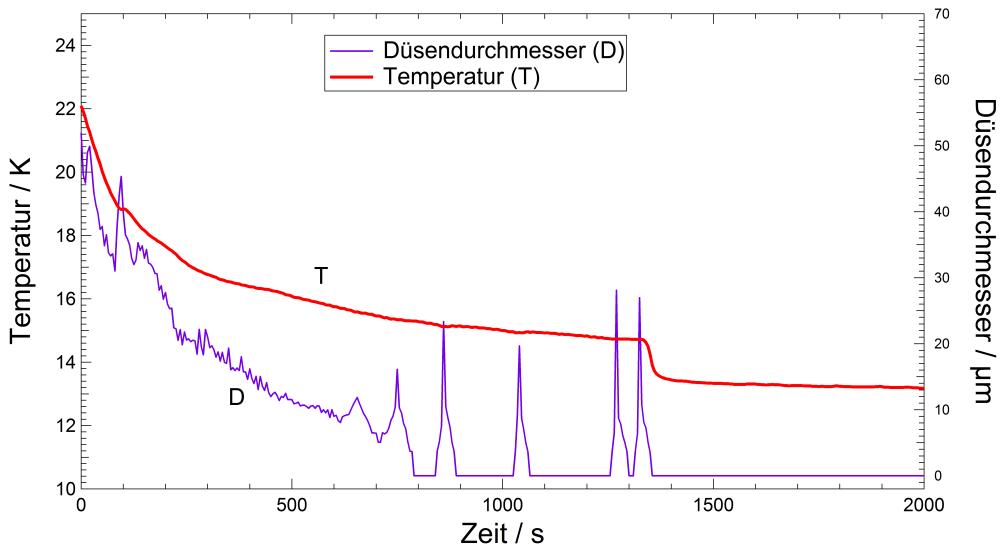


Abbildung 6.10: Darstellung der Temperatur und des Düsendurchmessers während eines seltenen Zufrierens der Düse. Die Temperatur sinkt unter regulär erreichbare Werte und der Düsendurchmesser fällt wegen des unterbrochenen Gasflusses auf null ab.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit und der Masterarbeit von S. Grieser wurde ein kompaktes Cluster-Jet Target erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen. Das Cluster-Jet Target MCT1S ist so konstruiert, dass es leicht an seinen zukünftigen Standort am Institut für Laser- und Plasmaphysik Düsseldorf verlegt werden kann. Dort wird es zunächst an einem Laser mit rund $200 \mu\text{J}$ Energiedeposition am Target und demnächst an dem 200 TW-Darcturus Hochleistungslaser eingesetzt [BG13], um mit den in dieser Arbeit beschriebenen Mechanismen der Laserbeschleunigung Ionenstrahlen zu erzeugen. Die erzeugten Ionenstrahlen werden darauffolgend mit einem Berylliumtarget wechselwirken, wodurch über verschiedene Reaktionen gerichtete Neutronenquellen entstehen, die in modernen Anwendungen der Material- und Biophysik ihre Verwendung finden.

Für den Langzeitbetrieb des Cluster-Jet Targets am ILPP in Düsseldorf und für Untersuchungen der Eigenschaften des Clusterstrahls wurde im Rahmen dieser Bachelorarbeit eine speziell auf das Target abgestimmte Slow Control Software entwickelt. Diese Software überwacht sämtliche Targetparameter, wie beispielsweise die einzelnen Vakuumdrücke, Gasfluss, Düsendruck sowie -temperatur, und ermöglicht sogar die Ansteuerung des Targets. Hierzu wurde eine intuitive Benutzeroberfläche erstellt, anhand derer die einzelnen Messinstrumente und ihre Messungen schnell eingesehen und zur Übersicht ihr jeweiliger Verlauf grafisch dargestellt werden können. Zudem werden alle Parameter in einer übersichtlichen Messwertetabelle abgespeichert und können auf diese Weise mit anderen Anwendungen verarbeitet werden. Mögliche Fehler werden ebenfalls an ein Fehlerprotokoll übergeben. Auftretende Störungen, wie z.B. das Blockieren der Lavaldüse, können direkt identifiziert werden, in diesem Beispiel anhand des berechneten Düsendurchmessers. Die einzelnen Targetparameter sind zur Überwachung jederzeit auf einer Webseite verfügbar.

Die Eigenschaften eines Clusterstrahls bzw. der Cluster, wie Geschwindigkeit und Dichte, werden, abhängig von der gewählten Lavaldüse, hauptsächlich durch die

eingestellten Druck- und Temperaturparameter definiert. Deshalb wurde ein effizienter, automatischer PI-Regler zur Temperaturregelung implementiert. Mit diesem lassen sich Temperatursollwerte halten, was für den Betrieb des Cluster-Jet Targets bei höchsten Dichten und zur Analyse des Clusterstrahls allgemein unerlässlich ist. Der Regler ist so aufgebaut, dass er unter Anpassung der Reglerparameter jederzeit auch für andere Targets oder sogar andere Experimente genutzt werden kann. Über Optimierungsvorgänge wurden sinnvolle Reglerparameter gefunden. Bei einer der zusätzlichen Sicherung dienenden Notabschaltung konnte nicht ausgeschlossen werden, dass diese keine Veränderung der Temperaturmessung bewirkt. Hier konnte gezeigt werden, dass sich mit dem Auflösungsvermögen des Messgeräts keine messbaren Abweichungen ergeben, die in späteren Experimenten hätten berücksichtigt werden müssen.

Anhand einer Kühl- und Aufwärmkurve sowie eines Ausschnittes aus den Messungen von S. Grieser zur Untersuchung des Clusterstrahls konnte die Weiterverarbeitung der gemessenen Daten im typischen Targetbetrieb mit der entwickelten Slow Control Software erläutert werden. Auch wurde die Stabilität des Temperaturreglers in verschiedenen signifikanten Temperaturbereichen und der Software allgemein untersucht und als sehr zufriedenstellend bewertet.

Neben den Untersuchungen zur Intensität des reflektierten Laserlichts in der Wechselwirkungskammer und damit einhergehender Dichteanalyse konnte S. Grieser die Stabilität des Clusterstrahls über mehr als 24 Stunden untersuchen. Im Anschluss daran ist eine Untersuchung der Kernstrahlen in der Skimmerkammer geplant und es wird diskutiert, ob Bilder von einzelnen Clustern im Rahmen ihrer Masterarbeit aufgenommen werden können. Des Weiteren wird der Targetaufbau von A.-K. Hergemöller in Kürze leicht modifiziert, um mit geeigneten Komponenten über die Mie-Streuung auf Clustergrößen zu schließen.

Literaturverzeichnis

- [BF99] BITUK, D.R. und FEDOROV, M.V.: *Relativistic ponderomotive forces*, Journal of Experimental and Theoretical Physics, Volume 89, Issue 4, pp 640-646, Oktober 1999.
- [BG13] BÜSCHER, M. und J. GIBBON: *Laser-induced production of short-pulse few-MeV neutron beams*. Dokument, 03.05.2013.
- [Büs13] BÜSCHER, M.: *Ideas for Projects @ FZJ & HHUD*. Präsentation, 10.09.2013.
- [Dom97] DOMBROWSKI, H. et al.: *The Münster cluster target for internal storage ring experiments*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 386 (2–3) (1997), 1997 228.
- [Dra12] DRAXINGER, W.: *Entwicklung und Charakterisierung eines Pixeldetektors für laserbeschleunigte Ionen*. Diplomarbeit, Ludwig–Maximilians–Universität München, 26.03.2012.
- [Gre13] GREVEN, P.: *Simulation studies of laser-induced particle acceleration in gas and cluster-jet targets*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, März 2013.
- [Gri14] GRIESER, S.: Masterarbeit, Westfälische Wilhelms–Universität Münster, in Vorbereitung, 2014.
- [Her13] HERGEMÖLLER, A. K.: *Präparation von Clusterstrahlen und der Aufbau der finalen Clusterquelle für das \bar{P} ANDA-Experiment*. Masterarbeit, Westfälische Wilhelms–Universität Münster, März 2013.
- [Köh10] KÖHLER, E.: *Das Münsteraner Cluster-Jet Target MCT2, ein Prototyp für das \bar{P} ANDA-Experiment & die Analyse der Eigenschaften des Clusterstrahls*. Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms–Universität Münster, Februar 2010.

- [Kli13] KLIMPKI, G. M.: *Laserbeschleunigte Protonen*. Masterseminarvortrag, Universität Heidelberg, Februar 2013.
- [LbV96] Gebrauchsanleitung Leybold RGS20/120 RGD 210/510/580/1245 Kaltköpfe für Kryo-Refrigeratoren, 1996.
- [LsM13] User's Manual LakeShore Model 336 Temperature Controller, 2013.
- [Pau00] PAULY, H.: *Atom, Molecule, und Cluster Beams II*, 3. Aufl. Springer, 2000.
- [Rei12] REINHARDT, S.: *Detection of laser-accelerated protons*. Doktorarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München, 19.06.2012.
- [Rot13] ROTH, M. et al.: *Bright Laser-Driven Neutron Source Based on the Relativistic Transparency of Solids*, Phys. Rev. Lett. 110, 044802, 2013.
- [Sch08] SCHOLLMEIER, M.: *Optimierung und Kontrolle laserbeschleunigter Protonenstrahlen*. Doktorarbeit, Technische Universität Darmstadt, 01.12.2008.
- [Taf07] Das große Tafelwerk interaktiv, 1. Aufl. Cornelsen, 2007.
- [Täs11] TÄSCHNER, A. et al.: *High density cluster jet target for storage ring experiments*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 660 (2011) 22–30, 2011.
- [Täs13] TÄSCHNER, A.: *Entwicklung und Untersuchung von Cluster-Jet-Targets höchster Dichte*. Doktorarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 18.01.2013.
- [Tech1] http://www.techniklexikon.net/d/heisse_elektronen/heisse_elektronen.htm, 02.10.2013.
- [WAW88] WUTZ, M., ADAM, H. und WALCHER, H.: *Theorie und Praxis der Vakuumtechnik*. 4. Aufl. Friedr. Vieweg & Sohn, 1988.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die zur erfolgreichen Anfertigung dieser Arbeit beigetragen haben.

Zuerst danke ich Herrn Prof. Dr. A. Khoukaz für die Aufnahme in die Arbeitsgruppe sowohl in Bezug auf die Bachelorarbeit, als auch im Rahmen des zurückliegenden Schülerpraktikums und die freundliche Unterstützung bei der Realisierung des Target-Aufbaus sowie jeglicher Fragestellungen.

Herrn Dr. C. Klein-Bösing danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Meinem ehemaligen Physiklehrer Herrn G. Tüllmann danke ich für die schulische Heranführung an den Stoff und besonders für den Hinweis auf diese Arbeitsgruppe bezüglich des Schülerpraktikums.

Vielen Dank an D. Bonaventura für die handwerkliche Unterstützung während des Aufbauprozesses sowie für das Anfertigen der CAD-Zeichnungen.

Bei Herrn W. Hassenmeier bedanke ich mich für das Schiessen und Bearbeiten der Fotos vom Aufbau.

Auch möchte ich mich bei der Feinmechanik- und Elektronikwerkstatt bedanken.

Danke Silke für die gemeinsame Arbeit im Labor, beim Targetaufbau, für die Vorlagen und nicht zuletzt für die gute Betreuung und das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Auch an dich, Ilhan, vielen Dank für die zwar kurze, aber nette Zusammenarbeit und an Theresa für das unterstützende Korrekturlesen.

Literaturverzeichnis

Esperanza, ebenfalls vielen lieben Dank für das Korrekturlesen meiner Arbeit, die nette Betreuung während des Schülerpraktikums und überhaupt für Alles.

Alexander, deine ausgesprochen freundliche und kompetente Art bei Fragen zu meinem Programm oder anderen technischen Dingen weiß ich sehr zu schätzen.

Danke Marcel für das gemeinsame Besuchen aller bisherigen Kurse im Verlauf des Studiums, das nächtelange Protokolle-Schreiben und generell deine Freundschaft.

Weiterhin danke ich Ann-Katrin, Florian, Kay, Paul, Christopher, Nils, Michael, Daniel, Malte, Lukas und Patrice für die humorvolle und angenehme Atmosphäre in der Arbeitsgruppe.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner mich unterstützenden Familie und besonders bei meinem Vater, der mich an das naturwissenschaftliche Denken herangeführt hat.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit mit dem Titel „*Entwicklung einer Slow Control Software zur Überwachung und Ansteuerung eines Cluster-Jet Targets*“ selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommenen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

.....
(Datum, Unterschrift)

Ich erkläre mich mit einem Abgleich der Arbeit mit anderen Texten zwecks Auffindung von Übereinstimmungen sowie mit einer zu diesem Zweck vorzunehmenden Speicherung der Arbeit in eine Datenbank einverstanden.

.....
(Datum, Unterschrift)