

Mathias Martin Dibon

Entwicklung und Verbesserung eines Blower Gun Pellet Injektors für die Anwendung in thermonuklearen Fusionsanlagen

**IPP 1/354
April, 2014**



NTech
Lehrstuhl für
Nukleartechnik



Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik



Technische Universität München

Masterthesis

von cand. Ing. Mathias Martin Dibon
Matrikelnummer 03626136

Entwicklung und Verbesserung eines Blower Gun Pellet Injektors für die Anwendung in thermonuklearen Fusionsanlagen

Betreuer TUM: Prof. Dr. Rafael Macian-Juan

Prof. Dr. Antonino Cardella

Betreuer : Dr. Peter Lang

Ausgegeben: 01.09.2013

Abgegeben: 28.02.2014

Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Hilfe Dritter angefertigt zu haben. Gedanken und Zitate, die ich aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommen habe, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen und wurde bisher nicht veröffentlicht.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Arbeit durch den Lehrstuhl für Nukleartechnik der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden kann.

München, den 28.02.2014

Mathias Martin Dibon

Abstract

The refueling of the high temperature plasma is one of the main challenges for the operation of fusion reactors. Therefore, it is necessary to conduct pellet injection experiments on the new stellarator W7-X, in order to gather data on the fueling efficiency of the plasma. The Blower Gun, which has been used at ASDEX Upgrade, was modified to a fueling configuration to meet the requirements of W7-X. In order to evaluate the expected performance of the Blower Gun in the new experiment, the injector was set up in a similar configuration as at W7-X, including a suitable guiding tube. For fueling purposes it has been found by modelling, that pellets with 2mm diameter and 2mm length, injected at rather low velocity and frequency, are appropriate. The tests were conducted for deuterium, hydrogen and hybrid pellets. Hybrid pellets consist of 50% H_2 and 50% D_2 . Frequencies between 2Hz and 50 Hz and propellant gas pressures of 1bar/abs to 6bar/abs were applied. Results concerning pellet velocity and off-axis angle at the end of the guiding tube, delivered mass and delivery efficiency are composed in this report.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xv
Nomenklatur	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation für die Erforschung der Kernfusion	1
1.2 Pellet-Injektion	5
1.3 Geschichte der Garching Blower Gun	7
2 Theoretische Grundlagen	9
2.1 Wahl der Pellet-Parameter	9
2.2 Abschmelzen eines D_2/H_2 Eisstranges im Vakuum	10
2.3 Gas drag	14
2.4 Leidenfrost Effekt	19
2.5 Volumenrekonstruktion mittels Bayesian analysis	25
2.6 Das Plasma-Shielding Modell	28

3	Versuchsaufbau	31
3.1	Aufbau und Funktionsprinzip der Blower Gun	31
3.2	Das Zielgefäß	38
3.3	Die Führungsrohre	39
3.3.1	Das Testrohr	40
3.3.2	Das kritische Führungsrohr	43
3.4	Diagnostiken	45
3.4.1	Lichtschranken	45
3.4.2	Shadowgraphy	47
3.4.3	Drucksensoren	49
3.4.4	Winkelbestimmung	51
3.4.5	Oszilloskop	53
3.4.6	Temperaturmessung	54
3.4.7	Durchflussmessung	54
3.4.8	Quadropol-Massenspektrometer	55
3.5	Steuerung	56
3.5.1	SIMATIC S7 WinCC	56
3.5.2	Module	58
3.5.3	Bool-Prozessor	60
3.6	Aufbau im Labor	60
4	Versuchsdurchführung	63
4.1	Vorversuche	63
4.1.1	Standzeit von D_2/H_2 Eis im Vorratskryostaten	63
4.1.2	Abkühlverhalten der Blower Gun	64
4.1.3	Hybrid-Eis	64
4.2	Messung der Pelletgeschwindigkeiten, Volumina und Transfer- raten	65
4.3	Austrittswinkel	68
5	Auswertung	69
5.1	Standzeit von D_2/H_2 -Eis im Vorratskryostaten	69

INHALTSVERZEICHNIS

5.2	Abkühlverhalten der Blower Gun	70
5.3	Hybrid-Eis	70
5.4	Auswertung von Pelletgeschwindigkeit, Volumen und Transferrate	70
5.5	Bestimmung des Austrittswinkels	73
6	Resultate	75
6.1	Standzeit von D_2/H_2 -Eis im Vorratskryostaten	76
6.2	Abkühlverhalten der Blower Gun	78
6.3	Hybrid-Eis	80
6.4	Pelletgeschwindigkeiten	82
6.5	Transferrate	86
6.6	Transfereffizienz	89
6.7	Austrittswinkel	92
7	Zusammenfassung	95
8	Ausblick	99
A	Soffwerte	101
B	Spezifikationen der Pumpen	103
C	Schaltpläne	105
D	Fehlerrechnung	111
D.1	Geschwindigkeitsmessung	111
D.2	Pelletvolumen	112
D.3	Austrittswinkel	114
E	Fragebogen von W7-X bezüglich der Blower Gun	115

Abbildungsverzeichnis

1.1	Gloabler Energieverbrauch von 2005 bis 2035 [3]	2
2.1	Auswahl an möglichen Pelletparametern[35]	10
2.2	Vereinfachtes Modell des Eisstranges im Vakuum	11
2.3	Änderung des Radius über die Zeit für H_2/D_2 Eisstränge . . .	14
2.4	Prinzip des Beschleunigungsmechanismus	15
2.5	Geschwindigkeitsverläufe von D_2/H_2 -Pellets für verschiedene Treibgase	17
2.6	Standzeit eines Wassertropfens auf einer heißen Oberfläche[21]	20
2.7	Schema des Leidenfrost Effekts eines Pellets im Schussrohr . .	21
2.8	Minimaler Krümmungsradius eines Schussrohres in Abhängig- keit der Pelletgeschwindigkeit	24
2.9	Schattenbild vor und nach der Umwandlung	25
2.10	Pelletablation bei verschiedenen Pelletgeschwindigkeiten[35] . .	29
3.1	Grobe Unterteilung der Blower Gun	32
3.2	Schema der Eisproduktion und des Beschleunigungsmechanis- mus	34
3.3	Zyklen des Beschleunigungsmechanismus[10]	35
3.4	Das Zielgefäß	39
3.5	Geometrie des Test-Führungsrohres	40
3.6	Maximaler Auftreffwinkel im Führungsrohr	42
3.7	Geometrie des kritischen Führungsrohres	43
3.8	Fertigung des kritischen Führungsrohres	44

3.9	Die zwei Anordnungen der jeweils fünf Lichtschranken um das Plexiglasrohr nach dem Führungsrohr	47
3.10	Ansteuerung der Shadowgraphy	49
3.11	Papiervorschub mit Einschusslöchern	52
3.12	Off-axis Winkel α der Pellets nach dem Führungsrohr	53
3.13	Anzeige des Blower Gun Kontrollsystems	57
3.14	Pulskette der Module[38]	59
3.15	Laboraufbau mit verschiedenen Führungsrohren	62
5.1	Programm zur Auswertung der Rohdaten	71
6.1	Sublimationszeit von D_2/H_2 -Eis im Vakuum	76
6.2	Verlauf der Temperaturen und Helium-Durchflüsse beim Abkühlen	78
6.3	Ergebnisse des Massenspektrometers	80
6.4	Pelletgeschwindigkeiten für D_2 -Eis mit dem Testrohr und dem kritischen Rohr	82
6.5	Pelletgeschwindigkeiten für H_2 -Eis und Hybrideis im kritischen Rohr	83
6.6	Mittlere Pelletgeschwindigkeiten	84
6.7	Transferrate der D_2 -Pellets im Testrohr und im kritischen Rohr	86
6.8	Transferrate der H_2 - und H_2D_2 -Pellets	87
6.9	Mittlere Transferrate in der Blower Gun	88
6.10	Transfereffizienz der D_2 -Pellets im Testrohr und im kritischen Rohr	89
6.11	Transfereffizienz der H_2 - und H_2D_2 -Pellets	90
6.12	Mittlere Transfereffizienz	91
6.13	Verteilung der Austrittswinkel und Streuungen	92
6.14	Mittlere Streuwinkel	94
8.1	Bauraum im Pelletlabor	100
C.1	Schaltung für den ersten Doppelpuls[38]	106

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

C.2	Schaltung für den ersten Nachpuls[38]	107
C.3	Schaltung für den zweiten Doppelpuls[38]	108
C.4	Schaltung für den zweiten Nachpuls[38]	109
C.5	Verkabelung der Module	110
D.1	prozentualer Fehler der Bayesian analysis	113

Tabellenverzeichnis

2.1	Maximale Treibgasdrücke $p_{0,max}$ für verschiedene Gase und Pellets	18
2.2	Treibgasmasse pro Pelletschuss für verschiedene Treibgasarten und Treibgasdrücke in $\frac{bar \cdot l}{Pellet}$	19

Nomenklatur

Griechische Buchstaben

α	Winkel	[$^{\circ}$]
α	Absorptionsgrad	[—]
α	konvektiver Wärme- übergangskoeffizient	[$\frac{W}{m^2K}$]
γ	Adiabatexponent	[—]
ϵ	Effizienz	[%]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[$\frac{W}{mK}$]
ν	kinematische Viskosi- tät	[$\frac{m^2}{s}$]
ρ	Dichte	[$\frac{kg}{m^3}$]
σ	Strahlungskonstante	[$\frac{W}{m^2K^4}$]
σ	mechanische Spannung	[$\frac{N}{m^2}$]
σ	Unsicherheit	[m/m^2]
τ	Zeitintervall	[s]
Φ	Winkel	[$^{\circ}$]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[$\frac{1}{s}$]

Lateinische Buchstaben

a	Länge	[m]
a	Beschleunigung	[$\frac{m}{s}$]
A	Fläche	[m^2]
b	Länge	[m]
b	Konstante	[$\frac{1}{m}$]

c_p	Wärmekapazität	$[\frac{J}{kgK}]$
C	Widerstandsbeiwert	$[-]$
d	Durchmesser	$[m]$
D	Durchmesser	$[m]$
f	Frequenz	$[Hz]$
F	Kraft	$[N]$
h	Höhe	$[m]$
h	spezifische Enthalpie	$[\frac{J}{kg}]$
H	Enthalpie	$[J]$
l	Länge	$[m]$
L	Länge	$[m]$
m	Masse	$[kg]$
m	ganzzahlige Variable	$[-]$
M	molare Masse	$[\frac{kg}{mol}]$
n	ganzzahlige Variable	$[-]$
p	Konstante	$[\frac{1}{s}]$
p	Druck	$[\frac{N}{m^2}]$
P	Wahrscheinlichkeit	$[-]$
q	Konstante	$[\frac{m}{s}]$
Q	Gasabgabe	$[\frac{mbar * l}{s * cm^2}]$
Q	Wärme	$[J]$
r	Radius	$[m]$
R	Gaskonstante	$[\frac{J}{molK}]$
R	Radius	$[m]$
s	Dicke	$[m]$
S	Saugvermögen	$[\frac{l}{s}]$
t	Zeit	$[s]$
T	Temperatur	$[K]$
u	Geschwindigkeit	$[\frac{m}{s}]$
V	Volumen	$[m^3]$

Indizes

0	Startwert
<i>a</i>	außen
<i>D</i>	Reibung
<i>eff</i>	effektiver Wert
<i>Eis</i>	gefrorener Zustand
<i>g</i>	gasförmig
<i>gebogen</i>	gebogener Abschnitt
<i>gerade</i>	gerader Abschnitt
<i>kryo</i>	Kryostat
<i>offen</i>	offener Zustand
<i>p</i>	Pellet
<i>rec</i>	rekonstruiert
<i>s</i>	Schmelzwert
<i>str</i>	Strahlung
<i>sub</i>	Sublimation
<i>U</i>	Überleben
<i>v</i>	Verdampfung
<i>ventil</i>	dem Ventil zugehörig
<i>wand</i>	Zustand an der Wand

Kopfzeiger

\dot{m}	Flussgröße
'	vorgegebener Wert
*	Zielgröße

Dimensionslose Kennzahlen

<i>Ma</i>	Machzahl
<i>Nu</i>	Nusseltzahl
<i>Pr</i>	Prandtlzahl
<i>Re</i>	Reynoldszahl

Kapitel 1

Einleitung

Die Kernfusion wird möglicherweise in Zukunft eine wichtige Rolle im globalen Energiemix einnehmen. Um dieses Ziel in absehbarer Zeit zu erreichen, werden weltweit verschiedene Fusionsexperimente betrieben, wie das ASDEX Upgrade in Garching oder der Joint European Torus (JET) in Culham. Andere Versuchsreaktoren befinden sich gerade im Bau, wie ITER in Cadarache oder der Stellarator Wendelstein W7-X. Zum Betrieb eines solchen Experiments ist ein System zur Brennstoffzufuhr unerlässlich. Für diese Aufgabe wurden verschiedene Systeme entwickelt. Eines dieser Systeme ist die Blower Gun, welche Gegenstand dieser Arbeit ist. Im Folgenden wird die Motivation für Fusionsenergie dargelegt und die Notwendigkeit eines Injektors, speziell der Blower Gun, erläutert. Ferner wird eine kurze Übersicht über die Geschichte der Blower Gun und damit verbundenen wissenschaftlichen Arbeiten gegeben.

1.1 Motivation für die Erforschung der Kernfusion

Die Sicherstellung der Energieversorgung für die gesamte Welt ist eine der größten Herausforderungen für die Zukunft. Dies gilt in besonderem Maße, da ein rapides Anwachsen der Weltbevölkerung erwartet wird. Prognosen sagen

voraus, dass bis 2025 über 8 Milliarden Menschen auf der Erde leben werden. Bis 2050 werden es voraussichtlich über 9,5 Milliarden sein [1]. Ferner ist zu erwarten, dass die ohnehin schon wachsende Weltbevölkerung in Zukunft deutlich mehr Energie pro Kopf konsumieren wird als heute. Der Grund für diese Annahme liegt in der ökonomischen Entwicklung einiger Regionen. So ist zum Beispiel China binnen der letzten 30 Jahre vom Schwellenland zu einer Industrienation herangewachsen. Damit einhergehend war ein Anstieg des Energieverbrauchs pro Kopf um den Faktor 4 [2]. Ein ähnlicher Verlauf ist gerade in Indien zu beobachten. Weitere bevölkerungsreiche Schwellenländer, wie Brasilien, werden bald folgen. Ein immenser Anstieg des Bedarfs an elektrischer Energie weltweit ist folglich in naher Zukunft zu erwarten, wie Abbildung 1.1 zu entnehmen ist.

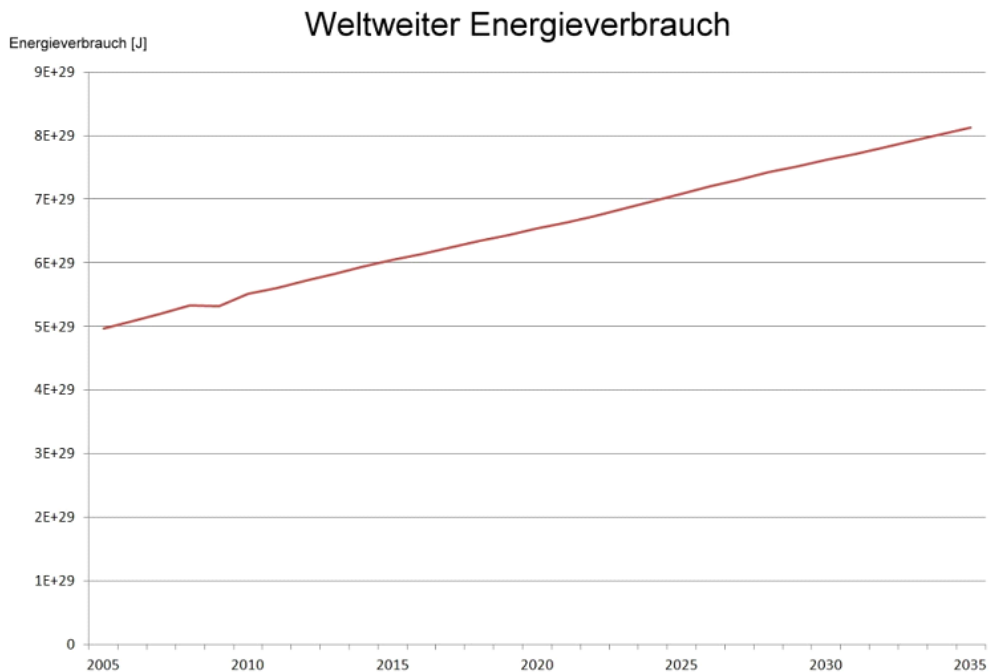


Abbildung 1.1: Globaler Energieverbrauch von 2005 bis 2035 [3]

Nun ist es wichtig, diesen Bedarf nicht nur zu decken, sondern auch nachhaltig mit den primären Energieresourcen umzugehen. Zur Zeit wird der Großteil

der elektrischen Energie aus fossilen Energieträgern gewonnen. Dies bringt Nachteile, wie die CO_2 Emission und die damit verbundene Erderwärmung, mit sich. Ferner ist es unmöglich, die steigende Nachfrage nach Energie durch fossile Brennstoffe langfristig zu befriedigen. Schon heute geht die Fördermenge an Erdöl zurück. Nach einer Studie von Shafiee, die den Verbrauch an fossilen Energieträgern in 2006 zugrunde legt, werden die Vorkommen an Erdöl in 40 Jahren, an Erdgas in 70 Jahren und an Kohle in 200 Jahren erschöpft sein[4].

Ein weiterer Ansatz das globale Energieproblem zu lösen ist die Nutzung erneuerbarer Energien, wie Wind- und Wasserkraft oder Solarenergie. Diese haben den Vorteil unbegrenzt verfügbar zu sein. Jedoch ist die Energiedichte im Vergleich zu fossilen Brennstoffen oder der Kernkraft deutlich geringer. Daher ist der Platzbedarf solcher Anlagen viel größer als bei herkömmlichen Kraftwerken. Damit verbunden ist ein hoher Einsatz an Material und Finanzmitteln. Außerdem ist eine effektive Nutzung regional begrenzt. Daher ist ein kostenintensiver Ausbau des internationalen Stromnetzes erforderlich. Dies wirft erhebliche politische Probleme auf, da der Netzausbau und die Subvention regenerativer Energien über den Strompreis finanziert werden sollen. Ferner sind stabile politische Verhältnisse zwischen energieliefernden und konsumierenden Nationen unerlässlich. Zudem ist die Bereitstellung elektrischer Energie zeitlich nicht konstant. Dies stellt hohe Anforderungen an die Netzregulierung, welche nur durch konventionelle Kraftwerke erfüllt werden können. Außerdem können erneuerbare Energien, aufgrund der zeitlichen schwankenden Energiebereitstellung, die Grundlast nicht tragen. Somit fallen die erneuerbaren Energien als alleinige Lösung des Energieproblems weg, obgleich sie eine wichtige Rolle im zukünftigen Energiemix einnehmen werden.

Als beste Option für die zukünftige Sicherung des Energiebedarfs verbleibt die Kernkraft. Hohe Energiedichten und geringer Platzbedarf, sowie die Ver-

ffügbarkeit von Brennstoff in der Zukunft machen diese Technologien besonders attraktiv. Konventionelle Kernspaltungsreaktoren werfen jedoch Probleme auf, die bisher ungelöst bleiben. Der radioaktive Abfall stellt aufgrund seiner langen Halbwertszeit eine dauerhafte Bedrohung dar und eine sichere Möglichkeit zur Langzeitlagerung besteht bisher nicht. Ferner belegen die Unfälle in Three Mile Island, Chernobyl und zuletzt in Fukushima, dass die Kernspaltung immer noch gefährlich ist. Darunter leidet die Akzeptanz der Kernenergie in der Bevölkerung, was eine weitere Nutzung problematisch macht. Nach einer Befragung des Allsnbach Instituts im Jahr 2011 sprachen sich 42% der Westdeutschen klar gegen die Nutzung der Atomkraft aus, wohingegen nur 6% die Nutzung unterstützten[42]. Nicht zuletzt besteht das Problem, dass Spaltungsreaktoren zur Herstellung von waffenfähigem Material genutzt werden können.

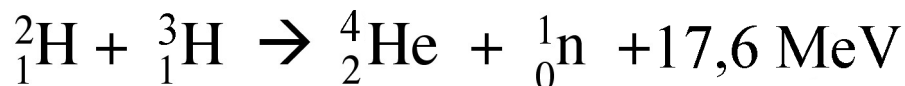
Die Kernfusion bietet im Vergleich mit den anderen Kraftwerkstypen diverse Vorteile. Als erstes ist zu erwähnen, dass die Brennstoffe in großen Mengen verfügbar sind. Die benötigten Ressourcen, Deuterium und Lithium, sind auf der Erde reichhaltig vorhanden. Ferner produziert ein Fusionskraftwerk keine Treibhausgase oder radioaktives Abgas. Damit kann man diese Technologie durchaus als umweltverträglich klassifizieren. Zudem ist die Betriebssicherheit deutlich höher als bei Spaltungsreaktoren. Die Energie, die während des Betriebs im Reaktor freigesetzt wird, reicht für eine Explosion nicht aus. Zudem kann sich keine unkontrollierte Kettenreaktion ausbilden. Die Energiedichte ist dennoch deutlich höher als bei erneuerbaren Energien, was kompakte und regional unabhängige Kraftwerke ermöglicht.

Es ist jedoch zu erwähnen, dass auch die Kernfusion nicht frei von radioaktivem Abfall ist. Die Reaktorkomponenten sind kontaminiert oder aktiviert und müssen gelagert werden. Allerdings ist die Halbwertszeit dieser Stoffe um viele Größenordnungen geringer als bei Spaltungsreaktoren. Brennstäbe müssen für viele Tausend Jahre sicher gelagert werden, die Abfälle aus der Kernfusion nur für etwa 500 Jahre.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Kernfusion die vielversprechendste Option für die zukünftige Energieversorgung darstellt, hinsichtlich Sicherheit, Nachhaltigkeit und Leistungsfähigkeit. Daher ist die Erforschung der Kernfusion von herausragender Bedeutung.

1.2 Pellet-Injektion

Um eine Fusionsreaktion in einem Reaktor aufrecht zu erhalten, muss kontinuierlich Brennstoff nachgefüllt werden. Als Brennstoff wird eine Mischung aus Deuterium und Tritium verwendet, da die Fusion dieser Isotope für thermonukleare Fusionsreaktoren am geeignetsten ist. Beide Komponenten müssen eine ausreichende Konzentration und das optimale Mischungsverhältnis aufweisen um eine Fusion zu ermöglichen. Zudem ist es erforderlich, den Brennstoff auf über 100 Millionen Kelvin aufzuheizen und diesen Zustand über eine ausreichende Zeit aufrecht zu erhalten. Ist dies gewährleistet, so verschmelzen je ein Deuterium-Atom und ein Tritium-Atom unter Abgabe einer festen Energiemenge.



Beide Stoffe sind bei Normbedingungen gasförmig, was es schwierig macht, sie bis ins Zentrum des heißen Plasmas zu befördern. Versuche, die am NSTX¹ durchgeführt wurden, zeigen auf, dass Gas nur sehr geringe Eindringtiefen ins Plasma aufweist, selbst wenn es auf mehrfache Schallgeschwindigkeit beschleunigt wurde [5]. Dies gilt in besonderem Maße für den Fall der H-Mode² Plasmas. Da der meiste Brennstoff jedoch in der Zone benötigt wird, indem

¹NSTX ist das National Spherical Torus Experiment, welches vom Princeton Plasma Physics Laboratory in Zusammenarbeit mit dem Oak Ridge National Laboratory, der Columbia University und der University of Washington konstruiert wurde und 1999 in Betrieb ging

²H-Mode (High confinement Mode) ist ein Plasmazustand, der einen verbesserten Energieeinschluss bei hoher Heizleistung bewirkt

die höchste Fusionsrate vorliegt, also im Zentrum des Plasmas, und das überschüssige Gas die Vakuumpumpen stark belastet, scheidet die Gasinjektion als Option für die Brennstoffnachfuhr aus.

Für den Zweck, Deuterium oder Tritium tief ins Plasma einzubringen wurden verschiedene Pellet-Injektionssysteme entwickelt. Dabei wird das Gas bis unter den Schmelzpunkt abgekühlt, sodass es als Feststoff vorliegt. Dieses Eis wird dann in kleine Stücke zerteilt, die Pellets, welche mit hoher Geschwindigkeit ins Plasma geschossen werden. Es gibt mehrere verschiedene Methoden, die Pellets zu beschleunigen. Die zwei prominentesten sind per Zentrifuge oder mittels einer Treibgaskanone.

Im Falle der Zentrifuge wird das Pellet auf einen rotierenden Schleuderarm befördert. Durch die Zentrifugalkraft wird das Pellet dann auf die Zielgeschwindigkeit beschleunigt. Diese Methode hat den Vorteil, hohe Repetitionsraten und Pelletgeschwindigkeiten erreichen zu können. Jedoch sind die Pelletfrequenz f_p und die Geschwindigkeit u_p an die Winkelgeschwindigkeit ω des Schleuderarms gebunden. So können nur ganzzahlige Bruchteile n der Rotationsfrequenz erreicht werden [6].

$$f_p = \frac{\omega}{2\pi * n} \quad n \in \mathbb{Z} \quad (1.1)$$

$$u_p(t) = \omega * r_0 * \sinh(\omega * t) \quad (1.2)$$

Hierbei wird vorausgesetzt, dass die Beschleunigung verlustfrei abläuft und das Pellet bei dem Radius r_0 auf den Schleuderarm gesetzt wird. Der Koppung zwischen Pelletfrequenz und Pelletgeschwindigkeit ist bei der Zentrifuge immanent.

Die Treibgaskanonen können nochmals in zwei Typen unterteilt werden, die Gaskanonen und die Blower Guns. Bei ersterer wird das Deuterium direkt im Lauf der Kanone gefroren, dann mittels einer Heizung vom Lauf gelöst und

durch ein Treibgas beschleunigt. Weil zwischen Pellet und Lauf kein Spalt besteht, kann kein Treibgas am Pellet vorbeiströmen. Daher wirkt der gesamte Impuls der adiabten Expansion auf das Pellet und somit können hohe Geschwindigkeiten erreicht werden. Jedoch ist die Repetitionsrate sehr gering. Abhilfe dafür schaffen nur mehrläufige Gaskanonen. Diese sind jedoch groß und kostenintensiv.

Für die Blower Gun wird ein einzelnes Pellet von einem Eisstrang abgeschnitten und in den Lauf geladen. Danach wird es durch Treibgas beschleunigt. Es ist hier zu erwähnen, dass der Durchmesser des Pellets deutlich kleiner ist als der des Laufs. Folglich kann das Treibgas am Pellet vorbeiströmen, was die maximale Beschleunigung beschränkt. Daher braucht das Pellet erheblich länger um die Gasgeschwindigkeit zu erreichen als im Fall der Gaskanone. Folglich sind die Pelletgeschwindigkeiten in Blower Guns praktisch geringer. Allerdings erlaubt der Lademechanismus hohe Repetitionsraten.

1.3 Geschichte der Garching Blower Gun

Der erste Prototyp der Blower Gun wurde 1995 entwickelt und diente zu dieser Zeit als Teststand für das Kryosystem der Zentrifuge. Dies hatte den Zweck, die Kryostaten hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit für die Produktion größerer Pellets zu überprüfen. Nach dem erfolgreichen Abschluss der Experimente wurde die Blower Gun mit dem Abschussmechanismus versehen und konnte fortan als Injektor genutzt werden.

1997 wurden die Blower Gun für den Test der Führungsrohre am ASDEX Upgrade herangezogen[7]. Dieses Experiment hatte den Zweck die gekrümmten Führungsrohre zur Hochfeldseite und zur Niederfeldseite³ auf ihre Nutzbarkeit für den Einschuss von Pellets zu untersuchen. Die Blower Gun eignete

³Das ringförmige Magnetfeld eines Tokamaks verhält sich umgekehrt proportional zum Radius. Daher wird die Innenseite als Hochfeldseite bezeichnet und die Außenseite als Niederfeldseite

sich für dieses erste Experiment besser als die Zentrifuge, da die geringere Pelletgeschwindigkeit eine höhere Überlebensrate der Pellets ermöglichte. Danach wurde die Blower Gun weiterhin als Injektor für ASDEX Upgrade genutzt um Experimente zur Plasmadichte durchzuführen[8] oder zur Untersuchung der Eigenschaften der Pellets[9].

2005 wurde die Blower Gun von ASDEX Upgrade entfernt um sie zugunsten höherer Repetitionsraten umzurüsten. Nach der Modifikation wurde die Blower Gun für den Testbetrieb im Pelletlabor Garching aufgebaut und charakterisiert [10]. Das Ziel, eine Repetitionsrate von 100Hz zu erreichen wurde deutlich übertroffen. Raten von bis zu 143Hz konnten realisiert werden. Nach diesem Umbau wurde die Blower Gun für ein Jahr am Fusionsexperiment als Injektor genutzt. Danach war eine weitere Umrüstung nötig um das ELM⁴ pacing Experiment durchführen zu können. Hierbei werden ELMs geringer Intensität durch kleine Pellets ausgelöst. Dies ist nötig um zu verhindern, dass es zu einem einzigen massiven ELM kommt, der das Gefäß beschädigen könnte. Zudem sorgen diese kleinen ELMs für den Auswurf von Verunreinigungen aus dem Plasma. Zu diesem Zweck wurde der Injektor wieder zum Pelletlabor gebracht und der Pelletdurchmesser von 2mm auf unter 1mm reduziert. Bei der anschließenden Charakterisierung[11] musste jedoch festgestellt werden, dass die ansonst hohe Überlebensrate der Pellets von etwa 90% nun bei ungefähr 25% lag. Damit war der Einsatz der Blower Gun für das ELM pacing Experiment nicht sinnvoll.

Der Einsatz der Blower Gun wurde bis 2009 fortgesetzt. Danach wurde sie stillgelegt und 2012 wieder ins Pelletlabor transferiert. Dort erfolgte der Umbau zurück auf die Konfiguration für 2mm Pellets und die Widerinstandsetzung. Im Juni 2013 wurde beschlossen, die Blower Gun als Injektor für die Operationsphase 1 des Experiments W7-X zu nutzen. Die Charakterisierung hinsichtlich des Einsatzes am Wendelstein Stellerators ist Gegenstand dieser Arbeit.

⁴Edge localized modes (ELMs) sind Instabilitäten am Rand des Plasmas. Diese führen zu kurzen Bursts aus Energie und Teilchen aus dem Plasma.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

Für das Verständnis der Blower Gun, sowie der Experimente und der Auswertungen sind einige Grundlagen aus der Thermodynamik und der Fluidodynamik notwendig. Die Theorie bietet eine Vergleichsmöglichkeit für die experimentellen Ergebnisse. Dies gestattet, zum Beispiel, vorher gemachte Annahmen zu validieren oder zu widerlegen. Im Folgenden werden die wichtigsten Grundlagen kurz vorgestellt.

2.1 Wahl der Pellet-Parameter

Die Leistungsfähigkeit der Blower Gun und der Transferstrecke wird anhand der Pellets gemessen. Daher ist die Kenntnis über deren Eigenschaften von großer Bedeutung. Hier erfolgt die Auswahl der Abmessungen der Pellets, so dass die Pellets für den Einsatz bei W7-X geeignet sind. Dieser bestimmt, wie die Blower Gun modifiziert werden muss. Aus vorangegangenen Experimenten konnte abgeleitet werden, dass die Pellets stabil sind, wenn das Verhältnis aus Pelletdurchmesser zu Pelletlänge in einem bestimmten Bereich liegt. In der Arbeit von Jehl[11] wurde festgestellt, dass $0,5 \leq \frac{d}{L} \leq 2$ sein muss. Um eine erhöhte Sicherheit zu gewährleisten wurden diese Grenzen nochmals angepasst zu $0,67 \leq \frac{d}{L} \leq 1,5$. Zudem darf die Anzahl an Deuteriumatomen oder Wasserstoffatomen nicht zu groß sein, da das Plasma

zusammenbrechen könnte. Die Teilchenzahl darf auch nicht zu gering gewählt werden, da sonst keine effiziente Brennstoffzufuhr hergestellt werden kann. Aus diesen Bedingungen wurde eine Auswahl an möglichen Kombinationen aus Pelletdurchmesser und Pelletlänge erstellt.

Verhältnis d/L		Länge L (mm)			
		1	1,5	2	2,5
Durchmesser d (mm)	1,8	1,8	1,2	0,9	0,72
	2	2	1,3333333	1	0,8
	2,3	2,3	1,5333333	1,15	0,92

Volumen (mm ³)		Länge L (mm)			
		1	1,5	2	2,5
Durchmesser d (mm)	1,8	2,545	3,817	5,089	6,362
	2	3,142	4,712	6,283	7,854
	2,3	4,155	6,232	8,31	10,387

Deuteriumatome (#/Pellet)		Länge (mm)			
		1	1,5	2	2,5
Durchmesser d (mm)	1,8	1,53*10 ²⁰	2,29*10 ²⁰	3,05*10 ²⁰	3,82*10 ²⁰
	2	1,88*10 ²⁰	2,83*10 ²⁰	3,77*10 ²⁰	4,71*10 ²⁰
	2,3	2,49*10 ²⁰	3,74*10 ²⁰	4,99*10 ²⁰	6,23*10 ²⁰

Abbildung 2.1: Auswahl an möglichen Pelletparametern[35]

Auf Basis dieser Zusammenstellung wurde entschieden, dass Pellets mit den Abmessungen $d = L = 2\text{mm}$ am geeignetsten sind. Sie weisen eine ausreichende Stabilität und Teilchenzahl für den Einsatz als Brennstoff auf. Daher wurde die Blower Gun auf die Produktion von 2mm Pellets umgerüstet. Alle weiteren theoretischen Betrachtungen werden ebenfalls für 2mm Pellets durchgeführt.

2.2 Abschmelzen eines D_2/H_2 Eisstranges im Vakuum

Da die Blower Gun mit gefrorenem Deuterium und Wasserstoff arbeitet, ist eine nähere Betrachtung des Verhaltens des Eises notwendig. Dabei ist die Standzeit des Eisstranges im Vakuum von großer Bedeutung. Als Standzeit

wird hier die Dauer bezeichnet, bis das Eis vollständig sublimiert ist. Nur eine ausreichend lange Zeit gewährleistet brauchbare Pellets. Für die analytische Betrachtung wird das Problem vereinfacht. Der Eisstrang stehe frei im Vakuum, welches als ideales Vakuum⁵ betrachtet wird. Dadurch ist konvektiver Wärmetransport ausgeschlossen. Ferner sei der Eisstrang gerade und zylindrisch mit dem Radius r und der Länge L . Das Eis wird als homogen und rein betrachtet. Zusätzlich sei der Wärmeeintrag über die vordere Stirnfläche zu vernachlässigen, während über die hintere Stirnfläche ein konstanter Wärmestrom zum Kryostat fließt. Der Eisstrang und der Kryostat seien von einem Zylinder umschlossen, welcher als Strahlungsquelle dient. Mit diesen Annahmen sieht das Modell aus, wie in Abbildung 2.2 dargestellt.

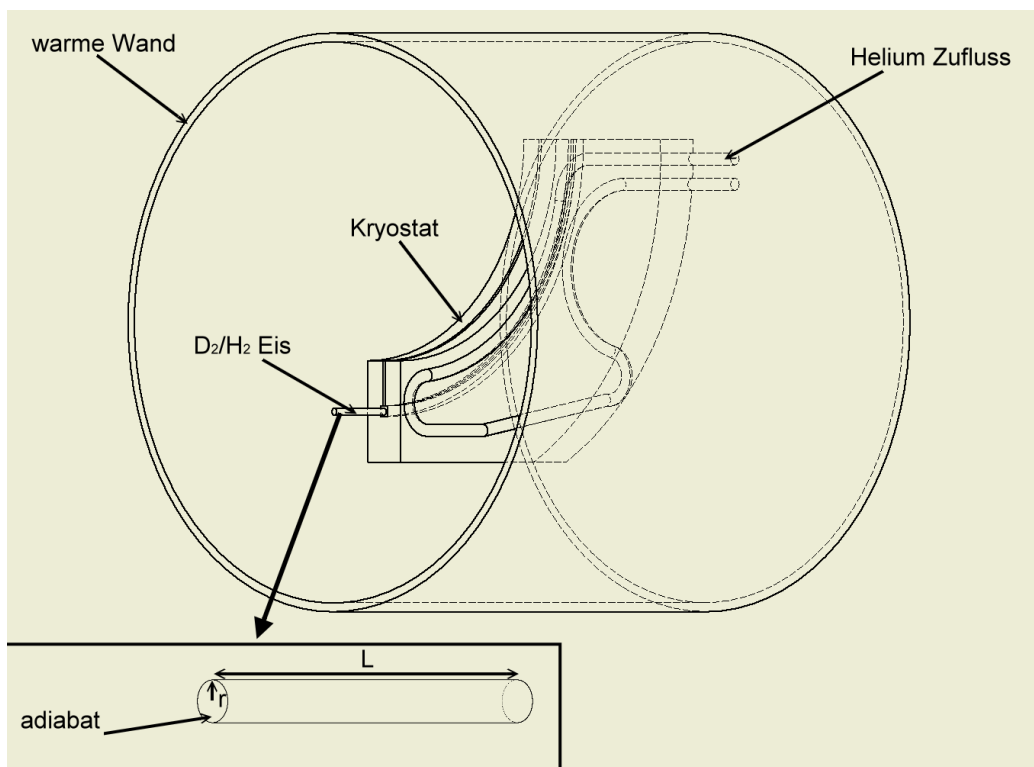


Abbildung 2.2: Vereinfachtes Modell des Eisstranges im Vakuum

⁵Als ideales Vakuum wird das Vakuum bezeichnet, in dem sich keine Moleküle mehr befinden

Da konvektiver Wärmetransport ausgeschlossen ist, reduziert sich der Wärmeeintrag auf Wärmeleitung über die Stirnfläche und den Strahlungsaustausch mit der umschließenden Wand. Die instationäre Energiebilanz ergibt sich damit zu (2.1).

$$\dot{H}_s = \dot{Q}_{Kryo} - \dot{Q}_{str} \quad (2.1)$$

Dabei bezeichnet \dot{H}_s den Sublimationsenthalpiestrom des Eises, \dot{Q}_{str} ist der Wärmestrom, der durch Strahlung eingetragen wird und \dot{Q}_{Kryo} ist der Wärmestrom, der an den Kryostaten übertragen wird. Die Sublimationsleistung setzt sich aus der spezifischen Sublimationsenthalpie und dem Massenstrom, der abgedampft wird, zusammen.

$$\dot{H}_s = \dot{m} * h_{s,Eis} = \rho_{Eis} * 2\pi * r * L * \frac{\partial r}{\partial t} \quad (2.2)$$

Dabei wird angenommen, dass das Eis nur in radialer Richtung abdampft und die Länge L des Eisstranges konstant bleibt. Für den Wärmeeintrag durch Strahlung, \dot{Q}_{str} wird berücksichtigt, dass die Oberfläche der umschließenden Wand sehr viel größer ist, als die Oberfläche des Eisstranges. Damit folgt für den Wärmeeintrag durch Strahlungsaustausch der Zusammenhang (2.3).

$$\dot{Q}_{str} = \alpha * 2\pi * r * L * \sigma_s * (T_{Wand}^4 - T_{sub}^4) \quad (2.3)$$

Der Wärmestrom vom Eisstrang zum Kryostaten hängt vom Massenstrom des Kühlmittels, also des flüssigen Heliums, ab. Dabei wird angenommen, dass die komplette Verdampfungsleistung des Heliums zur Kühlung des Eises aufgewendet wird und das Kühlmittel immer vollständig verdampft. Dies wird erreicht, indem der Massenstrom des flüssigen Heliums so gewählt wird, dass er zum Zeitpunkt t=0 genau ausreicht um den Wärmeeintrag durch Strahlung auszugleichen.

$$\dot{m}_{He} = \frac{\dot{Q}_{str,r=r0}}{h_{v,He}} \quad (2.4)$$

Für den Wärmestrom zum Kryostaten wird ein Ansatz nach dem Fourier'schen Wärmeleitungsgesetz gemacht.

$$\dot{Q}_{Kryo} = \frac{\lambda_{Eis}}{s} * \pi * r^2 * (T_{sub} - T_{Kryo}) \quad (2.5)$$

Die Länge s des Temperaturgradienten im Eisstrang hängt vom Wärmestrom ab, der durch das verdampfende Helium abgeführt wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass durch die begrenzte Wärmeübertragung in der Heliumleitung und im Kryostaten nur etwa 90% des ursprünglichen Wärmestroms abgeführt werden kann. Somit gilt für die Länge s folgender Zusammenhang.

$$s = \frac{\lambda * \pi * r_0^2}{0,9 * \dot{m}_{He} * h_{v,He}} * (T_{sub} - T_{Kryo}) \quad (2.6)$$

Setzt man die Gleichungen (2.2), (2.3), (2.5) und (2.6) in die Bilanzgleichung (2.1) ein und formt diese um, so erhält man die Differentialgleichung für die Änderung des Radius des Eisstranges.

$$\frac{\partial r}{\partial t} = \underbrace{\frac{0,9 * \dot{m}_{He} * h_{v,He}}{2 * \pi * r_0^2 * L * \rho_{Eis} * h_{s,Eis}}}_{p} * r - \underbrace{\frac{\alpha * \sigma_s}{\rho_{Eis} * h_s} * (T_{Wand}^4 - T_{sub}^4)}_{q} \quad (2.7)$$

Die gleichbleibenden Terme werden in den Konstanten p und q zusammengefasst. Die Lösung der Differentialgleichung, mit der Anfangsbedingung r_0 , ist

$$r(t) = \left(r_0 - \frac{q}{p}\right) * e^{pt} + \frac{q}{p} \quad (2.8)$$

Abbildung 2.3 zeigt Plots für die Änderung des Radius von Eissträngen aus Wasserstoff und Deuterium. Die Länge beträgt jeweils $L = 0.02m$ und der Anfangsradius $r_0 = 0.001m$. Die Wandtemperatur soll $T_{Wand} = 293K$ betragen und für die Temperatur des Kryostaten wird $T_{Kryo} = 4K$ gewählt. Die Stoffdaten für Wasserstoff und Deuterium sind in Anhang A aufgeführt. In Kapitel 6.1 wird ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der theoretischen Überlegung und den experimentellen Ergebnissen gezogen.

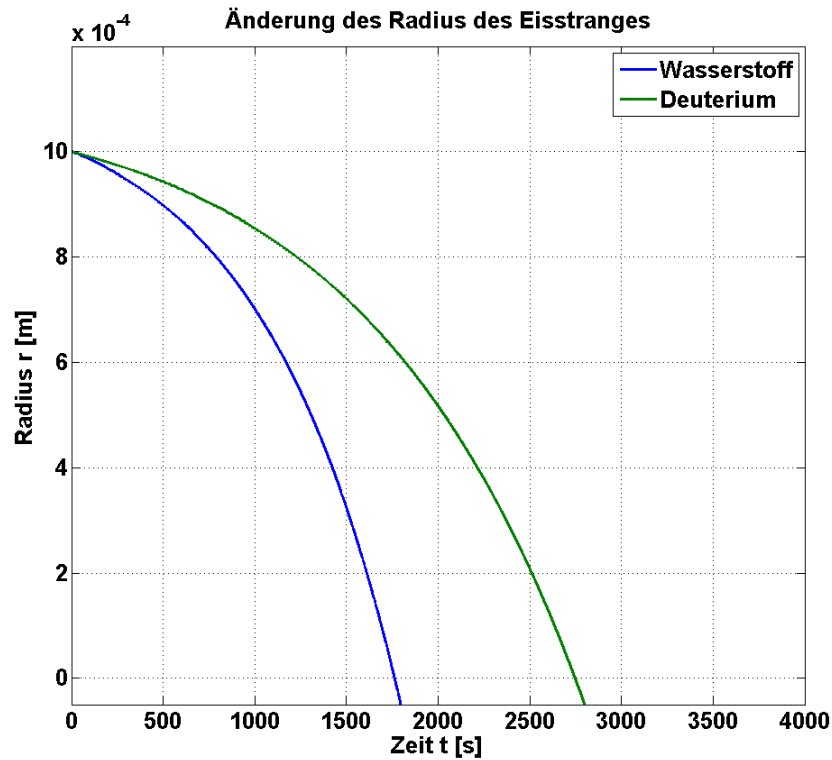


Abbildung 2.3: Änderung des Radius über die Zeit für H_2/D_2 Eisstränge

2.3 Gas drag

Das Funktionsprinzip der Blower Gun basiert darauf, dass das Pellet durch einen Gasstrom mitgezogen und beschleunigt wird. Dabei strömt das Gas an dem Pellet vorbei und die Reibung, im englischen drag genannt, zwischen Pellet und Gas erzeugt eine Kraft F_R . Zusätzlich wirkt noch die Widerstandskraft F_W des Pellets gegen den Gasstrom. Abbildung 2.4 zeigt das Prinzip des Beschleunigungsmechanismus. Das Treibgas befindet sich in einem Gefäß, welches durch ein schnelles Ventil gegen das Schussrohr verschlossen ist. Der Druck p_0 im Gefäß kann verstellt werden, wobei die Temperatur T_0 bei Raumtemperatur gehalten wird. Wenn das Ventil geöffnet wird, strömt das Gas in das Schussrohr, in dem der Druck p_g herrscht. Der Ausströmvorgang wird als adiabatisch betrachtet. Im Bereich der homogenen Strömung im

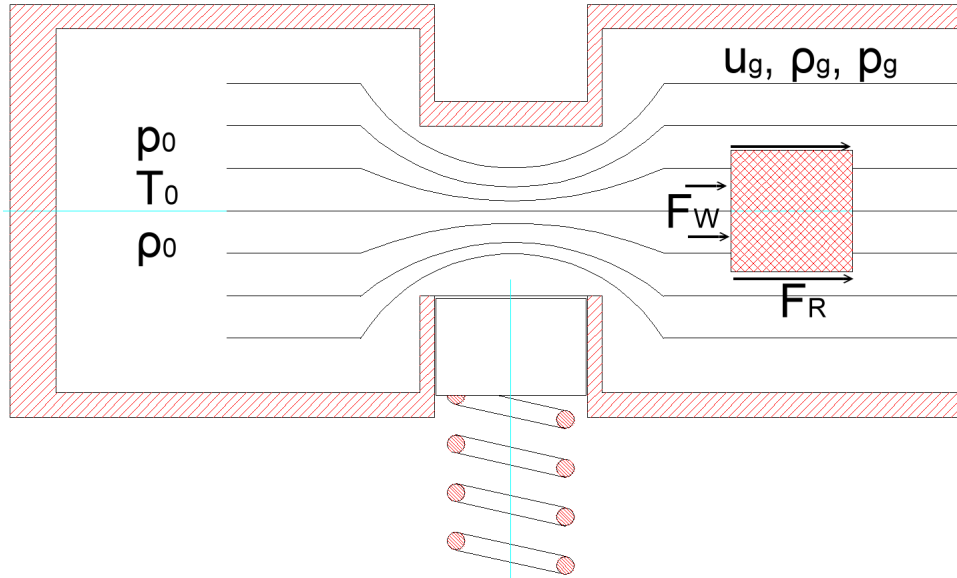


Abbildung 2.4: Prinzip des Beschleunigungsmechanismus

Schussrohr hat das Gas die Geschwindigkeit u_g und die Dichte ρ_g . Die Vortriebskraft F_D ist die Summe der Widerstandskraft und der Reibungskraft. Beide werden im Widerstandskoeffizienten C_D zusammengefasst. Damit gilt für die Vortriebskraft der Zusammenhang (2.9).

$$F_D = C_D * \frac{\rho_g}{2} * A_P * (u_g - u_P)^2 \quad (2.9)$$

Hierbei ist A_P die Grundfläche des Pellets und u_P die Geschwindigkeit des Pellets. Der Widerstandskoeffizient hängt von der Reynolds-Zahl und der Geometrie des Pellets ab. Für einen kurzen Zylinder und für die vorherrschenden Strömungsverhältnisse mit $Re \approx 10^4$ liegt der Koeffizient im Mittel bei $C_D = 0,6$ [18]. Für die Beschleunigung des Pellets gilt entsprechend (2.9):

$$a_P(t) = \frac{\partial u_P}{\partial t} = \frac{F_D}{m_P} = \frac{C_D * \rho_g}{\underbrace{2 * \rho_{Eis} * L}_b} * (u_g - u_P(t))^2 \quad (2.10)$$

Die konstanten Terme werden in dem Faktor b zusammen gefasst. L bezeichnet darin die Länge des Pellets. Um den zeitlichen Verlauf der Pellet-

geschwindigkeit zu erhalten, wird die Differentialgleichung (2.10) integriert. Dies liefert für die Geschwindigkeit

$$u_P(t) = \frac{b * u_g^2 * t}{b * u_g * t + 1} \quad (2.11)$$

Die Dichte des Treibgases im Schussrohr wird über die Isentropenbeziehung und das ideale Gasgesetz bestimmt. γ ist hier der Isentropenexponent des Treibgases. Damit gilt für die Dichte ρ_g :

$$\rho_g = \frac{p_0 * M}{R * T_0} * \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} * Ma^2\right)^{-\frac{1}{\gamma-1}} \quad (2.12)$$

Um die Gasgeschwindigkeit u_g bestimmen zu können, wird das Ventil im geöffneten Zustand als unangepasste Lavaldüse betrachtet. Damit kann das Treibgas nicht schneller als mit Schallgeschwindigkeit aus der Ventilöffnung austreten, unabhängig von der Druckdifferenz zwischen Treibgasbehälter und Schussrohr. Somit gilt für die maximale Treibgasgeschwindigkeit

$$u_g = \sqrt{\gamma * \frac{R}{M} * T_0} \quad (2.13)$$

Mit den Gleichungen (2.11) bis (2.13) lässt sich der Geschwindigkeitsverlauf des Pellets im Schussrohr bestimmen. Abbildung 2.5 zeigt Verläufe für verschiedene Treibgase. Der Treibgasdruck beträgt $p_0 = 1bar$. Das Pellet besteht jeweils aus festem Deuterium oder Wasserstoff und hat die Länge $L = 2mm$. Die verwendeten Stoffwerte können aus Anhang A entnommen werden. Die Temperatur des Treibgases sei konstant $T_0 = 293K$. Aus Abbildung (2.5) und Gleichung (2.11) geht hervor, dass die maximale Pelletgeschwindigkeit $\lim_{t \rightarrow \infty} u_P = u_g$ ist. Diese kann in der Blower Gun jedoch nicht erreicht werden, da die Beschleunigungsstrecke endlich ist. Im Injektor beträgt sie etwa $l = 0,4m$. Nach dieser Strecke wird das Treibgas aus dem Schussrohr entfernt und es kommt zu keiner weiteren Beschleunigung.

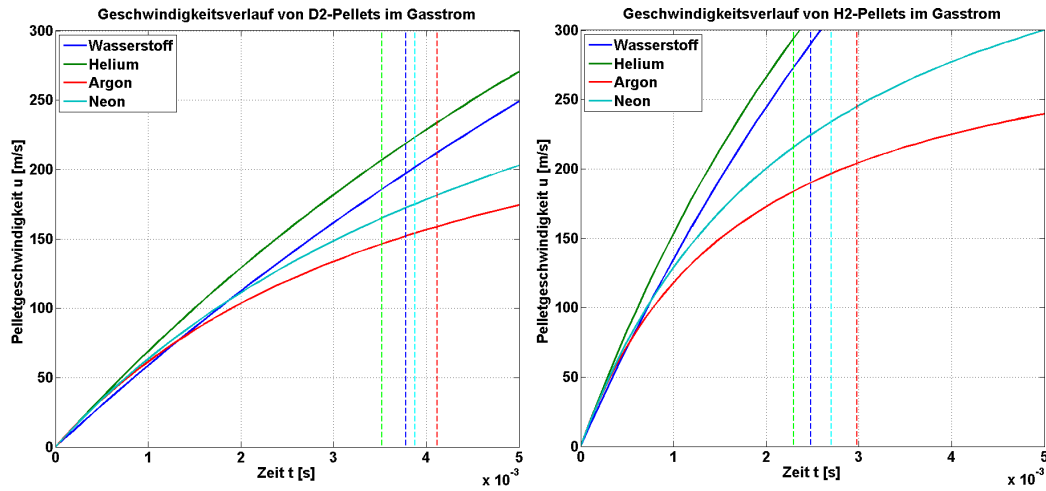


Abbildung 2.5: Geschwindigkeitsverläufe von D_2/H_2 -Pellets für verschiedene Treibgase

Um die Geschwindigkeit am Ende der Beschleunigungsstrecke zu bestimmen, wird die Zeit t^* ermittelt, zu der das Pellet die Strecke l verlässt. Dies geschieht durch Integration von (2.11).

$$l = \int_0^{t^*} u_P dt = \frac{b * u_g * t^* - \ln(b * u_g * t^* + 1)}{b} \quad (2.14)$$

In Abbildung 2.5 sind diese speziellen Zeiten für die verschiedenen Kombinationen aus Treibgas und Pelletmaterial als gestrichelte Linien dargestellt.

Es ist jedoch zu bemerken, dass die Gasgeschwindigkeit, und damit der Druck im Treibgasgefäß, nicht beliebig hoch gewählt werden darf, da die Belastung auf das Pellet zu groß wird und es zerbricht. Bedingung für das Überleben des Pellets ist, dass die maximale Vortriebskraft nicht größer ist, als die maximal zulässige Druckkraft auf das Pellet. Die Vortriebskraft erreicht, entsprechend Gleichung (2.9), ihren höchsten Wert zum Zeitpunkt $t = 0$. Somit gilt für die Festigkeitsbedingung

$$C_D * \frac{\rho_g}{2} * A_P * u_g^2 \leq \sigma_B * A_P \quad (2.15)$$

Die maximale Gasgeschwindigkeit kann direkt aus Gleichung (2.15) hergeleitet werden.

$$u_g \leq \sqrt{\frac{2 * \sigma_B}{C_D * \rho_g}} \quad (2.16)$$

Aus den Gleichungen (2.12), (2.13) und (2.16) können nun die maximalen Drücke $p_{0,max}$ für die verschiedenen Gase und Pellets bestimmt werden.

$$p_{0,max} \leq \frac{2 * \sigma_B}{\gamma} * \left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (2.17)$$

In Tabelle 2.1 sind einige Maximaldrücke aufgeführt. Diese wurden jeweils für die maximale Bruchspannung bestimmt. Die verwendeten Werte sind in Anhang A aufgeführt.

	Wasserstoff-Pellet	Deuterium-Pellet
Wasserstoff	7,761 bar	11,752 bar
Helium	6,452 bar	9,770 bar
Argon	6,280 bar	9,509 bar
Neon	6,408 bar	9,703 bar

Tabelle 2.1: Maximale Treibgasdrücke $p_{0,max}$ für verschiedene Gase und Pellets

Für den Betrieb der Blower Gun ist auch die Kenntnis über die benötigte Treibgasmenge von Bedeutung. Zum einen ist dies ein Kostenfaktor, zum anderen eine zusätzliche Anforderung an das Abgassystem. Daher soll hier eine Abschätzung der aufgewendeten Treibgasmenge pro verschossenem Pellet durchgeführt werden. Dabei wird wieder angenommen, dass es sich beim Treibgasventil um eine nicht angepasste Lavaldüse handelt. Somit gilt für die Treibgasmasse pro Pelletschuss

$$m_{gas} = \frac{\gamma * p_0}{\sqrt{\gamma * \frac{R}{M} * T_0}} * \left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{-\frac{\gamma+1}{2 * (\gamma-1)}} * A_{ventil} * t_{offen} \quad (2.18)$$

Die Querschnittsfläche der Ventilöffnung beträgt $A_{\text{ventil}} = 1,257 * 10^{-5} \text{m}^2$ und die Zeit, in der das Ventil geöffnet ist, beträgt $t_{\text{offen}} = 5 * 10^{-3} \text{s}$. Die benötigten Treibgasmassen sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

	1 bar	2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar	7 bar	8 bar	9 bar	10 bar
H_2	0,0495	0,0991	0,1474	0,1969	0,2465	0,2960	0,3444	0,3939	0,4434	0,4930
He	0,0371	0,0736	0,1108	0,1479	0,1844	0,2215	0,2586	0,2951	0,3323	0,3694
Ne	0,0164	0,0329	0,0494	0,0659	0,0823	0,0988	0,1153	0,1318	0,1482	0,1647
Ar	0,0118	0,0235	0,0353	0,0471	0,0589	0,0707	0,0824	0,0942	0,1060	0,1177

Tabelle 2.2: Treibgasmasse pro Pelletschuss für verschiedene Treibgasarten und Treibgasdrücke in $\frac{\text{bar} * \text{l}}{\text{Pellet}}$

2.4 Leidenfrost Effekt

Dieser Effekt wurde 1756 von Johann Gottlob Leidenfrost entdeckt. In der Abhandlung *De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus* beschreibt er das Phänomen, dass Wassertropfen auf einer Oberfläche mit sehr hoher Temperatur langsamer verdampfen als auf einer Oberfläche mit geringerer Temperatur, wobei die Oberfläche stets heißer ist, als die Siedetemperatur des Wassers. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass der Tropfen beim Kontakt mit der Oberfläche sofort einen Dampffilm ausbildet, der das Wasser von der heißen Oberfläche abschirmt. Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Dampfes lässt nur einen kleinen Wärmestrom zum Tropfen zu und verzögert somit das Abdampfen. Die Dampfschicht fällt bei höherer Oberflächentemperatur dicker aus, weshalb die Verdampfungszeit mit der Oberflächentemperatur steigt. Ab dem Leidenfrost Punkt ist die Temperaturdifferenz jedoch so hoch, dass die geringere Wärmeleitfähigkeit des Dampfes den erhöhten Wärmestrom nicht mehr kompensieren kann. Ab diesem Punkt erhöht sich die Abdampftrate wieder.

Der Leidenfrost Effekt spielt eine wichtige Rolle beim Transport des Pellets durch den Versuchsaufbau. Sobald die Beschleunigungsphase abgeschlos-

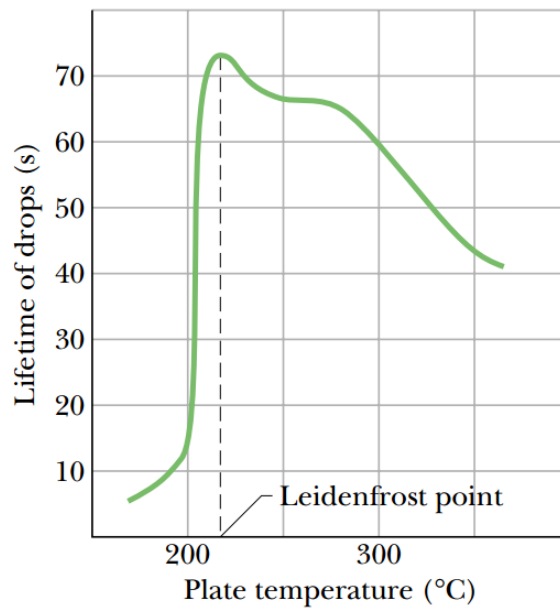


Abbildung 2.6: Standzeit eines Wassertropfens auf einer heißen Oberfläche[21]

sen ist, fliegt das Pellet nicht mehr im Treibgasstrom, sondern durch ein Hochvakuum. Somit existiert kein Gaspolster zwischen dem Pellet und dem Schussrohr. Trifft das kalte Pellet auf die warme Wand des Schussrohres, so besteht direkte Wärmeleitung und das Eis beginnt sofort zu sublimieren. Das gasförmige Pelletmaterial bildet nun ein Dampfpolster zwischen Pellet und Wand. Anstatt Wärmeleitung im Eis sind nun Konvektion und Wärmeleitung im Gas die dominanten Formen der Wärmeübertragung. Diese gestatten einen deutlich geringeren Wärmestrom von der Wand zum Pellet und die Abdampftrate des Eises wird erheblich reduziert. Diese isolierende Wirkung des Gasfilms zwischen Wärmequelle und verdampfendem Objekt wird hier generalisiert als Leidenfrost Effekt bezeichnet.

Der Gasfilm schützt das Pellet nicht nur gegen Abdampfen. Zusätzlich schirmt er das Pellet von der Rohrwand ab, wenn das Schussrohr gekrümmt ist. Die Zentrifugalkraft bewirkt eine Beschleunigung des Pellets in Richtung der Rohrwand auf der Außenseite der Kurve. Trifft das Eis auf die Wand,

bildet sich der Gasfilm. Die Kraft des Gasdrucks wirkt der Zentrifugalkraft entgegen und hält das Pellet von der Wand entfernt. Das Gaspolster schützt das Pellet davor an der Rohrwand zu zerbrechen. Abbildung 2.7 zeigt eine schematische Darstellung des Leidenfrost Effekts im Schussrohr.

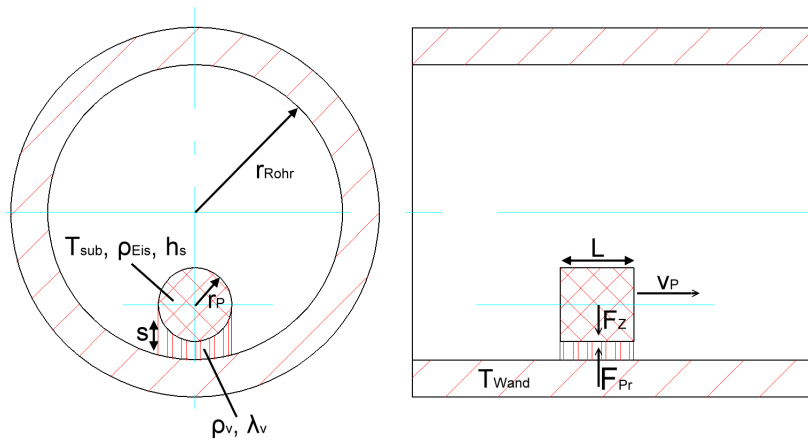


Abbildung 2.7: Schema des Leidenfrost Effekts eines Pellets im Schussrohr

Vor dem Bau eines Schussrohres muss überprüft werden, ob die Geometrie des Rohres keine unzulässig hohe Belastung aus das Pellet hervor ruft. Um dies abschätzen zu können, wird die Stärke des Leidenfrost Effekts bestimmt und der daraus resultierende Gasdruck mit der Belastung durch die Zentrifugalkraft verglichen. Bedingung für das Überleben des Pellets ist, dass die Zentrifugalkraft kleiner ist, als die Kraft durch den Gasdruck.

$$\rho_{Eis} * \pi * r^2 * L * \frac{u_P^2}{R_K} \leq p * 2 * r * L \quad (2.19)$$

Hier wird der Krümmungsradius des Rohres mit R_K bezeichnet. Für den Gasdruck p gilt folglich

$$p \geq \frac{\rho_{Eis} * \pi * r * u_P^2}{2 * R_K} \quad (2.20)$$

Der Druck in der Gasschicht wird in diesem Modell mittels des idealen Gasgesetzes angenähert. Daraus ergibt sich

$$p = \frac{m * R * T_{gas}}{V * M} = \frac{m * R * T_{gas}}{2 * r * s * L * M} \quad (2.21)$$

s bezeichnet hier die mittlere Dicke des Gaspolsters. Die Masse m des Gases ist die Masse, die vom Pellet abdampft. Aus der Energiebilanz am Pellet erhält man die Bedingung für den Massenstrom

$$\left| \frac{\partial m}{\partial t} \right| = |\dot{m}| = \frac{\lambda_{gas} * \pi * r^2}{h_s * s} * (T_{wand} - T_{sub}) \quad (2.22)$$

Um die Gasmasse zu bestimmen, wird das Problem vereinfacht. Das Pellet wird für die Zeit τ als ruhend betrachtet. Diese Zeitspanne wird so gewählt, dass das Pellet mit der Geschwindigkeit u_P genau die Zeit τ benötigt um eine Pelletlänge L voranzukommen. Diese Zeitdiskretisierung gewährleistet, dass das Pellet eine kontinuierliche Bewegung aufweist und somit auch an jeder Position im Rohr ein Gaspolster ausbildet. Für die Zeitspanne gilt entsprechend

$$\tau = \frac{L}{u_P} \quad (2.23)$$

Für die Masse, die in der Zeit τ sublimiert, gilt somit

$$m = \dot{m} * \tau = \frac{\lambda_{gas} * \pi * r^2 * L}{h_s * s * u_P} * (T_{wand} - T_{sub}) \quad (2.24)$$

Aus den Gleichungen (2.21) und (2.24) wird eine Bedingung für den Druck in der Gasschicht aufgestellt

$$p = \frac{\lambda_{gas} * \pi * r * R * T_{gas}}{2 * h_s * s^2 * M * u_P} * (T_{wand} - T_{sub}) \quad (2.25)$$

Setzt man Gleichung (2.25) in die Bedingung (2.20) ein, so erhält man eine Vorschrift für den Krümmungsradius.

$$R_K(u_P) \geq \frac{\rho_{Eis} * h_s * s^2 * M}{\lambda_{gas} * R * T_{gas} * (T_{wand} - T_{sub})} * u_P^3 \quad (2.26)$$

Die mittlere Dicke der Gasschicht s wird als zeitinvariant betrachtet und beträgt für ein Pellet der Länge $L = 2\text{mm}$ etwa $s = 0,04\text{mm}$ [22]. Die Temperatur T_{gas} ändert sich über die Zeit τ . Für den Temperaturverlauf in der Gasschicht wird eine instationäre Energiebilanz herangezogen. Daraus ergibt sich die Differentialgleichung

$$\frac{\partial T_{gas}}{\partial t} = \frac{\alpha}{\underbrace{\rho_{gas} * c_v * s}_b} * (T_{wand} - T_{gas}) \quad (2.27)$$

Die Lösung der Differentialgleichung liefert den Verlauf der Gastemperatur.

$$T_{gas}(t) = (T_{sub} - T_{wand}) * e^{-b*t} + T_{wand} \quad (2.28)$$

Für die Beziehung (2.28) wird die mittlere Gastemperatur verwendet. Diese berechnet sich wie folgt.

$$T_{gas,m} = \frac{1}{\tau} * \int_0^\tau T_{gas}(t) dt = \frac{1}{\tau} * \left(-\frac{1}{b} (T_{sub} - T_{wand}) * e^{-b*\tau} + T_{wand} * \tau + \frac{1}{b} * (T_{wand} - T_{sub}) \right) \quad (2.29)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α in Gleichung (2.27) wird mittels der Reynolds-Zahl und der Nusselt-Zahl für Spaltströmung bestimmt.

$$Re = \frac{u_P * s}{\nu} \quad (2.30)$$

$$Nu = \frac{\alpha * s}{\lambda_{gas}} = \left(3,75^3 + (1,47^3 + \sqrt{\frac{2 * Re * Pr * \frac{s}{L}}{1 + 22 * Pr}}) * Re * Pr * \frac{s}{L} \right)^{1/3} \quad (2.31)$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen kann man eine Abschätzung des minimalen Krümmungsradius für eine gegebene Pelletgeschwindigkeit auf Basis der Leidenfrost-Bedingung vornehmen. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die Zentrifugalkraft die Belastungsgrenze des Pellets nicht überschreiten darf. Aus der Festigkeitsbedingung $F_Z \leq F_{Zul}$ erhält man eine weitere Vorschrift für den minimalen Krümmungsradius.

$$R_K(v_P) \geq \frac{\rho_{Eis} * L}{\sigma_B} * u_P^2 \quad (2.32)$$

In Abbildung 2.8 sind die Kurven des minimalen Krümmungsradius über der Pelletgeschwindigkeit dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die Leidenfrost-Bedingung maßgebend für die Wahl des Krümmungsradius ist. Es ist jedoch zu beachten, dass dieses Modell eine konservative Abschätzung des minimalen Krümmungsradius gestattet, da die Dicke s des Gaspolsters als konstant betrachtet wird. Wird ein Pellet in einer Biegung an die Rohrwand gedrückt, so verringert sich die Dicke des Gaspolsters, die Sublimationsrate steigt und der Gasdruck nimmt zu. Daher ist zu erwarten, dass Pellets kleinere Krümmungsradien überleben können, als dieses Modell erwarten lässt.

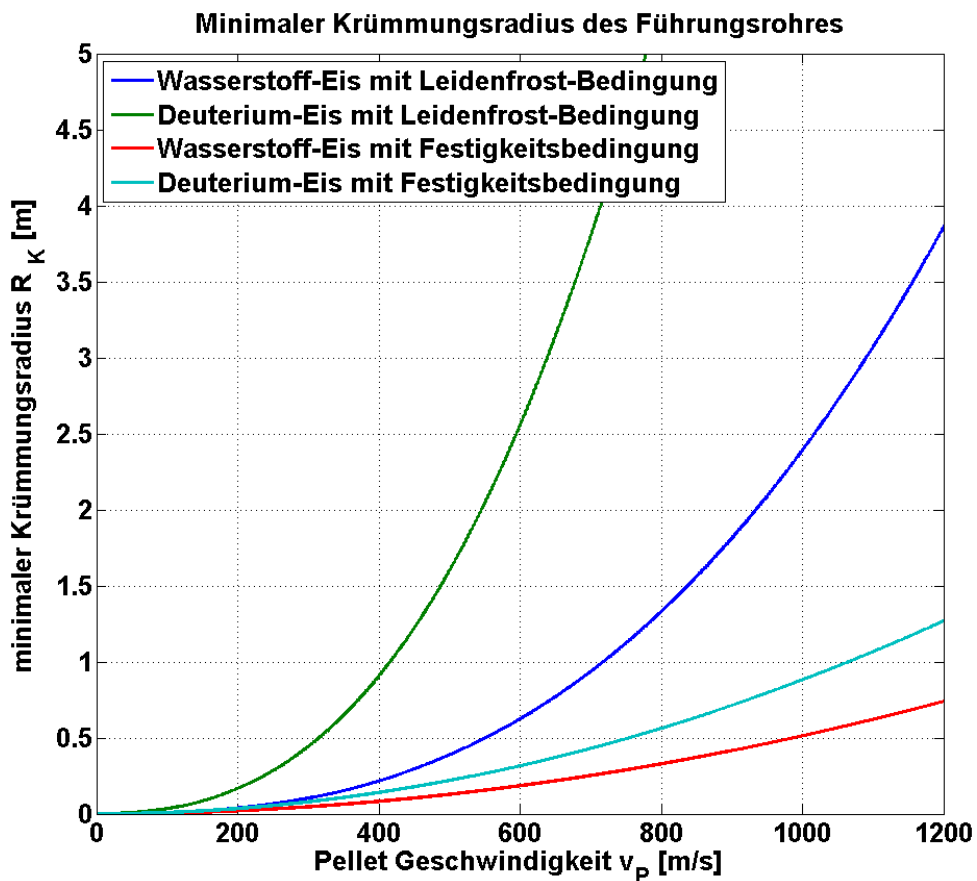


Abbildung 2.8: Minimaler Krümmungsradius eines Schussrohres in Abhängigkeit der Pelletgeschwindigkeit

2.5 Volumenrekonstruktion mittels Bayesian analysis

Ein wichtiger Teil der Charakterisierung ist die Bestimmung der transportierten Pelletmasse. Dazu muss zunächst die Masse des Pellets am Ende der Beschleunigungsstrecke ermittelt werden. Für diesen Zweck wird eine einzelne Schwarz-Weiß-Aufnahme des Pellets im Flug gemacht. Aus diesem Bild wird dann das Volumen mittels der Bayesian analysis, wie in der Arbeit von Szepesi et al.[26], bestimmt. Im Folgenden wird die Arbeit von Szepesi et al. kurz zusammengefasst. Für weiterführende Informationen wird auf die Arbeit[26] verwiesen. Die Aufnahme des Pellets wird zunächst mittels eines Bildbearbeitungsprogramms in ein 1-bit Schwarz-Weiß-Bild umgewandelt. Dabei soll nur der Schatten des Pellets schwarz dargestellt werden.

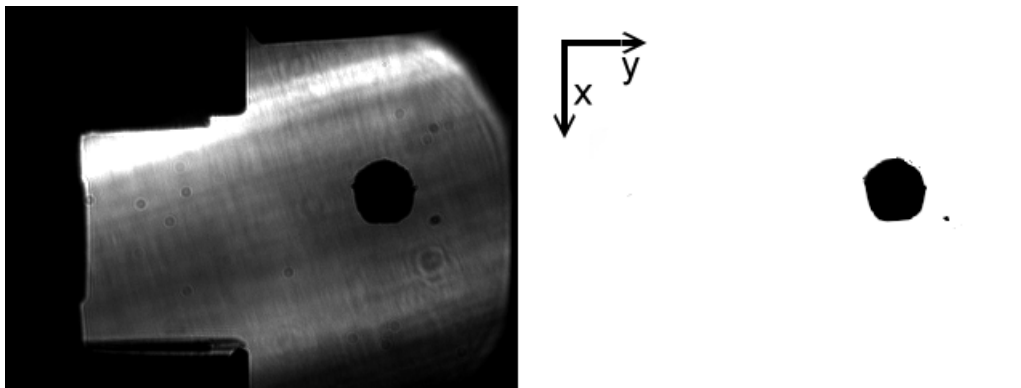


Abbildung 2.9: Schattenbild vor und nach der Umwandlung

Aus dem 1-bit Schwarz-Weiß-Bild werden dann die Schattenparameter bestimmt. Diese sind der größte Abstand D , der kleinste Abstand L und die Schattenfläche A . Die Abstände D und L sind jeweils die größte bzw. kleinste Distanz zweier paralleler Geraden, die die Kontur des Schattens berühren. Da es sich um zylindrische Pellets handelt, hängen die Schattenparameter von dem Winkel zwischen der Flächennormalen der Kreisfläche und der y-Achse ab. Dieser Winkel wird im Folgenden als ϕ bezeichnet. Aus den Schattenpa-

parametern lässt sich, mit Hilfe der Bayes'schen Statistik, die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der eine bestimmte Kombination von Pelletradius r und Pellthöhe h vorliegt.

$$P(r, h, \phi | D', L', A') \propto \underbrace{P(D) * P(L) * P(A)}_{likelihood} * \underbrace{P(r, h, \phi)}_{prior} \quad (2.33)$$

Die Variablen D' , L' und A' hängen von r , h und ϕ ab. Der Term auf der linken Seite wird als *posterior* bezeichnet. Es ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Kombination von Radius, Höhe und Winkel vorliegen. Der Term, der als *likelihood* bezeichnet wird, steht für die Wahrscheinlichkeiten, dass bestimmte Werte von D' , L' und A' für die gegebenen Schattenparameter vorliegen. Der *prior* Term enthält vorher getroffene Annahmen. Es wird erwartet, dass das Pellet doppelt so lang ist, wie sein Radius. Dafür wird eine Gauss-Verteilung angenommen. Zudem wird das Pellet als 3D-isotrop betrachtet. Damit folgt für den *prior*

$$P(r, h, \phi) = \exp\left(-\frac{(2 * r - h)^2}{2 * 0,15^2}\right) * \cos(\phi) \quad (2.34)$$

Für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Schattenparameter wird eine Gauss-Verteilung angenommen. Damit ergeben sich für die Terme der *likelihood* folgende Zusammenhänge.

$$P(D) \propto \exp\left(-\frac{(D - D')^2}{2 * \sigma_D^2}\right) \quad (2.35)$$

$$P(L) \propto \exp\left(-\frac{(L - L')^2}{2 * \sigma_L^2}\right) \quad (2.36)$$

$$P(A) \propto \exp\left(-\frac{(A - A')^2}{2 * \sigma_A^2}\right) \quad (2.37)$$

Die Unsicherheiten werden durch die Auflösung des Schattenbildes bestimmt. Sie werden zu $\sigma_D = 0,1mm$, $\sigma_L = 0,1mm$ und $\sigma_A = 0,2mm^2$ gewählt. Wie

zuvor bemerkt, hängen D' , L' und A' jeweils von r , h und ϕ ab. Der kleinste Abstand und die Schattenfläche können analytisch bestimmt werden.

$$L' = L'(r, h, \phi) = \min(h * \sin(\phi) + 2r * \cos(\phi), 2r) \quad (2.38)$$

$$A' = A'(r, h, \phi) = 2r * h * \sin(\phi) + r^2 * \cos(\phi) * \pi \quad (2.39)$$

Der größte Abstand D' muss numerisch bestimmt werden. Berechnet man nun die Wahrscheinlichkeiten für alle möglichen Kombinationen von r , h und ϕ , so kann man die wahrscheinlichste Kombination ermitteln und daraus das Pelletvolumen berechnen. Dafür wird zunächst die Abhängigkeit vom Winkel ϕ eliminiert.

$$P(r, h | D', L', A') = \int_0^{\pi/2} P(r, h, \phi | D', L', A') d\phi \quad (2.40)$$

Danach wird der erwartete Pelletradius $E(r)$ und die erwartete Pelletlänge $E(h)$ berechnet.

$$E(r) = \int_{0mm}^{1mm} r * \left(\int_{0mm}^{2mm} P(r, h | D', L', A') dh \right) dr \quad (2.41)$$

$$E(h) = \int_{0mm}^{2mm} h * \left(\int_{0mm}^{1mm} P(r, h | D', L', A') dr \right) dh \quad (2.42)$$

Aus diesen Erwartungswerten lässt sich das Volumen des Pellets rekonstruieren.

$$V_{rec} = \pi * E(r)^2 * E(h) \quad (2.43)$$

Es ist jedoch zu bemerken, dass Szepesi bei der Untersuchung des Bayesian Verfahrens zur Volumenrekonstruktion eine Unsicherheit von 20% bezüglich perfekt zylindrische Pellets festgestellt hat. Die Varianz des erwarteten Pelletradius wird hier vernachlässigt. Ein genaueres Ergebnis ließe sich erzielen,

wenn man statt dem erwarteten Pelletradius $E(r)$ den erwarteten quadratischen Pelletradius $E(r^2)$ verwenden würde und diesen zur Berechnung des Volumens heranziehen würde. Der quadratische Pelletradius berechnet sich analog zu (2.41).

$$E(r^2) = \int_{0mm}^{1mm} r^2 * \left(\int_{0mm}^{2mm} P(r, h | D', L', A') dh \right) dr \quad (2.44)$$

Besser wäre noch, das Pelletvolumen direkt durch Integration des Posterior zu bestimmen.

2.6 Das Plasma-Shielding Modell

Im Folgenden wird die Arbeit von Kaufmann et al.[43] zum Plasma Shielding Modell kurz beschrieben. Dieses Modell beschreibt das Verhalten eines kryogenen Wasserstoffpellets, das sich durch das heiße Plasma bewegt. Dadurch kann die Eindringtiefe des Pellets in das Plasma und die Verteilung des Pelletmaterials abgeschätzt werden. Während das Pellet durch das Plasma fliegt, treten mehrere Effekte auf. Trifft das Pellet auf das Plasma kommt es zu sofortiger Ablation am Rand des Pellets. Das gasförmige Material wird ionisiert und dehnt sich sphärisch um das Pellet aus. Dadurch kommt es zu einer lokalen Veränderung des Magnetfeldes und der Wärmefluss über die Elektronen zum Pellet wird reduziert. Eine dünne Gasschicht, die das Pellet umschließt, bleibt unionisiert. Diese Schicht wird vom Plasma nicht beeinflusst und verringert die Zahl der Elektronen die zum Pellet gelangen. Dieser Effekt wird als Neutral-Gas-Shielding bezeichnet. Das Plasma Shielding beschreibt, wie sich das sublimierte Material auf das Plasma auswirkt. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich nahe des Pellets Plasmastränge entlang der magnetischen Feldlinien ausbilden, deren Temperatur geringer ist als die des umgebenden Plasmas. Die Plasmadichte der Stränge ist höher als im umgebenden Plasma, was die thermische Abschirmung des Pellets gegen die Elektronen verbessert. Die Shielding-Phänomene schützen das Pellet im Plas-

ma. Berücksichtigt man dies, kann das Verhalten eines Pellets im Plasma des W7-X Experiments abgeschätzt werden (Abb. 2.10).

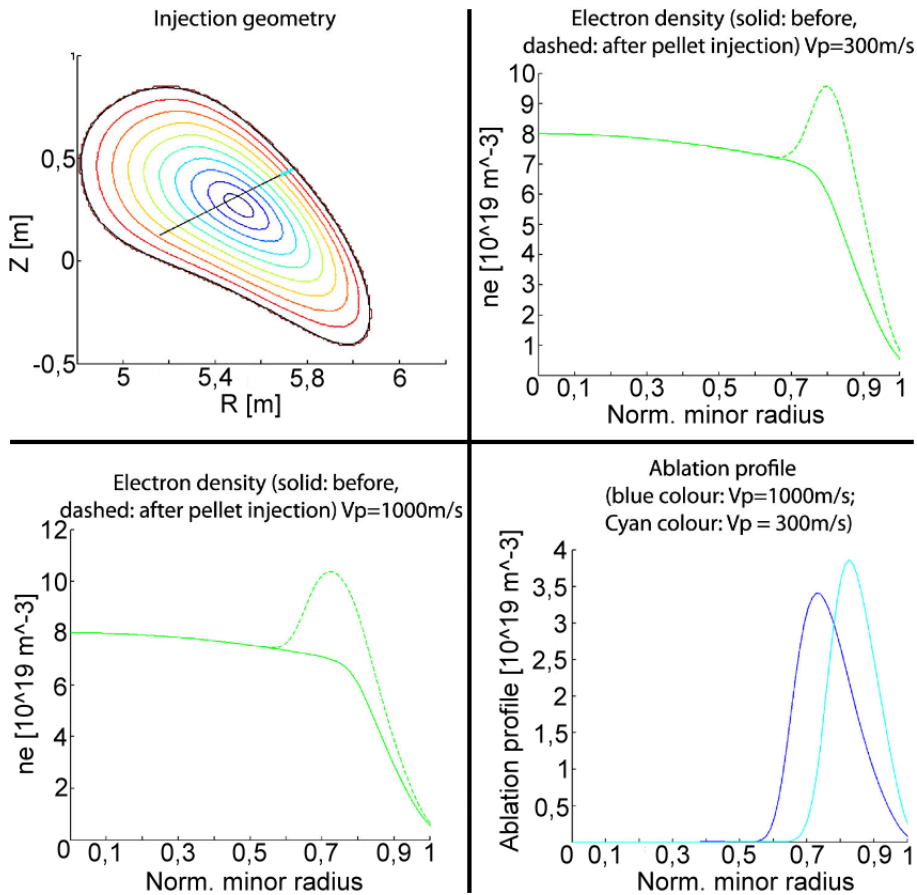


Abbildung 2.10: Pelletablation bei verschiedenen Pelletgeschwindigkeiten [35]

Ein Vergleich der Elektronendichte nach dem Pelleteinschuss mit $300 \frac{m}{s}$ und $1000 \frac{m}{s}$ zeigt, dass der Ort der höchsten Elektronendichte etwa gleich ist. Die Ablationsprofile zeigen, dass das schnellere Pellet etwas tiefer ins Plasma eindringt. Jedoch ist die Eindringtiefe in beiden Fällen nicht ausreichend für eine effiziente Brennstoffzufuhr. Pellets mit einer Geschwindigkeit von $250 \frac{m}{s}$, wie sie von der Blower Gun bereitgestellt werden, können jedoch für Untersuchungen am Plasmarand verwendet werden.

Kapitel 3

Versuchsaufbau

Da die Reproduzierbarkeit ein wichtiger Teil experimenteller Arbeit ist, ist eine präzise Dokumentation des Versuchsaufbaus von besonderer Bedeutung. Daher wird im Folgenden jeder Teil des Aufbaus beleuchtet. Speziell der Aufbau und die Modifikation der Blower Gun sollen hier hervorgehoben werden. Ferner werden die Führungsrohre und das Zielgefäß beschrieben. Zudem werden die Diagnostiken und die Steuerung der Blower Gun erläutert.

3.1 Aufbau und Funktionsprinzip der Blower Gun

Die Blower Gun kann in drei Abschnitte unterteilt werden. Der erste Teil, die Pelletquelle, ist für die Produktion des gefrorenen Wasserstoffs oder Deuteriums zuständig und für die Formung des Eisstanges sowie dessen Weiterleitung zum zweiten Teil. Dieser ist der Beschleunigungsmechanismus, welcher den Eisstang zunächst in die Pellets teilt und diese dann mittels des Treibgases beschleunigt. In der Beschleunigungsstrecke wird das Pellet noch im Gasstrom mitgezogen, bevor das Treibgas im Expansionsgefäß entweicht. Danach tritt das Pellet in den dritten Abschnitt der Blower Gun, welcher aus dem Schussrohr besteht. Dieses Rohr leitet das Pellet aus dem Injektor in das anschließende Führungsrohr. Diese Unterteilung richtet sich nach den

einzelnen Funktionsabschnitten und erleichtert das Verständnis der verschiedenen Schritte vom Gas zum bewegten Pellet.

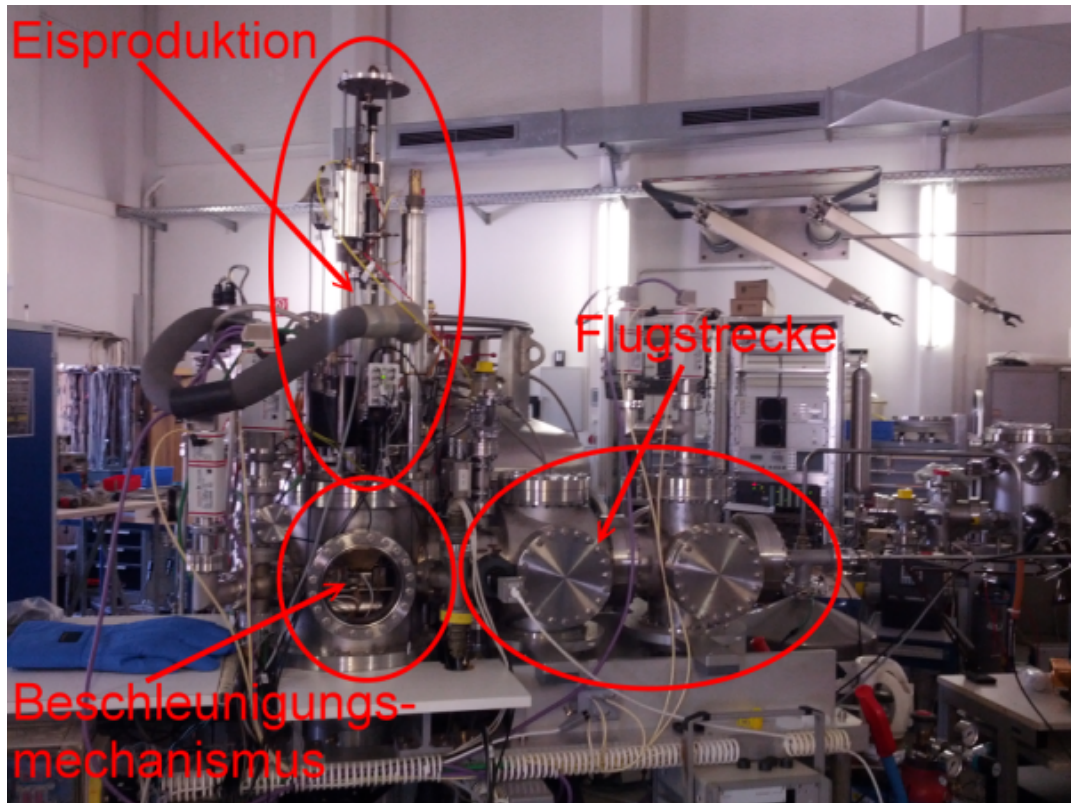


Abbildung 3.1: Grobe Unterteilung der Blower Gun

Zunächst wird der erste Teil, die Pelletquelle, näher erläutert. Dieser besteht aus zwei Kryostaten, dem Extrusionskryostaten und dem Vorratskryostaten. Während des Betriebs werden beide Kryostaten mit flüssigem Helium gekühlt. Dadurch erreicht der Extrusionskryostat eine Temperatur von etwa 4,8K und der Vorratskryostat, aufgrund seiner größeren Masse, eine Temperatur von etwa 10K. Der Extrusionskryostat ist aus drei koaxialen Röhren aufgebaut. Zwischen der innersten und der mittleren Röhre verdampft das flüssige Helium. Durch diesen Phasenübergang wird der Kryostat gekühlt. Zwischen der mittleren und der äußeren Röhre besteht ein Vakuum, das für die thermische Isolierung sorgt. An der inneren Röhre ist ein Einlassven-

til angebracht, durch welches Wasserstoff- oder Deuteriumgas in den Kryostaten gelangt. Für den Schutz vor zu hohem Druck ist ein Sicherheitsventil eingebaut, durch das ein Teil des Gases abgelassen werden kann. Die Stirnseiten der Röhren sind vakuumdicht verschlossen, mit Ausnahme der inneren Röhre. Diese wird auf ihrer Oberseite durch den Kolben eines Pneumatikzylinders verschlossen. An der Unterseite ist eine Düse, die Extrusionsdüse, angebracht. Der Durchmesser des Düsenaustritts beträgt 2mm. Der Austritt der Düse wird durch einen drehbaren Stift verschlossen. Senkrecht zur Achse des Stifts ist eine Bohrung mit 2mm Durchmesser eingebracht. So kann die Düse durch Drehung des Stifts geöffnet werden. Im Anschluss an die Düse ist der Vorratskryostat angebracht. Dieser besteht aus einem massiven Messingblock, in den eine gekrümmte Nut, der Vorratskanal, eingefräßt ist. Der Eintritt des Vorratskanals befindet sich in der Flucht des Düsenaustritts. Gegenüber des Vorratskanals ist ein drehbarer Arm angebracht, der durch einen Schrittmotor angetrieben wird. Der Arm ist so positioniert, dass ihn die Drehung des Schrittmotors durch den Vorratskanal führt.

Während des Betriebs wird Wasserstoff- oder Deuteriumgas aus einem Vorratsbehälter in den Extrusionskryostaten eingelassen, bis der Druck im Vorratsbehälter etwa 1,4 bar beträgt. Das Gas friert, aufgrund der geringen Temperatur, an der inneren Röhre des Extrusionskryostaten fest. Im Anschluss wird diese Röhre mittels elektrischen Stroms erwärmt, damit sich das Eis leichter von der Wand lösen lässt. Ist die Zieltemperatur erreicht, wird der Pneumatikzylinder mit 8 bar Druckluft beaufschlagt. Dadurch wird der Kolben durch die innere Röhre gepresst und löst das H_2/D_2 Eis von der Wand. Das Eis wird in die Düse und gegen den geschlossenen Verschluss gepresst. Dadurch verdichtet sich das Eis und es wird stabiler. Ist das Eis ausreichend komprimiert, wird der Verschlusszylinder gedreht, sodass die Bohrung die Düse öffnet. Der Kolben schiebt nun das Eis durch die Düse und die Bohrung. Dadurch wird ein Eisstrang mit 2mm Durchmesser geformt. Dieser Strang wird weiter in den Vorratskanal geschoben. Dort verbleibt das Eis, bis Pellets angefordert werden. Der Kanal des Vorratskryostaten ist 124mm lang. Das

erlaubt das Aufbewahren von 62 Pellets mit je 2mm Länge über mehrere Stunden. Werden Pellets angefordert, wird der Arm in die Nut des Vorratskryostaten geführt. Der Schrittmotor dreht den Arm so, dass dieser den Eisstrang weiter durch den Vorratskanal schiebt bis er am Ende des Kryostaten heraus kommt. Dort tritt das Eis dann in den Beschleunigungsmechanismus ein.

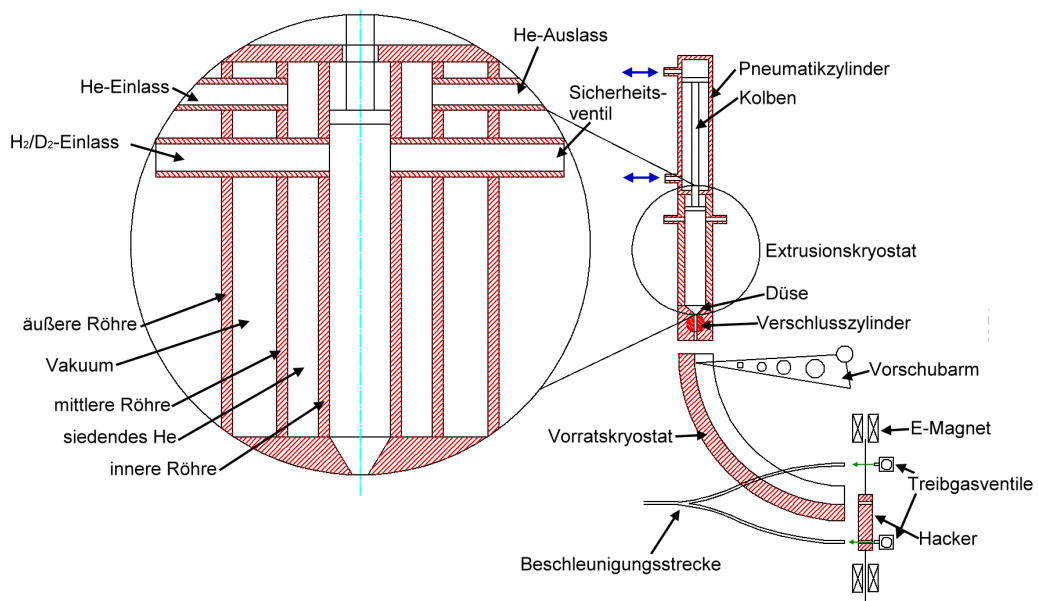


Abbildung 3.2: Schema der Eisproduktion und des Beschleunigungsmechanismus

Der Beschleunigungsmechanismus besteht aus einem magnetisch gelagerten Hacker und zwei Gasventilen mit kurzen Öffnungszeiten. Der Hacker ist eine dünne Kunststoffplatte mit zwei Bohrungen, die jeweils 2mm Durchmesser haben. An zwei gegenüberliegenden Seiten sind Dauermagnete befestigt, die in Elektromagneten gelagert sind. Im Ausgangszustand befindet sich eine Bohrung des Hackers in der Flucht des Vorratskanals. Die andere Bohrung steht vor einem der Treibgasventile. Werden Pellets angefordert, so bewegt der Vorschubarm den Eisstrang aus dem Vorratskryostaten in die Bohrung des Hackers. Ist die Bohrung gefüllt, werden die Elektromagnete umgepolt

und der Hacker wird verschoben. Dabei wird das Eis in der Bohrung vom Strang abgeschert. Der Hacker wird soweit verfahren bis sich die befüllte Bohrung vor dem Treibgasventil befindet. Die andere Bohrung steht, in dieser Lage des Hackers, in der Flucht des Vorratskanals. Während die leere Bohrung mit Eis befüllt wird, wird das Treibgasventil hinter der gefüllten Bohrung kurz geöffnet. Der Gaspuls treibt das Pellet aus dem Hacker und beschleunigt es. Dieser Ablauf wird im Anschluss in die entgegengesetzte Richtung wiederholt. Durch das parallele befüllen der einen Bohrung und des Schusses aus der anderen werden hohe Pelletfrequenzen erreicht.

Leidenfrost gun operation cycle:

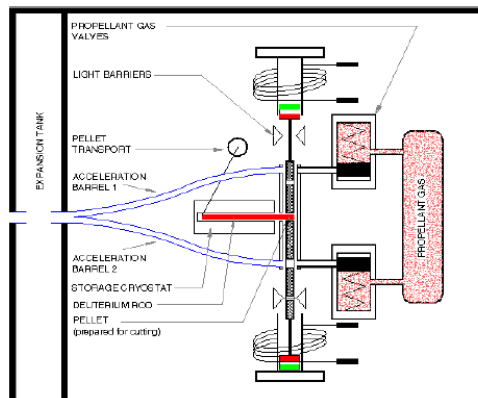
Deuteriumeisstab wurde im Extrusionskryostaten extrudiert

Der Eisstab wird im Vorratskryostaten aufbewahrt
(Schritt 1)

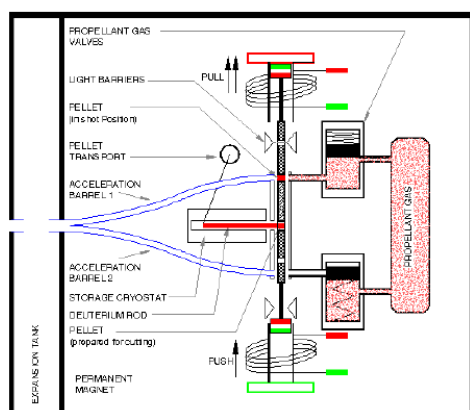
Pellet 1 wurde vom Eisstab durch das Shuttle abgeschnitten (Schritt 2)

Pellet 1 wird in Schussposition gebracht, während Pellet 2 durch das Shuttle abgeschnitten wird, Pellet 1 wird durch einen Gaspuls beschleunigt (Schritt 3)

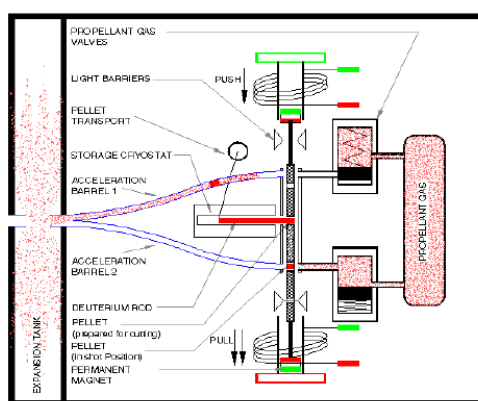
Pellet 2 wird in die zweite Schussposition gebracht und durch einen erneuten Gaspuls beschleunigt



Step 1



Step 2



Step 3

Abbildung 3.3: Zyklen des Beschleunigungsmechanismus[10]

Das verschossene Pellet tritt, nach dem Verlassen des Hackers, in die Beschleunigungsstrecke ein. Da der Beschleunigungsmechanismus Pellets aus zwei verschiedenen Lagen des Hackers verschießt, sind zu Beginn der Flugstrecke zwei Schussrohre notwendig. Diese sind leicht gekrümmt um sie zu einem Rohr zusammenführen zu können. Dieses Rohr verläuft dann durch ein weiteres Vakuumgefäß, den Expansionsbehälter. Das Schussrohr ist in diesem Gefäß auf einer kurzen Strecke unterbrochen. Dies erlaubt dem Treibgas aus dem Schussrohr zu entweichen. Das ist notwendig, da möglichs kein Treibgas in das Plasma gelangen sollte. Ferner ermöglicht das unterbrochene Schussrohr eine erste Untersuchung des Pellets. Dafür sind auf dieser Freiflugstrecke verschiedene Diagnostiken angebracht. Hat das Pellet den Expansionsbehälter durchlaufen, verlässt es die Blower Gun und tritt in das Führungsrohr ein.

Nachdem, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, festgestellt wurde, dass Pellets mit 2mm Durchmesser für den Einsatz an W7-X geeignet sind, wurde die Blower Gun dahingehend modifiziert, Pellets mit 2mm Durchmesser produzieren zu können. Zuvor war der Injektor für 1mm Pellets ausgelegt. Die Rekonfiguration der Blower Gun war Bestandteil dieser Arbeit. Der Umbau umfasste zum einen den Verschlusszylinder. Hier wurde ein neuer Zylinder mit einer 2mm Bohrung eingesetzt. Im selben Zug musste auch die Düse ausgetauscht werden. Die neue ist mit einer 2mm Bohrung und einer entsprechenden konischen Senkung ausgeführt. Des Weiteren musste der Vorratskryostat ersetzt werden. Die Nut des neuen Kryostaten ist breiter und ermöglicht somit die Aufbewahrung des 2mm Eisstranges. Um zu verhindern, dass der Vorschu-barm das fragile Eis beschädigt, musste auch dieser ausgetauscht werden. Der neue Arm hat eine breitere Spitze. Dadurch wird der Druck auf die Strin-seite des Eisstranges reduziert und ein Eindringen des Arms in die Stirnfläche wird vermieden. Außerdem musste der Hacker ersetzt werden. Der neue Hacker enthält statt der 1mm Bohrungen nun Bohrungen mit 2mm Durchmesser. Obgleich der Fertigungsaufwand für die modifizierten Komponenten

hoch ist, so ist nur eine Austausch von wenigen Teilen notwendig um die Blower Gun für die Produktion verschiedener Pelletgrößen umzubauen. Sollte der Injektor in Zukunft öfter verschiedene Pelletdurchmesser liefern sollen, so wäre jedoch ein Kryostatsystem vorzuziehen, dass für variable Pelletgrößen ausgelegt ist. Ein solches System wird bereits erfolgreich an der ASDEX Upgrade Zentrifuge betrieben.

Zur Herstellung des Hochvakuums in der Blower Gun stehen drei Turbopumpen und drei Drehschieberpumpen zur Verfügung. Die Turbopumpen sind vom Typ Leybold Turbovac 361 und die Dreschieberpumpen vom Typ Leybold Trivac D30A. Nähere Spezifikationen sind Anhang B zu entnehmen. Jeweils zwei Turbopumpen und zwei Drehschieberpumpen sind am Extrusionsgefäß angeschlossen, welches den Vorratskryostaten und den Beschleunigungsmechanismus enthält. Die dritte Turbopumpe und Drehschieberpumpe stellen das Vakuum im Expansionsgefäß bereit. Die Pumpen sind jeweils seriell geschaltet. Die Drehschieberpumpen dienen zur Herstellung des Vorvakuums und werden deshalb auch als Vorvakuumpumpen bezeichnet. Das Vorvakuum liegt im Bereich von 10^{-3} mbar. Die Saugseiten der Drehschieberpumpen sind an die jeweiligen Turbopumpen angeschlossen. Diese sind direkt an die Gefäße angeflanscht und dienen der Erzeugung des Hochvakuums. Diese Pumpenschaltung ist notwendig, da die Turbopumpen für molekulare Strömung⁶ ausgelegt sind und nur in diesem Regime betrieben werden dürfen. Würden sie ohne Vorvakuumpumpen in einer viskosen Strömung aktiviert werden, würde die mechanische Belastung auf die Turbinenblätter zu groß und die Pumpen würden zerstört. Daher ist beim Betrieb der Blower Gun immer darauf zu achten, dass kein größeres Leck entstehen kann, welches die molekulare Strömung gefährden könnte.

Da abgedampftes Pelletgas ebenfalls von den Pumpen abgesaugt wird, muss ein zusätzlicher Explosionsschutz bereitgestellt werden. Dafür wurden die Vorvakuumpumpen mit einem Gasballast aus Stickstoff ausgestattet. Hier-

⁶Als molekulare Strömung wird eine Strömung bezeichnet, in der die mittlere freie Weglänge eines Gasmoleküls größer ist als die geometrischen Abmessungen des Behältnisses

bei werden geringe Mengen gasförmigen Stickstoffs ins Pumpvolumen eingelassen um die Entstehung eines zündfähigen Gemischs zu verhindern. Beim Betrieb der Pumpen an der Blower Gun ist kein Kühlwasser nötig.

3.2 Das Zielgefäß

Die während der Versuche verschossenen Pellets müssen nach dem Führungsrohr aufgefangen werden. Neben der Verletzungsgefahr ist dies aufgrund des Vakuums in der Blower Gun notwendig. Das Vakuum muss durch den kompletten Versuchsaufbau hindurch aufrecht erhalten werden. Daher wurde ein Zielgefäß am Ende des Führungsrohres installiert. Außer der Bereitstellung des Vakuums dient es auch als Aufhängung für die Diagnostiken am Ende des Führungsrohres. Zudem gestattet das Zielgefäß eine Beobachtung des Pellets vor und nach dem Aufschlag auf die Rückwand des Gefäßes.

Das Zielgefäß besteht aus einem Doppelkreuzstück vom Typ CF160. An der Seite, welche dem Führungsrohr zugewandt ist, ist ein Reduzierungsflansch angebracht. Dieser dient als Anschluss für ein weiteres Doppelkreuzstück vom Typ CF 40. An den drei anderen Öffnungen des großen Doppelkreuzstücks, welche in der selben Ebene liegen wie das Führungsrohr, sind Glasflansche befestigt. Diese erlauben die Beobachtung eingeschossener Pellets. Das Fenster gegenüber des Reduzierungsflanschs ist dabei von besonderem Interesse, da hier der Aufschlag der Pellets erfolgt. Die untere Öffnung ist durch einen Blindflansch verschlossen. Dieser Flansch trägt das Gewicht des Doppelkreuzstücks. Die obere Öffnung ist mit einem Reduzierungsflansch auf CF 40 versehen. Hiermit wird das Zielgefäß an das Pumpensystem angeschlossen. Alle Flanschverbindungen sind durch Kupferdichtungen abgedichtet.

Das Zielgefäß ist durch einen Wellbalg mit einem großen Vakuumbehälter verbunden. Dieser fasst 160 Liter und dient als Expansionsgefäß. Das ist bei plötzlich auftretenden Lecks nahe des Zielgefäßes von Vorteil, da sich

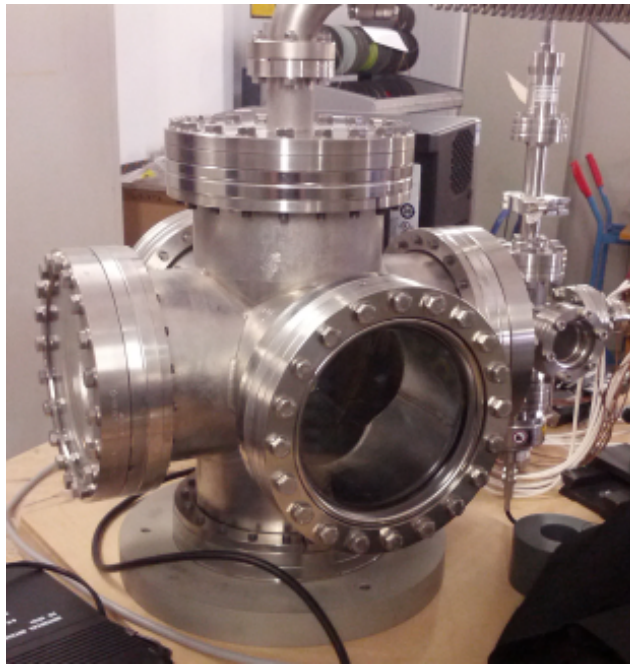


Abbildung 3.4: Das Zielgefäß

die einströmende Luft im Expansionsgefäß ausdehnen kann bevor sie auf die Turbopumpe trifft. Zudem wird die Vibration, die durch die Turbopumpe erzeugt wird, durch die Aufhängung des Ausgleichsgefäßes und den Wellbalg gedämpft. Somit ist keine zusätzliche Dämpfung direkt am Zielgefäß notwendig. Das Pumpensystem zur Bereitstellung des Vakuums ist dem der Blowergun sehr ähnlich. Als Vorvakuumpumpe wird eine Drehschieberpumpe vom Typ Leybold DK200 eingesetzt. Die Saugseite ist mit der Turbopumpe verbunden, welche direkt am Ausgleichsgefäß angeflanscht ist. Die Turbopumpe ist vom Typ Leybold Turbovac 360. Die speziellen Eigenschaften der Pumpen können Anhang B entnommen werden.

3.3 Die Führungsrohre

Ein Führungsrohr verbindet den Injektor mit dem Reaktorgefäß. Durch dieses Rohr werden die Pellets geleitet. Während des Flugs durch das Rohr erfolgt keine Kühlung und das Rohrvolumen wird nicht direkt gepumpt. Somit

ist das Führungsrohr ein sehr kritischer Teil des Injektionssystems und damit Gegenstand der Untersuchung. Für die Versuche wurden zwei verschiedene Führungsrohrgeometrien verwendet.

3.3.1 Das Testrohr

Dieses Führungsrohr wird für die Erprobung der Diagnostiken verwendet. Daher muss die Geometrie so gewählt werden, dass eine hohe Transporteffizienz zu erwarten ist. Für diesen Zweck wird ein Edelstahlrohr vom Typ 1.4435 (316L) mit einem Außendurchmesser $d_a = 10mm$ und einer Wandstärke $s = 1mm$ verwendet. Es ist elektrochemisch poliert um eine hohe Oberflächengüte zu erreichen. Dieses Rohr wird so gebogen, dass es eine gerade und eine gekrümmte Teilstrecke enthält. Die genaue Geometrie ist Abbildung 3.4 zu entnehmen.

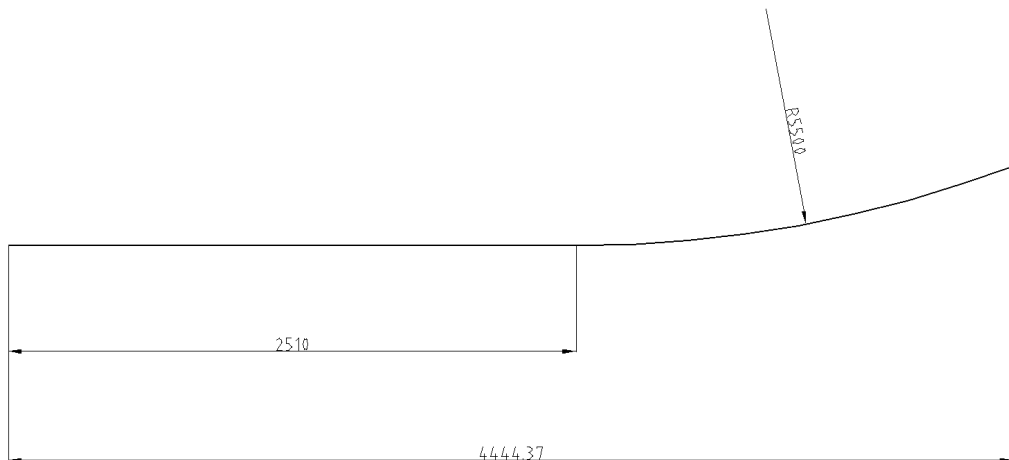


Abbildung 3.5: Geometrie des Test-Führungsrohres

Die Biegung erfolgt ohne Matrize. Daher beträgt der Krümmungsradius nur näherungsweise $R = 5500mm$. Das gerade Ende des Führungsrohres ist in die Blower Gun eingespannt und das gebogene Ende an der Messstrecke. Die vakuumdichten Verbindungen werden durch Swagelok Rohrverschraubungen hergestellt. Das Führungsrohr ist hinsichtlich des Vakuums der kritischste Teil des Versuchsaufbaus. Obwohl das Rohr sowohl durch die Blower Gun

als auch durch das Zielgefäß gepumpt wird, ist darin kein Hochvakuum zu erwarten. Jedoch wird angenommen, dass im Rohr eine molekulare Strömung herrscht. Der höhere Druck im Rohr ist dem endlichen Leitwert des Rohres geschuldet. Der Leitwert beschreibt den strömungsmechanischen Verlust durch Reibung zwischen Rohr und Fluid. Dieser kann für gerade und gekrümmte Rohre im Bereich der molekularen Strömung wie folgt bestimmt werden.

$$L_{gerade} = 12,1 * \frac{d^3}{l} \quad (3.1)$$

$$L_{gebogen} = 12,1 * \frac{d^3}{l_{ax} + 1,33 * \frac{\theta}{180} * d} \quad (3.2)$$

Bei diesen Abschätzungen müssen die Längen in Zentimeter und die Winkel in Grad angegeben werden. Für das Testrohr ergeben sich damit die Leitwerte $L_{gerade} = 0,0247 \frac{l}{s}$ und $L_{gebogen} = 0,0319 \frac{l}{s}$. Für das effektive Saugvermögen gilt

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L_{gerade}} + \frac{1}{L_{gebogen}} \quad (3.3)$$

Daraus geht hervor, dass das effektive Saugvermögen im Rohr deutlich geringer ist, als das, welches die Pumpen bereitstellen. Folglich ist der Druck im Rohr höher als in den anderen Elementen des Versuchsaufbaus. Für eine Abschätzung des Vakuumdrucks wird der ungünstigste Fall betrachtet. Ein Ende des Führungsrohres wird verschlossen und am anderen Ende wird durch eine Turbopumpe gepumpt. Dabei wird angenommen, dass die Strömung zwischen Pumpe und Rohr verlustfrei ist. Damit stellt sich eine effektive Saugleistung von $S_{eff} = 0,0139 \frac{l}{s}$ ein. Unter der Annahme einer Gasabgabe von $Q = 3 * 10^{-8} \frac{mbar * l}{s * cm^2}$ [30] und einer gasabgebenden Fläche, die der Innenfläche des Rohres entspricht und $A = 223,7 cm^2$ beträgt, ergibt sich der Druck am verschlossenen Rohrende zu

$$p = \frac{Q * A}{S_{eff}} = 4,827 * 10^{-4} mbar \quad (3.4)$$

Dieser Vakuumdruck ist für die Versuchsdurchführung geeignet. Neben den Vakuumeigenschaften des Rohres ist auch die Verträglichkeit zwischen Rohrgeometrie und Pellet von Bedeutung. Aus Abbildung 2.7 geht hervor, dass der Krümmungsradius von 5,5m für eine erwartete Pelletgeschwindigkeit von $u_p \leq 400 \frac{m}{s}$ die Leidenfrost-Bedingung erfüllt. Da es im Rohr einen Übergang von einem geraden in einen gekrümmten Abschnitt gibt, ist auch der maximale Auftreffwinkel α wichtig.

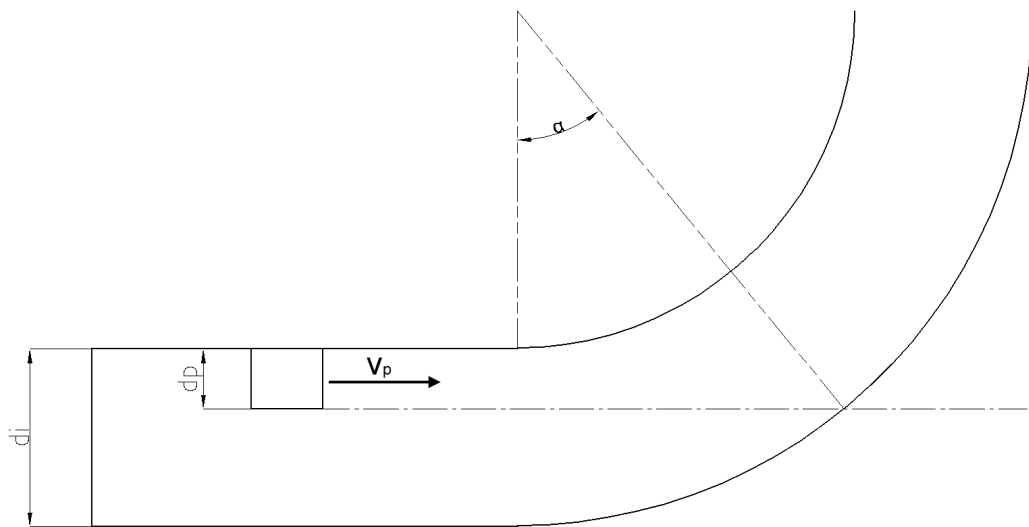


Abbildung 3.6: Maximaler Auftreffwinkel im Führungsrohr

Der Winkel lässt sich wie folgt berechnen.

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{d_i - d_p}{R}\right) \quad (3.5)$$

Damit liegt der maximale Auftreffwinkel für ein 2mm Pellet im Testrohr bei $\alpha = 2,677^\circ$. In der Arbeit von Lorenz[20] wird aufgezeigt, dass auftreffende Pellets unter diesem Winkel bis zu einer Pelletgeschwindigkeit $u_p \approx 750 \frac{m}{s}$ nicht zerbrechen. Damit ist die Geometrie des Testrohres für die Charakterisierung des Injektors und für die Erprobung der Diagnostiken geeignet.

3.3.2 Das kritische Führungsrohr

Um die Blower Gun später am Fusionsexperiment W7-X einsetzen zu können, wird eine Führungsrohrkonstruktion aufgebaut. Diese besteht fast ausschließlich aus geraden oder einfach gekrümmten Rohren. Ein Abschnitt enthält jedoch zwei aufeinander folgende gegenläufige Biegungen. Dieser Abschnitt wird hier als kritisches Führungsrohr bezeichnet. Der Abschnitt ist deshalb kritisch, weil das Pellet beim Durchfliegen der S-Kurve im Eintritt in die zweite Biegung nicht mehr an der Rohrwand anliegt und auf die gegenüberliegende Rohrwand trifft. Um die Eigenschaften des Rohrs hinsichtlich des Pellettransports zu bestimmen, wird es für den Versuchsaufbau nachgebaut. Es besteht aus einem Edelstahlrohr vom Typ 1.4435 (316L), welches elektrochemisch poliert ist. Der Außendurchmesser beträgt $d_a = 10\text{mm}$ und die Wandstärke $s = 1\text{mm}$. Die genaue Geometrie ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

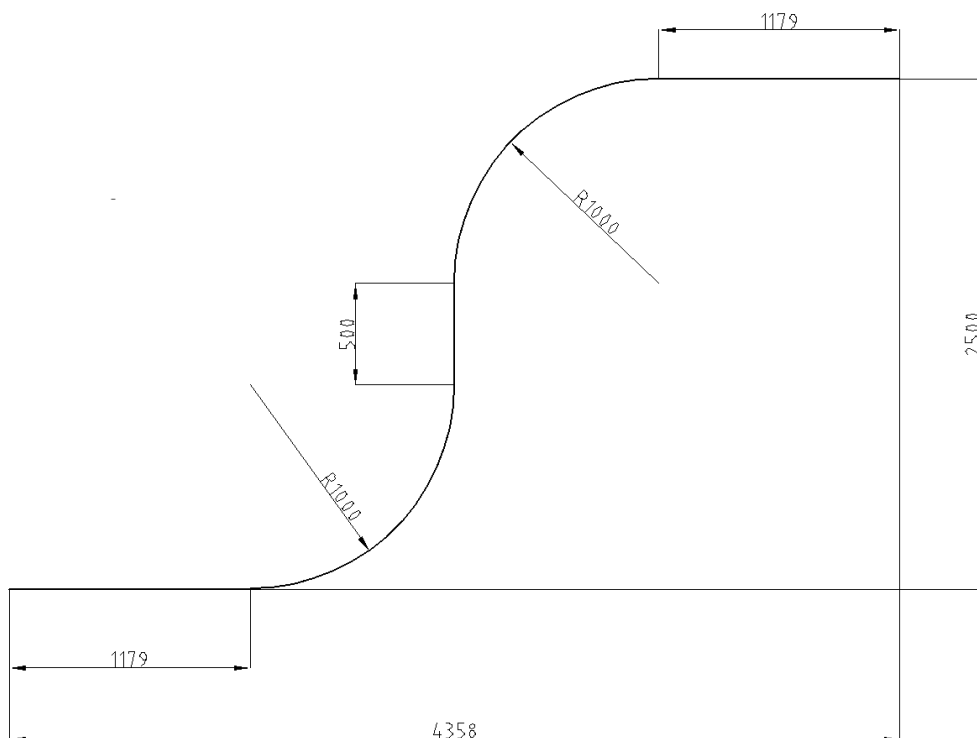


Abbildung 3.7: Geometrie des kritischen Führungsrohres

Die Biegungen werden über einer Matrize aus Holz gebogen. Die Matrize ist ein Viertelkreis mit einem Radius von 995mm und einer Dicke von 25mm. Das Rohr wird an einer Kante des Viertelkreises angelegt und mittels Schraubzwinde befestigt. Dann wird das Rohr langsam über die Matrize gebogen und etwas darüber hinaus. Dieses Überbiegen ist nötig, damit das Rohr später die gewünschte Form behält. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass die Krümmung gleichmäßig ist und keine Knicke entstehen.



Abbildung 3.8: Fertigung des kritischen Führungsrohres

Die Geometrie ist punktsymmetrisch, daher ist es nicht von Bedeutung, welches Ende an die Blower Gun oder das Zielgefäß angeschlossen wird. Die relevanten Größen hinsichtlich des Vakuums im Schussrohr sind zum einen die Leitwerte. Diese betragen $L_{gerade,1179} = 0,0525 \frac{l}{s}$, $L_{gerade,500} = 0,1239 \frac{l}{s}$ und $L_{gebogen} = 0,0039 \frac{l}{s}$. Daraus ergibt sich nach (3.3) das effektive Saugvermögen einer Turbopumpe am Ende des Führungsrohres zu $S_{eff} = 0,00179 \frac{l}{s}$.

Mit einer Gasabgabe $Q = 3 * 10^{-8} \frac{\text{mbar} * \text{l}}{\text{s} * \text{cm}^2}$ [30] und einer gasabgebenden Fläche $A = 301,6 \text{cm}^2$ beträgt der minimal erreichbare Druck am verschlossenen Ende entsprechend (3.4) $p = 5,055 * 10^{-3} \text{mbar}$. Diese Vakuumqualität ist für den Betrieb akzeptabel.

Der Krümmungsradius erfüllt nach Abbildung 2.7 die Leidenfrost-Bedingung für die maximal erwartete Pelletgeschwindigkeit $u_p \leq 400 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Der Auftreffwinkel ist bei dieser Geometrie besonders wichtig, da ein Auftreffen entsprechend Abbildung 3.5 in der zweiten Biegung sicher stattfindet. Der maximale Auftreffwinkel beträgt nach Gleichung (3.5) $\alpha = 6,28^\circ$. Einen Aufschlag unter diesem Winkel können die Pellets nach Lorenz[20] bis zu einer Geschwindigkeit von $u_p \approx 400 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ mit genügender Sicherheit überstehen ohne zu zerbrechen. Somit ist zu erwarten, dass das kritische Führungsrohr eine hohe Transporteffizienz aufweist.

3.4 Diagnostiken

Die Diagnostiken sind ein entscheidender Teil für die Versuchsdurchführung und Auswertung. Ohne entsprechende Messeinrichtungen können keine Bewertungen der Versuche angestellt werden. Zudem müssen die Messgeräte für den entsprechenden Betriebszustand des Versuchsaufbaus geeignet sein. Nur so können verwertbare Ergebnisse erzielt werden. Der Aufbau enthält mehrere Diagnostiken zum Aufzeichnen von Geschwindigkeit, Pelletzustand, Schusswinkel und Gasmenge. Dabei ist zu bemerken, dass verschiedene Diagnostiken doppelt vorhanden sind, jeweils vor und nach dem Führungsrohr. Nur so kann eine Charakterisierung des Gesamtsystems erfolgen.

3.4.1 Lichtschranken

Die Lichtschranken erfüllen zwei Funktionen. Einmal dienen sie zur Geschwindigkeitsmessung, zum anderen als Auslöser für die Kameras. Zur Messung der Geschwindigkeit sind jeweils zwei Lichtschranken nach der Beschleunigung

nigungsstrecke und nach dem Führungsrohr angebracht. Jedes Paar ist in einem festen Abstand zueinander angeordnet und sie stehen in Flugrichtung des Pellets hintereinander. So kann aus der Flugzeit des Pellets und dem räumlichen Abstand die Geschwindigkeit bestimmt werden. Dabei ist zu bemerken, dass ein geringer räumlicher Abstand der Lichtschranken eine genauere Information über die momentane Pelletgeschwindigkeit liefert, da die Änderung der Geschwindigkeit auf kurzer Strecke geringer ist. Auf den Auslösevorgang der Kameras wird später eingegangen.

Eine Lichtschranke besteht aus einer Senderdiode und einer Empfängerdiode. Die Senderdiode dient als Lichtquelle und ist als LED ausgeführt. Die Empfängerdiode ist eine Photozelle. Diese fängt das Lichtsignal der LED auf und lässt eine festgelegte Spannung durch. Befindet sich nun ein Pellet zwischen Sender und Empfänger, so nimmt die Lichtintensität an der Empfängerdiode ab. Dadurch reduziert sich der elektrische Leitwert der Photozelle und die Ausgangsspannung ändert sich. Diese Abweichung ist das Ausgangssignal der Lichtschranke. Aus der Funktionsweise geht hervor, dass sowohl Sender als auch Empfänger eine externe Spannungsversorgung benötigen. Dafür ist jede Lichtschranke an eine 15V Gleichspannungsquelle angeschlossen.

Wie schon erwähnt befinden sich jeweils ein Paar Lichtschranken nach der Beschleunigungsstrecke und nach dem Führungsrohr. Das erste Paar ist fest in der Blower Gun verbaut. Für diesen Zweck ist eine Freiflugstrecke zwischen der Beschleunigungsstrecke und dem Schussrohr vorgesehen. Auf diesem Abschnitt wird das Pellet nicht durch ein Rohr geführt sondern fliegt frei durch das Vakuum des Expansionsgefäßes. Dadurch kann das Pellet die Lichtschranken passieren. Der Abstand der Lichtschranken beträgt an dieser Stelle 37mm. Das zweite Paar Lichtschranken befindet sich nach dem Führungsrohr. Dafür ist zwischen Führungsrohr und Zielgefäß ein kurzes Rohr aus Acrylglas eingebaut. Es hat einen äußeren Durchmesser von 12mm, eine Wandstärke von 2mm und eine Länge von 300mm. Um dieses spezielle Rohr befinden sich zwei Anordnungen aus jeweils fünf Lichtschranken. Diese sind

radial um das Rohr angeordnet. Somit kann sichergestellt werden, dass jede der zwei Anordnungen das Pellet im Plexiglasrohr registriert und ein Signal ausgibt. Der Abstand beider Anordnungen beträgt 193mm.



Abbildung 3.9: Die zwei Anordnungen der jeweils fünf Lichtschranken um das Plexiglasrohr nach dem Führungsrohr

3.4.2 Shadowgraphy

Als Shadowgraphy wird ein Bild bezeichnet, welches nur den Schatten eines Objekts enthält, welcher durch Gegenlicht erzeugt wird. Folglich sind nur die Umrisse erkennbar (vgl. Abbildung 2.8 links). Die Shadowgraphy wird in der Blower Gun eingesetzt um Bilder von den Pellets im Flug zu machen. Der Vorteil des Schattenbildverfahrens ist in diesem Fall die sehr kurze Belichtungszeit. Da sich das Pellet mit hoher Geschwindigkeit bewegt, muss die Belichtungszeit deutlich kürzer sein, als die Zeit, in der sich das Pellet signifikant bewegt, da es sonst zu Bewegungsunschärfe kommt. Deshalb muss die Beleuchtung sehr stark sein, um noch ein erkennbares Bild zu erzeugen. Der Nachteil der Shadowgraphy ist, dass nur der Umriss des Pellets aufgenommen wird. Kontur und Oberflächenbeschaffenheit bleiben verborgen. Diese Attribute sind jedoch nicht von großer Bedeutung für die Leistungsfähigkeit des Injektionssystems.

Von jedem Pellet werden zwei Schattenbilder aufgenommen. Eines nach der Beschleunigungsstrecke und eines nach dem Führungsrohr. Dafür wird jeweils eine CCD-Kamera vom Typ PCO Pixelfly 200XS verwendet. Diese zeichnet sich durch sehr kurze Belichtungszeiten aus. Jede Kamera ist mit einem Objektiv ausgestattet, mit dem der Zoom fließend verstellbar ist. Das Gegenlicht wird durch einen Laser erzeugt. Die Wellenlänge des Laserlichts liegt bei 910nm und damit im nicht sichtbaren Infrarotbereich. Auf dem Schattenbild wird das Laserlicht weis dargestellt.

Kamera und Laser müssen gegenüber angeordnet sein. An der Blower Gun befinden sich beide Komponenten auf Höhe der Freiflugstrecke im Expansionsgefäß. Die zweite Shadowgraphy ist an einem Doppelkreuzstück zwischen dem Plexiglasrohr und dem Zielgefäß aufgehängt. Der Auslösevorgang für den Laser und die Kamera muss zwei Ansprüchen genügen. Laser und Kamera müssen aktiviert werden, wenn sich das Pellet zwischen den beiden Komponenten befindet und der Zeitpunkt der Auslösung muss für alle Pelletgeschwindigkeiten zum richtigen Zeitpunkt erfolgen. Um dies zu erreichen, werden die Lichtschranken als Trigger verwendet. Wird die erste Lichtschranke ausgelöst, wird ein Zähler gestartet. Beim Signal der zweiten Lichtschranke zählt der Zähler mit doppelter Zählrate vom erreichten Wert rückwärts. Zudem aktiviert dieses Signal den Laser. Steht der Zähler bei Null, so wird ein Signal an den Steuercomputer der Kameras gesendet. Dieser aktiviert dann die entsprechende Kamera und zeichnet das Bild auf.

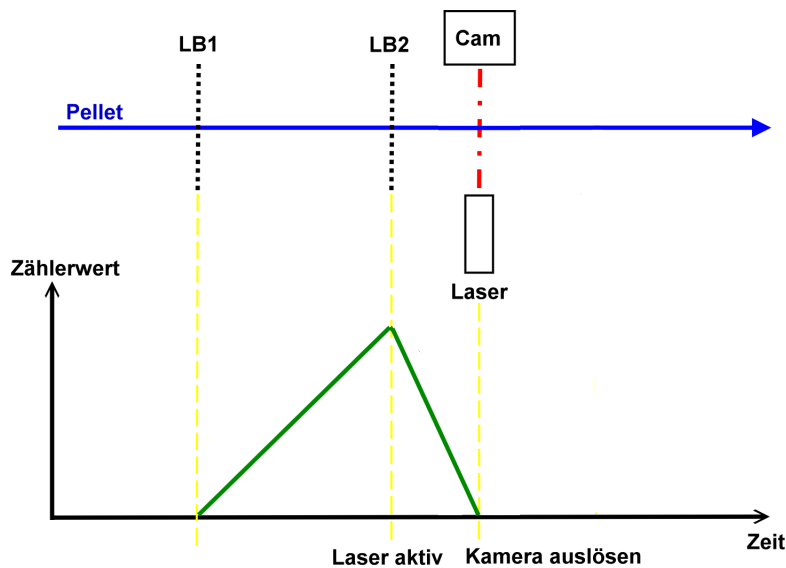


Abbildung 3.10: Ansteuerung der Shadowgraphy

Diese Steuerung setzt voraus, dass der Abstand zwischen der ersten und der zweiten Lichtschranke doppelt so groß ist, wie der Abstand zwischen der zweiten Lichtschranke und der Kamera. Ist dies der Fall, so befindet sich das Pellet immer zwischen Laser und Kamera, wenn diese ausgelöst werden, unabhängig von der Pelletgeschwindigkeit. Bei hoher Geschwindigkeit ist der Gradient der grünen Geraden klein, bei geringer Geschwindigkeit groß, aber die Schnittpunkte mit der Zeit-Achse bleiben unverändert. Dies setzt jedoch eine konstante Pelletgeschwindigkeit zwischen der ersten Lichtschranke und der Kamera voraus.

3.4.3 Drucksensoren

Die Drucksensoren werden benötigt, um das Vakuum im Versuchsaufbau zu überwachen und den Treibgaspuls zu messen. Da in verschiedenen Abschnitten des Versuchsaufbaus unterschiedliche Gaseinträge vorliegen, sind Messpunkte an mehreren Stellen nötig, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen. Zudem liegen durch den Gaseintrag große Druckdifferenzen vor. Aus diesen Gründen werden an drei Messpunkten je zwei Drucksensoren einge-

setzt. Der erste Messpunkt liegt am Extrusionsbehälter. Hier ist ein Gaseintrag durch die Eisextrusion und das Treibgas zu erwarten. Daher kann von großen Druckschwankungen ausgegangen werden. Deswegen werden hier zwei Druckmessgeräte eingesetzt. Eines ist vom Typ Pfeiffer CPT 100. Dieses Messgerät ist ein piezoelektrischer Drucksensor. Die Druckbeaufschlagung verformt einen Kristall und damit auch die kristalline Gitterstruktur. Dadurch kommt es zu einer Ladungsverschiebung, welche zu einer messbaren elektrischen Spannung führt. Die Spannung ist proportional zur Verformung des Kristalls und damit näherungsweise proportional zur Druckkraft. Diese Messtechnik zeichnet sich durch ihre Robustheit und hohe Genauigkeit in einem großen Druckbereich aus. Es ist jedoch ein Mindestdruck notwendig um den Kristall zu verformen. Daher liefert der Piezosensor oberhalb eines Druckes von 1mbar eine Genauigkeit von $\pm 0,5\%$ [31]. Bei geringerem Druck nimmt der Fehler zu. Aus diesem Grund wird ein zweites Druckmessgerät eingesetzt. Dieses ist eine Piranisonde vom Typ Pfeiffer HPT 100. Das Funktionsprinzip basiert auf der druckabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Gasen. Dabei gibt ein stromdurchflossener Draht Wärme an ein umgebendes Gas ab. Je nach Wärmeleitfähigkeit des Gases ändert sich der Wärmestrom und damit die Temperatur des Drahtes und dessen elektrischer Widerstand. Somit ist der Spannungsabfall am Draht proportional zur Wärmeleitfähigkeit des Gases. Da die Wärmeleitfähigkeit oberhalb von 1mbar näherungsweise konstant ist, erzielt dieses Messverfahren erst bei geringeren Drücken eine hohe Genauigkeit. Der hier verwendete Sensor erreicht in einem Druckbereich von 1mbar bis $1 * 10^{-7}\text{mbar}$ eine Genauigkeit von $\pm 10\%$ [32]. Somit kann durch den parallelen Einsatz beider Messverfahren ein Druckbereich vom Umgebungsdruck bis zum Hochvakuum mit ausreichender Genauigkeit abgedeckt werden.

Die zweite Messstelle liegt am Expansionsbehälter. Hier expandiert das Treibgas nach der Beschleunigungsstrecke, bevor es in das Schussrohr gelangen kann. Daher sind auch im Expansionsbehälter große Druckschwankungen zu

erwarten. Folglich wird für diese Messstelle dieselbe Kombination aus Piezo- und Piranimessgeräten eingesetzt. Die dritte Messstelle befindet sich am Ende des Führungsrohres. Hier sind geringe Mengen Treibgas zu erwarten. Der größte Teil des Gaseintrags erfolgt durch sublimiertes Material der Pellets. Daher kommt es an dieser Stelle nicht zu massiven Druckanstiegen und es müssen entsprechend sensible Messgeräte eingesetzt werden. Zur Messung höherer Drücke wird eine Pirani-Messröhre vom Typ Pfeiffer TPR 018 verwendet. Diese hat einen Messbereich von 1bar bis $8 \cdot 10^{-4}\text{mbar}$ [33]. Geringere Drücke werden durch eine Kaltkathoden-Messröhre vom Typ IKR 050 erfasst. Bei diesem Messverfahren werden Elektronen von einer zylindrischen Kathode zu einer koaxialen zylindrischen Anode mittels Hochspannung geschossen. Auf dem Weg zur Anode ionisieren die Elektronen das Gas zwischen Kathode und Anode. Das führt zu Gasentladungen und einem messbaren Gasentladungsstrom, welcher proportional zur Teilchenzahl des Gases und damit proportional zum Druck ist, insofern die Gastemperatur konstant ist. Bei einer geradlinigen Bewegung der Elektronen werden, bei geringen Drücken, nur wenige Gasteilchen ionisiert. Daher wird ein starkes Magnetfeld angelegt, welches die Elektronen auf Spiralbahnen zwingt und damit deren Weg durch das Gas verlängert. Dadurch können Drücke von $5 \cdot 10^{-3}\text{mbar}$ bis $2 \cdot 10^{-9}\text{mbar}$ [34] registriert werden.

3.4.4 Winkelbestimmung

Zur Bestimmung des Austrittswinkels eines Pellets nach dem Führungsrohr wird eine Vorrichtung in das Zielgefäß eingesetzt, auf der eine Rolle mit dünnem Papier sitzt. Das Papier wird über die Vorrichtung gespannt und in einer zweiten Rolle befestigt. Die gesamte Konstruktion ist an einem Vakuumflansch aufgehängt. Eine Handkurbel auf der Druckseite des Flansches ermöglicht das Drehen der ersten Rolle und damit das Verschieben des Papiers. Dieser Papiervorschub wird so in das Zielgefäß eingesetzt, dass der Papierstreifen senkrecht zur Flugbahn der Pellets steht. Ein zuvor ausgerichteter Laser, der auf den Austritt des Führungsrohres zielt, markiert den

ablenkungsfreien Auftreffpunkt des Pellets auf dem Papier. Um eine Streuung oder Brechung des Lasers zu vermeiden, wird der Glasflansch am Zielgefäß gegenüber des Führungsrohres für die Justierung entfernt. Nach erfolgreicher Einstellung des Papiervorschubs wird das Zielgefäß geschlossen und abgepumpt. Während des Schusses durchfliegen die Pellets das Zielgefäß und durchschlagen das Papier. Dabei hinterlassen sie sichtbare Löcher.

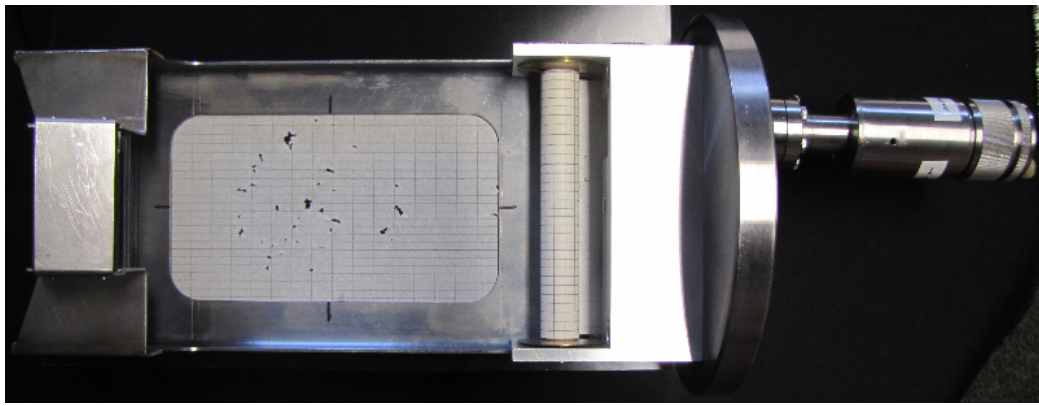


Abbildung 3.11: Papiervorschub mit Einschusslöchern

Aus dem Abstand dieser Löcher zum ablenkungsfreien Auftreffpunkt a und der Strecke zwischen dem Ende des Führungsrohres und dem Papier b wird der Austrittswinkel der Pellets bestimmt.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{a}{b}\right) \quad (3.6)$$

Um eine Aussage über den Streuwinkel des Führungsrohres machen zu können, muss jede Ablekung des Pellets nach dem Führungsrohr ausgeschlossen werden. Daher wird für diesen Versuch das Plexiglasrohr mit den Lichtschranken und das kleine Doppelkreuzstück mit der Shadowgraphy entfernt. So mündet das Führungsrohr direkt in das Zielgefäß. Daraus ergibt sich eine Strecke $b = 221\text{mm}$. Die Bestimmung der Strecke a wird im Kapitel *Auswertung* näher erläutert.

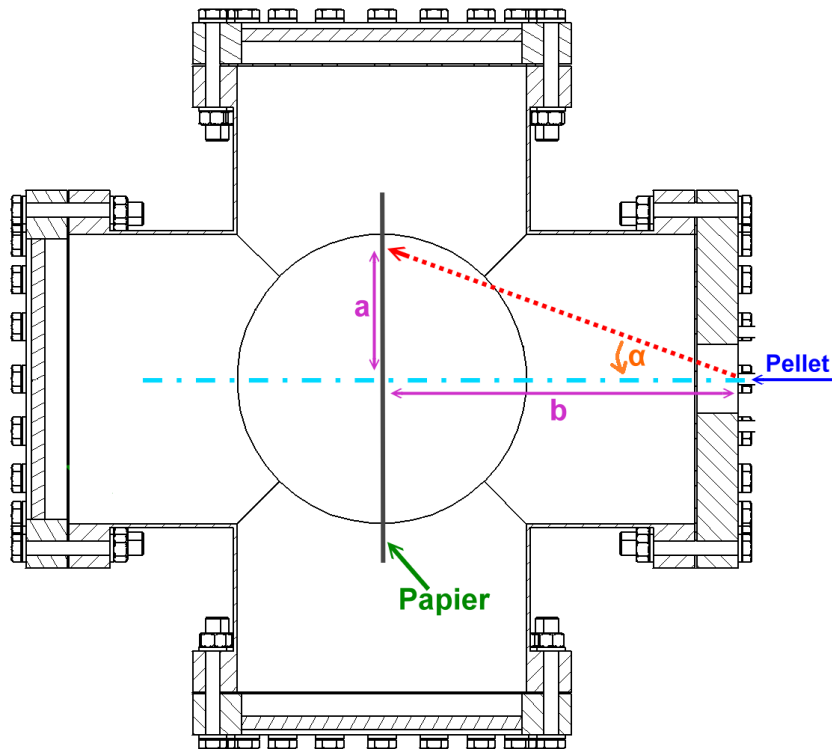


Abbildung 3.12: Off-axis Winkel α der Pellets nach dem Führungsrohr

3.4.5 Oszilloskop

Die eingesetzten Oszilloskope dienen der Aufnahme verschiedener Signale von den Diagnostiken und der Blower Gun. Die Signale werden dann graphisch dargestellt. Dies gestattet eine sofortige Analyse und lässt Fehler erkennen. Zudem lassen sich die Signalverläufe abspeichern um sie später genauer auswerten zu können. Für die Versuche an der Blower Gun werden zwei verschiedenen Oszilloskope verwendet. Eines ist vom Typ LeCroy Waverunner 104Xi-A. Dieses zeichnet sich durch seine hohe Abtastrate von 1GHz aus. Daher ist es besonders zur Aufzeichnung von kurzen Pulsen geeignet. Aus diesem Grund wird das Oszilloskop für die Aufnahme der Lichtschrankensignale verwendet. Das Pellet unterbricht eine Lichtschranke, wegen seiner Größe, nur sehr kurz, abhängig von der Pelletgeschwindigkeit. Alle vier Lichtschranken sind an dieses Oszilloskop angeschlossen.

Das zweite Oszilloskop ist vom Typ Yokogawa DL750P. Die Besonderheit dieses Gerätes sind die 18 Eingangskanäle. Daher wird es verwendet um die Steuersignale der Blower Gun aufzuzeichnen. Diese sind das Signal für den Schrittmotor, die Signale für die Elektromagneten des Hackers, die Lichtschranken des Hackers und die Steuersignale für die schnellen Treibgasventile. Somit lässt sich der gesamte Beschleunigungsmechanismus überwachen. Dies ist wichtig um zu gewährleisten, dass alle Komponenten, entsprechend ihrer Reihenfolge im Ablauf, zur richtigen Zeit mit der korrekten Pulslänge angesteuert werden.

3.4.6 Temperaturmessung

Die Temperatur wird an drei Messpunkten in der Blower Gun gemessen, am Extrusionskryostat, am Vorratskryostat und am Hacker. Diese sind die drei Komponenten bei denen die Temperatur eine kritische Größe ist. Für die Messung wird jeweils eine Silizium-Diode verwendet, die auf das jeweilige Bauteil aufgelötet ist. Das Prinzip der Silizium-Diode basiert auf der Temperaturabhängigkeit des Silizium-Halbleiters. Die Durchlassspannung des Halbleiters ändert sich proportional zur Temperaturänderung. Diese Gesetzmäßigkeit gilt bis zu Temperaturen um 1K. Daher ist die Diode das geeignete Mittel zur Bestimmung der Temperatur der Bauteile, die mit Helium gekühlt werden. Allerdings konnten die Temperatursensoren nicht kalibriert werden, weil dafür große Teile des Injektors hätten demontiert werden müssen.

3.4.7 Durchflussmessung

An der Blower Gun wird der Massenstrom des Heliums gemessen, welches zur Kühlung des Extrusionskryostaten und des Vorratskryostaten aufgewendet wird. Diese Werte sind Systemparameter, die für den Betrieb des Injektor von Bedeutung sind, hinsichtlich Kosten und benötigter Infrastruktur. Obwohl das Helium an den Kryostaten verdampft, muss dennoch sichergestellt werden, dass kein flüssiges Helium in die Messgeräte und die Abgasleitung

gelangt. Deshalb wird das Helium nach dem Durchlaufen der Kryostaten aufgeheizt. Das Gas wird durch zwei thermische Durchflussmessgeräte geleitet, jeweils eines für das Helium aus dem Extrusionskryostaten und dem Vorratskryostaten. Die Durchflussmessgeräte sind vom Typ Bronkenhorst F-113-EA. Hier wird die Strömung durch Kanäle mit kleinem Durchmesser geleitet. Dadurch wird die Strömung laminarisiert. Danach wird ein Teil des Gases in einen Bypass abgezweigt und die Gastemperatur gemessen. Im Anschluss wird das Gas erwärmt und die Temperatur wird nochmals bestimmt. Die Temperaturdifferenz ist direkt proportional zum Massenstrom. Dieses Messverfahren ist für das Prozessgas geeignet und zeichnet sich durch seine hohe Genauigkeit von unter 0,5% [37] aus.

3.4.8 Quadropol-Massenspektrometer

Das Massenspektrometer wird einerseits dazu verwendet, das Vakuum zu überwachen, andererseits dient es zur Analyse von Gaseinträgen. Das Spektrometer vom Typ Spectra ist im Expansionstank eingebaut, welcher sich nach dem Zielgefäß befindet. Grund dafür ist, dass in diesem Tank mit ausreichender Sicherheit keine festen Pelletfragmente mehr vorhanden sind. Somit besteht keine Gefahr einer Beschädigung des Messinstruments. Zudem ist der Druckanstieg durch das Pelletgas in diesem Tank nicht so hoch, wie direkt im Zielgefäß. Dies ist wichtig für die Funktionsfähigkeit des Massenspektrometers. Das Quadropol-Massenspektrometer arbeitet nach dem Prinzip der Ionisation. Dafür sind an der Spitze des Messkopfes zwei Filamente angebracht, die während des Betriebs glühen. Daher darf der Druck nicht zu hoch sein, da sonst die Filamente durchbrennen. An den Filamenten werden die Gase durch direkte thermische Ionisation und durch Stoßionisation mittels der Glühelektronen ionisiert. Danach werden die Gasionen in einem elektrischen Feld beschleunigt. Anschließend treten sie in ein elektrisches Wechselfeld ein, welches zwischen den Quadropol-Stäben anliegt. Durch dieses Wechselfeld können nur Ionen mit einem bestimmten Masse-Ladung-Verhältnis passieren. Ist dies der Fall, so trifft das Ion auf einen Messverstärker auf und wird

registriert. Durch Variation des Wechselfeldes kann nach vielen Verschiedenen Massen gescant werden.

3.5 Steuerung

Da die Blower Gun viele funktionale Elemente besitzt, die synchronisiert arbeiten müssen, werden besonders hohe Ansprüche an die Steuerungstechnik gestellt. Um diesen Anforderungen zu genügen, werden verschiedene Arten von Steuergeräten eingesetzt. Diese sind das SIMATIC WinCC7 System, die Module und die Bool-Prozessoren. Jedes dieser Geräte wird im Folgenden kurz vorgestellt.

3.5.1 SIMATIC S7 WinCC

Die SIMATIC S7 und WinCC von Siemens ist ein SCADA-System⁷ zur Automatisierung, welches zur Steuerung und Überwachung der Blower Gun eingesetzt wird. Der wichtigste Teil dieses Systems ist die Mensch-Maschinen Schnittstelle. Diese wird mit einem Touchscreen realisiert, auf dem ein interaktives Schema der Blower Gun dargestellt wird. Hier können Komponenten des Injektors angesteuert werden. Die Eingabe wird im System verarbeitet und in Signale umgewandelt, die über den integrierten D/A-Wandler an die Blower Gun gesendet werden. Dies vereinfacht die Bedienung erheblich, da mehrere Prozessschritte automatisch nacheinander ausgeführt werden. So wird die Eisproduktion, die Reinigung und das Zurücksetzen der Komponenten auf jeweils eine manuelle Eingabe reduziert. Zudem liefert das Kontrollprogramm den Status der einzelnen Prozessschritte und Komponenten. So können Störungen und deren Ursprung schnell erkannt werden. Ferner kann das System in ein bestehendes integriert werden. Damit kann man den Status von relevanten Komponenten abfragen, die nicht Bestandteil der Blower Gun sind, wie der Schieber am Reaktorgefäß. Umgekehrt können Informationen

⁷Supervisory control and data acquisition

vom Injektor an andere Leitstellen gesendet werden. Da WinCC als Steuerungsprogramm am Experiment W7-X eingesetzt wird, ist der Betrieb der Blower Gun mit diesem Programm unerlässlich, da so die Experimentleitung den Status des Injektors abfragen kann. Außerdem ermöglicht WinCC die

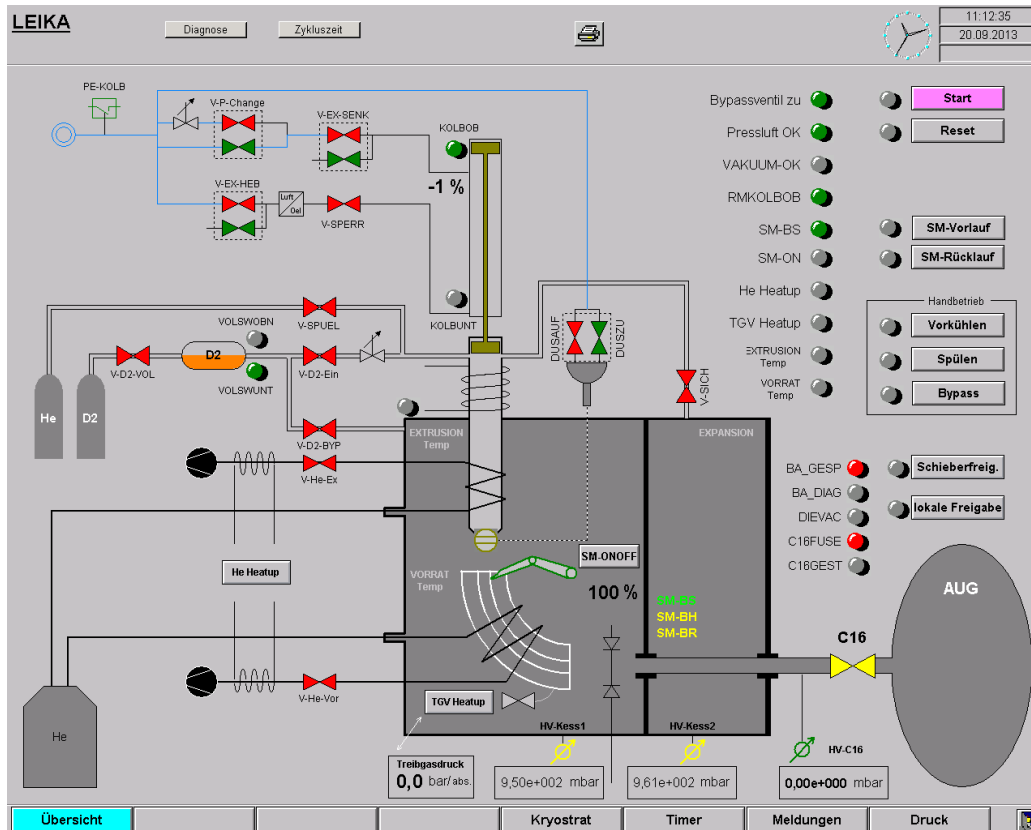


Abbildung 3.13: Anzeige des Blower Gun Kontrollsystems

Steuerung des Injektors, ohne in der Nähe der Maschine zu sein. Dies ist ein Vorteil hinsichtlich der Arbeitssicherheit. Steht der Injektor nahe des Reaktorgefäßes ist eine direkte Steuerung und Überwachung aus Strahlenschutzgründen unmöglich. Somit ist die Steuerung der Blower Gun mit WinCC die einzig praktikable Lösung.

Das System dient auch der Darstellung und Aufzeichnung verschiedener Messdaten der Anlage. Die Steuereinheit empfängt die Signale der Drucksensoren

oder der Lichtschranken und verarbeitet diese in Echtzeit. Die Ergebnisse werden direkt ausgegeben und archiviert. Dies erlaubt eine spätere Analyse des Verhaltens der Blower Gun. Zudem können die Daten automatisch auf einen Server hochgeladen werden um sie zu sichern oder für andere zugänglich zu machen.

3.5.2 Module

Neben der SIMATIC erfolgt die Steuerung der Blower Gun über analoge Module. Sie erzeugen die Signale für den Pelletschuss. Dafür müssen verschiedene Komponenten zur richtigen Zeit angesteuert werden. Zunächst wird die Anzahl der Pellets festgelegt. Außerdem muss die Wartezeit zwischen zwei Pellets entsprechend der gewünschten Pelletfrequenz eingestellt werden. Beide Parameter werden über einen Pulsgeber eingestellt. Dieser gibt das Startsignal für jeden Pelletschuss. Das Ausgangssignal des Pulsgebers dient als Startsignal für das Modul, welches den Schrittmotor am Vorratskryostaten ansteuert. Dieses Modul ist ebenfalls ein Pulsgeber, bei dem die Pulszahl und die Pulsdauer eingestellt werden können. Eine Pulsdauer von 1ms entspricht einem Vorschub des Eisstranges um 0,5mm. Für ein Pellet mit 2mm Länge werden demnach 4 Pulse eingestellt. Zudem aktiviert das Startsignal ein ODER-Modul, welches, entsprechend der aktuellen Lage des Hackers, die Elektromagneten und Treibgasventile ansteuert. Das Ausgangssignal des ODER-Moduls polt die Elektromagneten so um, dass einer den Hacker anzieht und der andere ihn abstößt. Um ein Zurückprallen des Hackers aus der Endlage zu verhindern, wird der anziehende Magnet noch ein zweites Mal aktiviert. Dies wird mittels Verzögerungsmodulen realisiert. Hier wird die Zeit eingestellt, die verstreichen muss, bis der Schrittmotor das Eis in den Hacker geschoben hat ($\Delta t_2/A$ oder $\Delta t_3/A$). Zudem muss die Pulsbreite eingestellt werden, in der die Elektromagneten aktiv sind ($\Delta t_{2a}/B$ oder $\Delta t_{3a}/B$). Für den zweiten Puls des anziehenden Magneten werden ebenfalls Verzögerungsmodule eingesetzt. Da alle Module auf das Startsignal des Pulsgebers reagieren, muss die Verzögerung des zweiten Pulses größer sein ($\Delta t_2/B$

oder $\Delta t_3/B$). Die Pulsdauer des zweiten Pulses ist gleich der ersten ($\Delta t_2b/B$ oder $\Delta t_3b/B$). Nach Abschluss des zweiten Pulses wird das entsprechende Treibgasventil aktiviert. Auch hier kommen Verzögerungsmodule zum Einsatz. Hier wird die Wartezeit vom Startsignal bis zum Abschluss der Hackerbewegung eingestellt ($\Delta t_4/A$ oder $\Delta t_5/A$), sowie die Pulsbreite ($\Delta t_4/B$ oder $\Delta t_5/B$), die die Öffnungszeit der Ventile bestimmt.

Diese Pulschette wird für jeden Zyklus wiederholt, bis die Anzahl Pulse des ersten Pulsgebers erreicht ist. Dabei wird vom ODER-Modul bestimmt, welche Module angesetzt werden müssen um den Hacker in die andere Endlage zu bewegen und um das richtige Treibgasventil zu öffnen (Δt_2 und Δt_4 oder Δt_3 und Δt_5). Zum besseren Verständnis ist die Pulschette in Abbildung 3.12 graphisch dargestellt. Ein Schaltplan der Module und ein Plan der Verkabelung der Module im Schaltschrank sind in Anhang C zu finden.

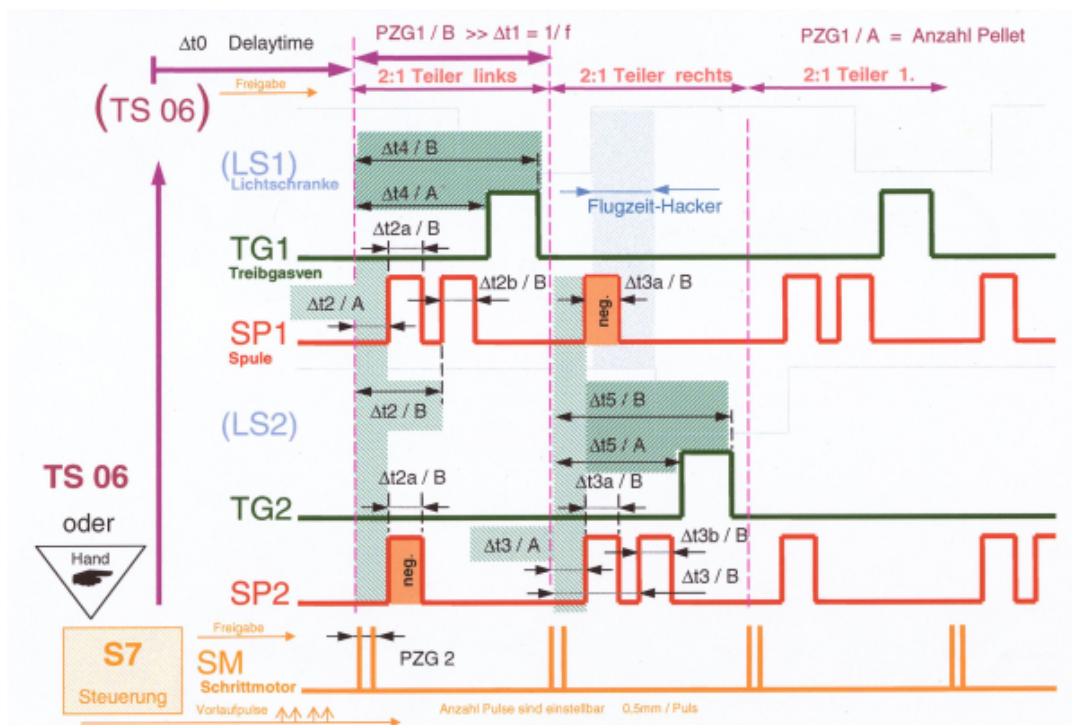


Abbildung 3.14: Pulschette der Module[38]

3.5.3 Bool-Prozessor

Der Bool-Prozessor ist die digitale Alternative zur Steuerung mit den analogen Modulen. Der Prozessor ist für besonders schnelle Schaltvorgänge ausgelegt, was für die Blower Gun mit Pelletfrequenzen von bis zu 143Hz[10] unabdingbar ist. Das eingesetzte Modul ist vom Typ Siemens SIMATIC S7 FM 352-5. Dies bietet den Vorteil, dass der Bool-Prozessor mit dem SIMATIC WinCC Kontrollsystem kommunizieren kann. Der Pelletschuss kann so durch eine Eingabe an WinCC ausgelöst werden und der Bool-Prozessor führt die Ablaufkette aus. Danach werden die Ausgangssignale analogisiert und an die Blower Gun übermittelt. Die CPU arbeitet unabhängig vom Kontrollsystem, es können jedoch die Ein- und Ausgangssignale abgefragt werden.

Die Programmierung erfolgt über ein STEP7-System. Hier wird die Ablaufkette durch Funktionsbausteine zusammengestellt. Diese Bausteine übernehmen dieselben Aufgaben, die auch von den analogen Modulen ausgeführt werden. Allerdings ist die Ablaufzeit des Programms von $1\mu\text{s}$ [39] erheblich kürzer als die Durchlaufzeit der Modulschaltung.

3.6 Aufbau im Labor

Der allgemeine Laboraufbau soll verdeutlichen, wie die einzelnen, zuvor beschriebenen Komponenten zusammenhängen. Zudem dient dies der Reproduzierbarkeit der Versuche. Ferner zeigt dies auch den Platzbedarf der Anlage auf und ermöglicht somit die Raumplanung für den Einsatz der Blower Gun an W7-X. Die Signalübertragung zwischen den Steuergeräten und der Blower Gun, sowie von den Sensoren zu den Messgeräten erfolgt über Koaxialkabel. Diese sind weitgehend unempfindlich gegen äußere Störungen und ermöglichen somit eine klare Übertragung. Ausgenommen davon sind die Kameras der Shadowgraphy. Diese sind mittels Ethernet-Kabeln an den Steuercomputer angebunden. Dies ist wegen der großen zu übertragenden Datenmenge erforderlich. Die Ethernet-Kabel sind vom Typ Cat-5. Bei diesen Kabeln sind

jeweils zwei Adern verdrillt und der gesamte Strang ist abgeschirmt. Dadurch ist eine störungsfreie Signalübertragung von der Kamera zum Computer weitgehend sicher.

Der Anschluss der Vakuumpumpen an das Abgassystem erfolgt über Wellschläuche vom Typ Pfeiffer Vacuum KF40. Das Helium, das für die Kühlung der Kryostaten verwendet wird, muss gesondert abgeleitet werden, da es wiederverwendet wird. Für den Betrieb der Blower Gun sind somit zwei getrennte Abgassysteme nötig.

Um die Blower Gun mit Strom zu versorgen, wird ein 16A-Drehstromanschluss und ein 220V-Wechselstromanschluss benötigt. Zudem muss eine Versorgung mit 8bar Druckluft bereit gestellt werden, um den Pneumatikzylinder des Extrusionskryostaten zu betreiben.

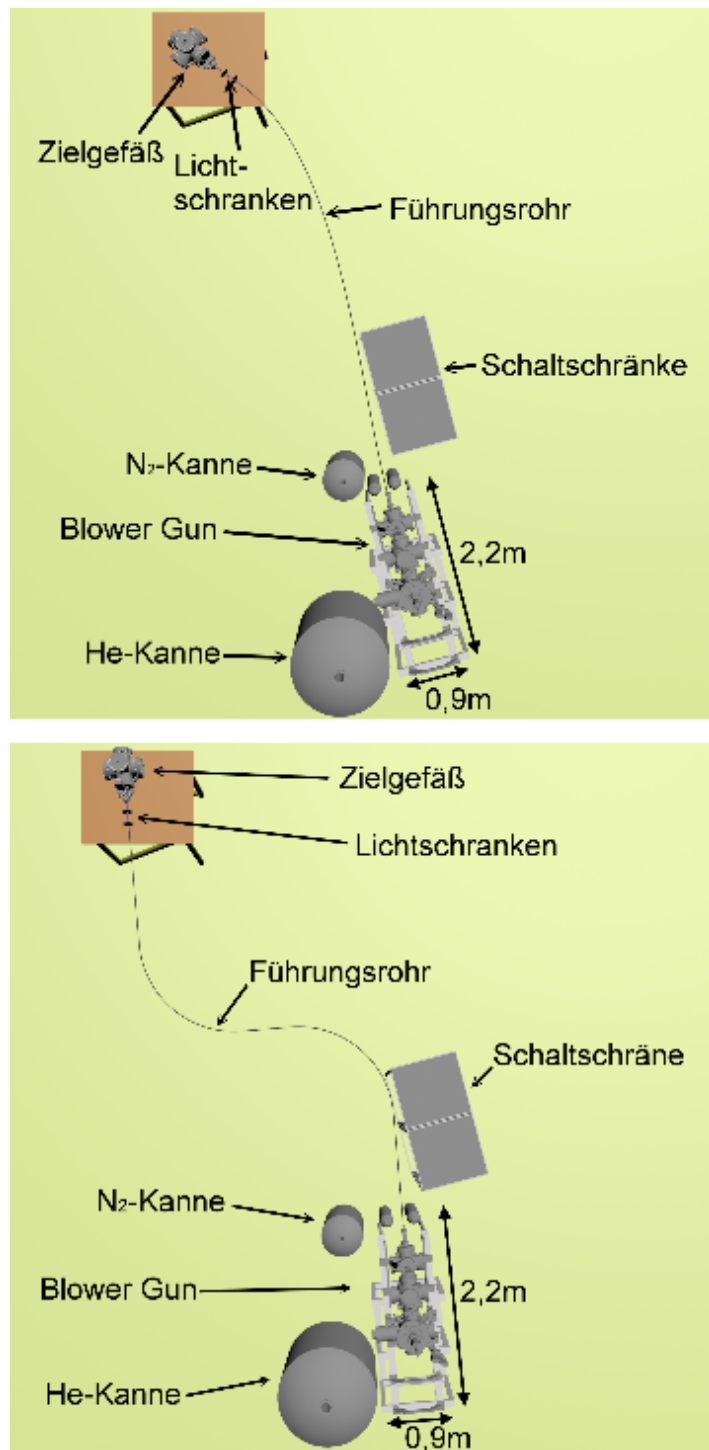


Abbildung 3.15: Laboraufbau mit verschiedenen Führungsrohren

Kapitel 4

Versuchsdurchführung

Zur Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse ist eine genau Beschreibung der Versuche notwendig. Nur so kann später die Belastbarkeit der Resultate überprüft werden. Zudem gestattet die Dokumentation der Versuchsdurchführung die Reproduktion jedes Einzelversuchs. Daher sollen im Folgenden die Abläufe und Versuchsparameter jedes Experiments dargelegt und erläutert werden.

4.1 Vorversuche

Die Vorversuche dienen zur Charakterisierung des Maschinenverhaltens außerhalb des eigentlichen Schussbetriebs. Durch diese Experimente wird ermittelt, welche Parameter eingestellt werden müssen um die Blower Gun in Betrieb nehmen zu können und wieviel Zeit und Kühlmittel dafür einzuplanen ist. Diese Informationen sind für den Operator der Blower Gun von Bedeutung, da dieser somit Kenntnis über die Vorbereitungszeit des Schusses erhält.

4.1.1 Standzeit von D_2/H_2 Eis im Vorratskryostaten

Dieser Versuch untersucht, wie lange man den Eisstrang im Vorratskryostaten lagern kann, bis dieser vollständig sublimiert ist. Zu diesem Zweck wurde der Hacker aus der Blower Gun entfernt, sodass der Austritt des Vor-

ratskryostaten frei lag und einsehbar war. Für die Versuche wurde jeweils ein Strang aus Deuterium und ein Strang aus Wasserstoff gefroren und in den Vorratskryostaten extrudiert. Die Extrusion des D_2 -Eises erfolgte bei einer Temperatur von etwa 4,8K im Extrusionskryostaten und 8K im Vorratskryostaten. Der Druck vor der Extrusion betrug $5,3 * 10^{-7} mbar$. Für das H_2 -Eis lagen die Temperaturen bei etwa 4,8K und 7,2K. Der Druck vor der Extrusion lag bei $6 * 10^{-7} mbar$. Die Stränge wurden danach so weit vorgeschoben, bis ein etwa 2cm langes Stück des Eisstranges aus dem Vorratskryostaten heraus ragte. Das frei im Vakuum stehende Eis wurde mittels einer Kamera beobachtet und die Bilder aufgezeichnet, bis das Eis vollständig sublimiert war.

4.1.2 Abkühlverhalten der Blower Gun

Zweck dieser Untersuchung ist die Bestimmung der Dauer bis die Blower Gun die nötigen Temperaturen erreicht, sodass man mit der Eisproduktion beginnen kann. Zudem kann so der Heliumdurchfluss optimiert werden, um den Verbrauch an flüssigem Helium zu reduzieren. Für das Experiment wurde die Blower Gun bis in den Bereich des Hochvakuums evakuiert. Die Dauer der Evakuierung hängt von der Gasart ab, welche zur Flutung der Blower Gun verwendet wird. Bei Stickstoff wird das Hochvakuum nach etwa 4 Stunden erreicht. Wird normale Umgebungsluft verwendet, dauert das Abpumpen ungefähr 24 Stunden. Nachdem das Hochvakuum hergestellt war, wurde der Heliumdurchfluss in den Kryostaten langsam erhöht. Die Temperaturen und Durchflüsse wurden in Intervallen von einer Minute aufgezeichnet. War keine Änderung der Temperatur mehr zu erkennen, wurde der entsprechende Heliumdurchfluss reduziert, bis sich wieder eine Temperaturänderung einstellte.

4.1.3 Hybrid-Eis

Um nachzuweisen, dass die Blower Gun in der Lage ist Pellets herzustellen, die aus mehreren Gasarten bestehen, wird der Injektor mit einer Gasmi-

schung versorgt, welche zu 50% aus Wasserstoff und 50% Deuterium besteht. Vor der Extrusion des Eises werden die Filamente des Quadrupol-Massenspektrometers aufgeheizt und ein Referenzscan der Restgase im Expansionstank durchgeführt. Anschließend wird das Eis bei einer Temperatur von 4,8K im Extrusionskryostaten und 8,8K im Vorratskryostaten extrudiert. Nach der Extrusion wurde ein weiterer Massenscan durchgeführt. Danach wurden die Filamente des Massenspektrometers abgeschaltet um sie vor dem Druckanstieg zu schützen. Sobald die Filamente eine gefahrlose Temperatur erreicht hatten, wurden fünf Pellets ohne Treibgas verschossen. Die Beschleunigung erfolgte durch den Rückstoß des abdampfenden Pelletmaterials. Nachdem der Transfer durch die Lichtschranken bestätigt wurde und der Druck im Expansionstank unter 10^{-6} mbar gesunken war, wurden die Filamente wieder aufgeheizt um einen dritten Scan durchzuführen und die Bestandteile der Pellets zu untersuchen.

4.2 Messung der Pelletgeschwindigkeiten, Volumina und Transferraten

Pelletgeschwindigkeit, Pelletvolumen und die Überlebensrate der Pellets sind die drei wichtigsten Charakteristika der Blower Gun und der Führungsrohre. Diese wurden für jedes Pellet beim Verlassen des Injektors und am Austritt des Führungsrohres bestimmt. Die Herstellung der Pellets erfolgte bei gleichbleibenden Bedingungen, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Die Charakterisierung des Injektionssystems lässt sich in vier Teiluntersuchungen gliedern.

Zunächst wurde die Blower Gun mit dem leicht gekrümmten Führungsrohr ausgestattet. Die Experimente wurden mit D_2 -Eis und He-Treibgas durchgeführt. Im Extrusionskryostaten herrschte eine konstante Temperatur von etwa 4,8K. Die Temperatur des Vorratskryostaten schwankte zwischen 8K und 11K. Die Hackertemperatur zeigte eine große Streuung von 120K bis

150K. Die Drücke lagen konstant im Bereich von $10^{-6}mbar$. Für die Erstellung des Kennfeldes wurde die Repetitionsrate schrittweise von 2Hz auf 50Hz erhöht, wobei eine Schrittweite von 2Hz festgelegt wurde. Für jede Repetitionsrate wurde der Treibgasdruck schrittweise von 2bar/abs auf 6bar/abs erhöht. Die Schrittweite betrug 1bar. Bei jeder Kombination aus Repetitionsrate und Treibgasdruck wurden zwei Eisstränge verschossen, aus denen jeweils 30 Pellets geschnitten wurden. Somit wurden insgesamt 7500 Pellets verschossen und hinsichtlich ihrer Geschwindigkeiten, Volumina und ihres Überlebens vor und nach dem Führungsrohr untersucht. Damit wurde nachgewiesen, dass die Blower Gun in dieser Konfiguration über einen längeren Zeitraum zuverlässig betrieben werden kann.

Im zweiten Abschnitt wurde das leicht gekrümmte Führungsrohr durch das doppelt gekrümmte (kritische) Führungsrohr ersetzt und mit D_2 -Eis und He-Treibgas untersucht. Dabei lag eine konstante Temperatur von etwa 4,8K im Extrusionskryostaten vor und die Temperatur des Vorratskryostaten schwankte zwischen 9K und 12K. Die Temperatur des Hackers lag zwischen 130K und 150K. Der Druck im Extrusionsgefäß lag im Bereich von $10^{-6}mbar$ und im Expansionsgefäß bei $10^{-7}mbar$. Der Druck im Zielgefäß betrug während des gesamten Versuchs konstant $2,6 * 10^{-6}mbar$. Die Repetitionsrate wurde von 2Hz auf 50Hz schrittweise erhöht. Aus den Erfahrungen der ersten Untersuchung wurde zwischen 10Hz und 50Hz die Schrittweite auf 5Hz erhöht. Der Treibgasdruck wurde von 1bar/abs auf 6bar/abs in Intervallen von 1bar erhöht. Für jeden Zustand wurden zwei Eisstränge verschossen. Da eine Pelletfrequenz von 10Hz für den Einsatz an W7-X am geeignetsten ist, wurde für diese Repetitionsrate bei jedem Treibgasdruck 10 Eisstränge verschossen um eine genauere Verteilung der Pelletparameter zu erhalten. Aus jedem Eisstrang wurden 30 Pellets geschnitten, womit in der Summe 6120 Pellets verschossen wurden.

Die dritte Teiluntersuchung wurde mit dem kritischen Führungsrohr und H_2 -Eis, sowie mit He-Treibgas durchgeführt. Die Temperatur in der Extrusion lag konstant bei 4,8K und im Vorratskryostaten zwischen 7K und 8,8K. Die Hackertemperatur schwankte zwischen 120K und 150K. Im Extrusionsgefäß lag ein Druck im Bereich von $10^{-6}mbar$ an und im Expansionsgefäß ein Druck von $10^{-7}mbar$. Der Druck im Zielgefäß betrug konstant $1,8 * 10^{-6}mbar$. Für die Repetitionsraten und Treibgasdrücke wurden die selben Bereiche und Intervalle gewählt, wie in der vorangegangenen Teiluntersuchung. Die Anzahl der Eisstränge und Pellets wurden ebenfalls identisch gewählt.

In der vierten Untersuchung wurde die H_2/D_2 -Gasmischung als Pelletgas verwendet, die zuvor für die Produktion von Hybridpellets zum Einsatz kam. Führungsrohr und Treibgas wurden beibehalten. In der Extrusion lag die Temperatur konstant bei 4,8K. Die Temperatur des Vorratskryostaten schwankte zwischen 6,9K und 8,2K. Der Hacker zeigte, wie zuvor, eine breite Streuung der Temperatur auf. Diese lag zwischen 114K und 155K. Der Druck im Extrusionsgefäß lag zwischen $1 * 10^{-6}mbar$ und $5 * 10^{-6}mbar$, im Expansionsgefäß zwischen $8 * 10^{-8}mbar$ und $1 * 10^{-7}mbar$ und im Zielgefäß konstant bei $1,4 * 10^{-6}mbar$. Resultierend aus den Erfahrungen der vorangegangenen Versuchsreihen wurden die Intervalle zwischen 10Hz und 50Hz auf 10Hz vergrößert. Zwischen 2Hz und 10Hz wurde die Schrittweite von 2Hz beibehalten. Die Treibgasdrücke wurden identisch gewählt, wie in den zwei vorherigen Untersuchungen. Die Anzahl der Eisstränge pro Zustand und die Anzahl der Pellets pro Strang wurden ebenfalls beibehalten. Somit wurden 4680 Hybridpellets für diese Untersuchung verschossen.

Für jeden Eisstrang wurden die Signale der vier Lichtschranken vor und nach dem Führungsrohr auf dem LeCroy Oszilloskop aufgezeichnet und als ASCII-Dateien abgespeichert. Dabei wurde die zeitliche Auflösung am Oszilloskop auf die Repetitionsrate abgestimmt. Die Textdateien enthalten Zeitschritte und die zugehörigen Amplituden der Lichtschrankensignale in tabellarischer

Form. Zudem wurden für jeden Strang die Bilderserien der beiden Schattenkameras gespeichert.

4.3 Austrittswinkel

Für die Bestimmung des Streuwinkels der Pellets bei dem Austritt aus dem Führungsrohr wurden Wasserstoffpellets verwendet, da diese für den Einsatz am Experiment W7-X relevanter sind. Als Treibgas wurde Helium verwendet. Während der Eisextrusion lag die Temperatur im Extrusionskryostaten bei 4,8K und im Vorratskryostaten zwischen 6,9K und 9,3K. Die Hackertemperatur schwankte im Bereich von 122K bis 145K. Die Drücke lagen zwischen $1 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$ und $4 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$ im Extrusionsgefäß bei $2 \cdot 10^{-7} \text{ mbar}$ im Expansionsgefäß und bei $6,5 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$ im Zielgefäß. Auffällig ist hier der deutlich höhere Druck im Zielgefäß im Vergleich zu den vorherigen Messreihen. Dies ist einerseits dem Papiervorschub geschuldet, dessen Druckerschwärze im Vakuum ausgast, andererseits dem ungünstigeren Anschluss an den Expansions-tank aufgrund der Positionierung des Zielgefäßes. Für die Repetitionsraten wurden 10Hz, 30Hz und 50Hz gewählt. Bei jeder Frequenz wurden Treibgasdrücke von 1bar/abs, 3bar/abs und 6bar/abs angelegt. Für jede Kombination aus Repetitionsrate und Treibgasdruck wurden zwei Eisstränge produziert aus denen jeweils 30 Pellets verschossen wurden. Bei jeder Änderung der Repetitionsrate oder des Treibgasdrucks wurde der Papierstreifen verschoben, sodass jeder Betriebszustand der Blower Gun ein eigenes Lochbild auf dem Papier hinterlässt.

Kapitel 5

Auswertung

In diesem Kapitel wird der Prozess der Datenanalyse beschrieben. Dies dient sowohl der Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse, als auch der Reproduzierbarkeit. Die Darstellung der Messverfahren und der mathematischen Modelle soll zudem auf mögliche Quellen für Ungenauigkeiten hinweisen.

5.1 Standzeit von D_2/H_2 -Eis im Vorratskryostaten

Zur Analyse der Sublimation des Eises wird der Radius des Eisstranges im Vakuum als Zielgröße gewählt. Dieser ist ein guter Indikator für die Standzeit des Eises und ist durch die Beobachtung leicht zu untersuchen. Die Aufzeichnung der Kamera wird in Einzelbilder zerlegt und mit einem Zeitstempel versehen. Das erste Bild wird so gewählt, dass der Eisstrang gerade seine endgültige Position erreicht hat. Dadurch beginnt auch die Zeitmessung erst, wenn der Eisstrang in Ruhe ist. Nach diesem Vorgang kann jedes Bild einem spezifischen Zeitpunkt zugeordnet werden. Die Aufnahmerate der Kamera beträgt 4 Bilder/min. Jedes zweite Bild wird bezüglich des Radius des Eisstranges untersucht. So wird eine zeitliche Auflösung von 30 Sekunden erreicht. Der Maßstab der Bilder beträgt 11 Pixel/mm. Der Radius und der zugehöriger Zeitpunkt werden zusammengestellt und graphisch aufbereitet.

5.2 Abkühlverhalten der Blower Gun

Die Daten bezüglich der Heliumdurchflüsse, der Temperaturen und der entsprechenden Zeitpunkte werden in Tabellenform gebracht. Da die erhobenen Informationen nicht weiter bearbeitet werden müssen, entstehen durch die Auswertung keine zusätzlichen Ungenauigkeiten. Lediglich eine unzureichende Kalibrierung der Messgeräte kann zu Abweichungen führen. Eine graphische Aufbereitung in Form zweier Diagramme schließt sich an.

5.3 Hybrid-Eis

Die Informationen des Quadropol-Messverstärkers werden seriell an einen Computer übertragen. Dort werden sie von einem Programm verarbeitet und graphisch ausgegeben. Dabei werden die Bestandteile nach ihrer Masse sortiert und ihr entsprechender Partialdruck wird als Balken dargestellt. Der Gesamtdruck im Expansionstank wird ebenfalls erfasst. Für die Untersuchung der Hybridpellets sind Massen von Interesse, die kleiner als 4amu sind. Ein entsprechender Messbereich wird im Programm eingestellt. Aus den Partialdrücken kann qualitativ bestimmt werden, ob sowohl Wasserstoff als auch Deuterium in den Pellets vorhanden war.

5.4 Auswertung von Pelletgeschwindigkeit, Volumen und Transferrate

Für die Auswertung werden die zuvor aufgezeichneten ASCII-Dateien und Bilderserien verwendet. Die Analyse dieser Rohdaten erfolgt mittels eines Programms, das speziell für diesen Zweck entwickelt wurde. Im Folgenden wird der Prozess, der im Programm abläuft im Einzelnen beleuchtet. Zunächst muss die Datenbank mit den idealen Schattenparametern geladen werden. Diese befinden sich in der *ShadowDatabase.txt* und sind für die Bayesian Analysis von großer Bedeutung. Hier befinden sich die idealen Werte für den

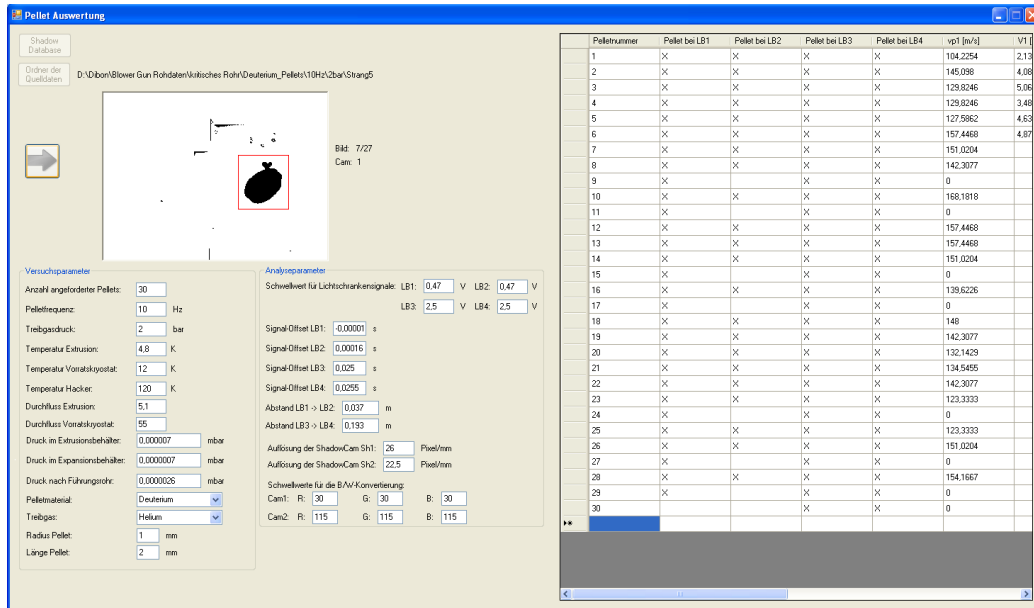


Abbildung 5.1: Programm zur Auswertung der Rohdaten

größten und kleinsten Schattendurchmesser, sowie die Schattenfläche für viele verschiedene Pelletlängen und Radii. Nach dem Laden werden die Priors berechnet. Ist dies abgeschlossen, können die Rohdaten geladen werden. Hierfür muss lediglich der Ordner angegeben werden, in dem sich die ASCII-Dateien und die Bilderserien befinden. Da die Rohdaten automatisch eingelesen werden, müssen sich die Bilderserien in Unterordnern namens *Sh1* und *Sh2* befinden, damit sie vom Programm gefunden werden können. Obwohl nur die Angabe der Pelletanzahl und der Pelletfrequenz für die Auswertung von Relevanz ist, wurden dennoch alle Versuchsparameter eingetragen. Die Analyseparameter wirken sich hingegen direkt auf das Ergebnis der Auswertung aus.

Ist die Vorbereitung abgeschlossen, wird die Analyse gestartet. Das Programm liest die ASCII-Dateien ein und speichert die Amplituden- und Zeitwerte intern ab. Danach wird nach den Peaks in den Amplituden gesucht. Dafür müssen die Schwellwerte und die Offsets der Signale richtig eingestellt sein. Das Programm untersucht einzelne Zeitabschnitte, die bei der jeweiligen Offset-Zeit beginnen und eine Länge von einem Pelletabstand, also $\frac{1}{f_P}$, ha-

ben. Überschreitet das Amplitudensignal den entsprechenden Schwellwert, so wird dieser Zeitpunkt gespeichert, das Pellet in einer Tabelle als *erkannt* vermerkt und zum nächsten Zeitintervall gesprungen. Fehler können hier auftreten, wenn verzögerte Pelletfragmente in das folgende Zeitintervall rutschen. Sind so alle vier Lichtschranken überprüft worden, werden die Pelletgeschwindigkeiten am ersten und am zweiten Paar Lichtschranken berechnet. Dazu werden die zuvor gespeicherten Zeiten paarweise voneinander subtrahiert und die zugehörigen Abstände der Lichtschranken durch diese Zeitdifferenzen geteilt. Die so gewonnen Pelletgeschwindigkeiten werden ebenfalls in der Tabelle eingetragen. Im Anschluss daran werden die Bilder der Schattenkameras nacheinander geladen und in 1-bit Schwarz-Weis-Bilder konvertiert. Dazu müssen die Schwellwerte für die RGB-Werte richtig eingestellt sein um keine Information zu verlieren. Nach der Umwandlung sucht ein Algorithmus das Bild nach dem Pellet ab. Ist der Pelletschatten gefunden, so wird der Bereich markiert. Die Bayesian Analysis wird anschließend nur auf diesem Bereich durchgeführt, was die Rechenzeit erheblich reduziert. Die Volumenrekonstruktion läuft nach dem Prinzip ab, welches in Kapitel 2.5 beschrieben ist. Es ist zu erwähnen, dass die Auflösung der Schattenkameras richtig eingestellt sein muss, damit die korrekten Volumina berechnet werden. Die Auflösungen wurden zuvor mit Schweißdrähten bekannter Größe bestimmt. Die gewonnen Volumina werden ebenfalls in der Tabelle abgelegt. Es wird zudem die Masse berechnet, wobei die durchschnittliche Dichte verwendet wird, wie sie in Anhang A aufgeführt ist. Ferner werden die Transfereffizienzen bestimmt, welche bezüglich des theoretischen Startvolumens berechnet wird.

$$\epsilon_{V1} = \frac{V_1}{V_0} (*100\%) \quad (5.1)$$

$$\epsilon_{V2} = \frac{V_2}{V_0} (*100\%) \quad (5.2)$$

Für die Transferrate werden die Lichtschrankensignale herangezogen. Die *Pellet erkannt* Werte werden durchgezählt und durch die Anzahl angeforderter Pellets geteilt.

$$\epsilon_{U1} = \frac{n_1}{n_0} (*100\%) \quad (5.3)$$

$$\epsilon_{U2} = \frac{n_2}{n_1} (*100\%) \quad (5.4)$$

Sind die Effizeinzen berechnet, so werden auch diese in der Tabelle hinterlegt. Abschließend wird für den kompletten Strang ein Datenblatt in Form einer Excel-Tabelle geschrieben und als *Result.xls* gespeichert. Dieses Datenblatt enthält die Versuchsparameter und die Werte aus der Tabelle.

5.5 Bestimmung des Austrittswinkels

Nachdem alle Eisstränge für diese Versuchsreihe verschossen wurden, wird das Zielgefäß belüftet und der Papiervorschub entnommen. Anschließend werden die Löcher auf ein Blatt mit konzentrischen Kreisen durchgezeichnet. Jeder Kreis repräsentiert einen Winkel. Das Zentrum der Kreise muss so positioniert werden, dass es deckungsgleich mit dem ablenkungsfreien Auftreffpunkt ist. Für jede Frequenz wird ein solches Blatt angefertigt. Der jeweilige Treibgasdruck wird durch die Farbe der durchgezeichneten Punkte kenntlich gemacht. Die Anzahl der Punkte, die zwischen zwei Kreisen liegen werden gezählt. So wird eine Häufigkeitsverteilung für jede Repetitionsrate und jeden Treibgasdruck erstellt. Es ist jedoch zu bemerken, dass diese Verteilung ein qualitatives Ergebnis darstellt. Da keine Aussage über die Anzahl der Pellets gemacht werden kann, die durch das selbe Loch im Papier geflogen sind, ist eine quantitative Aussage nicht möglich.

Kapitel 6

Resultate

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Versuche präsentiert und diskutiert. Dies gestattet die Wahl eines geeigneten Betriebsfensters, welches sowohl den Ansprüchen des Experiments genügt, als auch eine ausreichende Leistungsfähigkeit des Injektionssystems gewährleistet. Die Ergebnisse der Einzelversuche werden hier mit der entsprechenden theoretischen Grundlage verglichen. Dies gestattet einerseits die Übereinstimmung der Resultate zu überprüfen, andererseits können so die Theorien auf ihre Konsistenz bezüglich der Realität untersucht werden. Zuvor gemachte Annahmen in den Modellen können so bestätigt werden oder müssen entsprechend erweitert oder angepasst werden. Außerdem wird hier ein Vergleich zu vorangegangenen Untersuchungen von Dorner[10] und Jehl[11] gezogen. Dadurch kann die Leistungsfähigkeit der, an der Blower Gun gemachten Modifikationen bewertet werden. Ferner wird hier dargestellt, in welchem Umfang die Führungsrohrgeometrie für die Blower Gun geeignet ist. Obgleich das in dieser Arbeit untersuchte Führungsrohr lediglich ein Teil des W7-X Führungsrohrsystems ist, können die Ergebnisse dennoch zur Beurteilung dienen, inwiefern das Gesamtsystem zusammen mit der Blower Gun zur Pelletinjektion am Experiment geeignet ist.

Um die Übersichtlichkeit der Diagramme zu wahren, wird hier auf Fehlerbalken verzichtet. Die Fehlerrechnung befindet sich in Anhang D.

6.1 Standzeit von D_2/H_2 -Eis im Vorratskryostaten

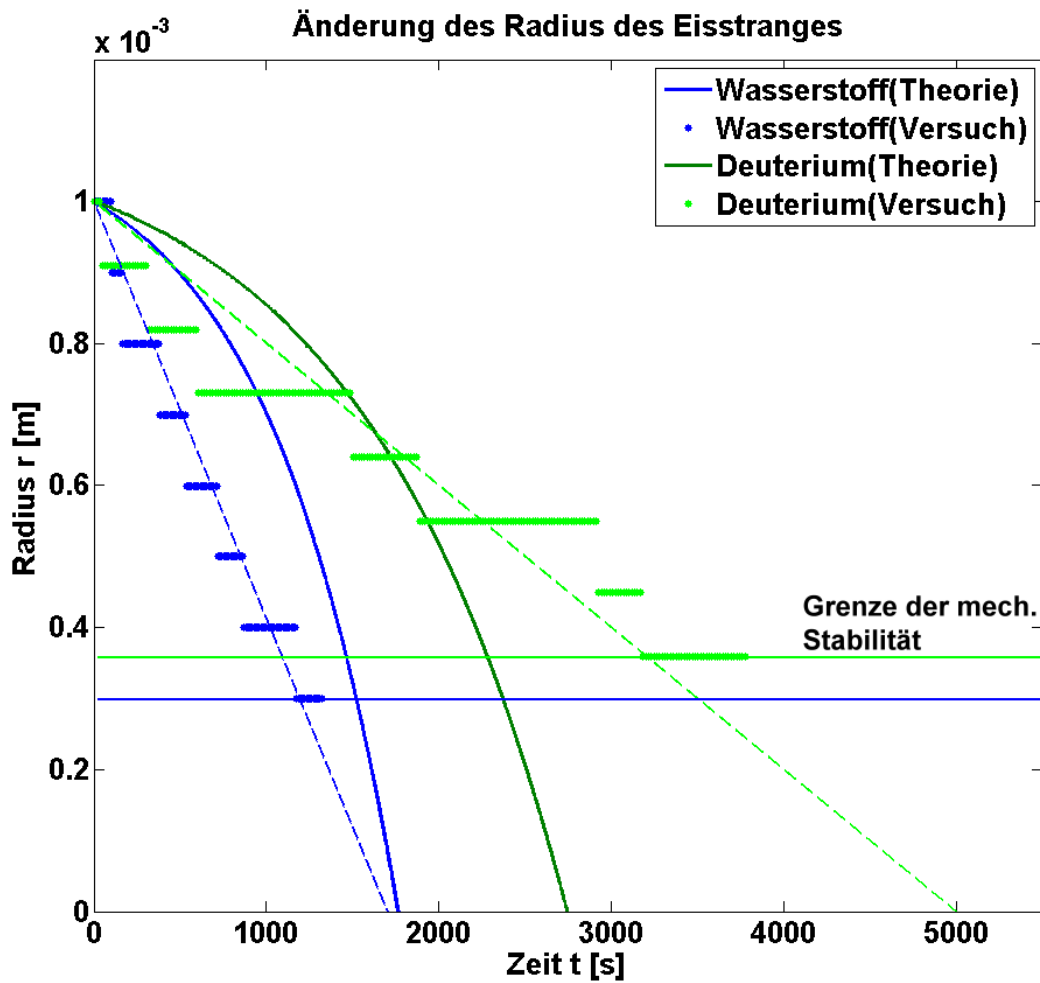


Abbildung 6.1: Sublimationszeit von D_2/H_2 -Eis im Vakuum

Die realen Verläufe der Änderung des Radius der Eisstränge ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Da die zur Auswertung verwendeten Bilder eine begrenzte Auflösung haben, kommt es zu diesem stufenförmigen Verlauf. Die Graphen haben keinen Nulldurchgang, sondern enden bei $r = 0,36\text{mm}$ für Deuterium und bei $r = 0,3\text{mm}$ für Wasserstoff. Dies ist darin begründet, dass der frei im Vakuum stehende Eisstrang abknickt und nicht länger aufgezeichnet wird. Es

wird deutlich, dass die Sublimation des Wasserstoff-Eises deutlich schneller abläuft, als die des Deuterium-Eises. Ausschlaggebend für dieses Verhalten ist die geringere Sublimationstemperatur des H_2 -Eises. Dieses Verhalten ist in Einklang mit der Theorie. Die exponentielle Abnahme des Radius, wie sie in (2.8) beschrieben ist, ist nicht zu erkennen. Sowohl für Wasserstoff, als auch für Deuterium trifft ein linearer Verlauf deutlich besser zu. Dies gestattet eine lineare Extrapolation mittels einer Ausgleichsgerade. Hieraus geht hervor, dass der Zeitpunkt für das vollständige Auflösen des H_2 -Eises gut mit dem analytischen Ergebnis überein stimmt. Für das D_2 -Eis weicht der Nulldurchgang der Gerade um 81% bezüglich des theoretischen Wertes ab. Durch eine manuelle Beobachtung des abgeknickten D_2 -Stranges konnte der Zeitpunkt der vollständigen Auflösung bei etwa 4130 Sekunden ermittelt werden. Dies legt den Schluss nahe, dass der Sublimationsprozess bei kleinen Radii schneller abläuft, was der theoretischen Grundlage entsprechen würde. Die manuelle Untersuchung des Wasserstoff-Eises ergab eine Zeit von etwa 1620 Sekunden, was sehr gut mit den Werten der Ausgleichsgerade und des analytischen Ergebnisses überein stimmt.

Aus den Versuchen mit den frei stehenden Eisstränge können Rückschlüsse auf das Verhalten im Vorratskryostaten gezogen werden. Im Unterschied zum Vakuum besteht im Vorrat ein direkter Kontakt vom Eis zum gekühlten Kryostatmaterial. Dies ermöglicht einen deutlich verbesserten Wärmetransport vom Eis. Zudem wird die Wärmeeinstrahlung erheblich reduziert. Generell ist der Verlauf der Sublimation gleich, verglichen mit dem Eis im Vakuum. Allerdings vollzieht sich der Prozess deutlich langsamer. Es ist zu erwarten, dass die Standzeit etwa doppelt so lang ist, verglichen mit dem frei stehenden Eis. Allerdings ist zu erwähnen, dass die Qualität des Eises mit der Zeit abnimmt. Obgleich der Radius des Stranges deutlich langsamer abnimmt, ist eine deutliche Veränderung der Eisfärbung zu erkennen. Unter einer rückwärtigen Beleuchtung durch einen Infrarotlaser wird das Eis auf dem Kamerabild mit der Zeit sichtbar dunkler. Es ist zu vermuten, dass sich

im Inneren des Eises kleine Gaskammern bilden. Diese können entstehen, wenn wenige Moleküle in den gasförmigen Zustand übergehen. Dadurch wird die Wärmeleitung lokal reduziert und mehr Eis in diesem Bereich sublimiert. Das IR-Licht wird an den Rändern dieser Kammern gestreut und das Eis wird dunkler dargestellt. Gaseinschlüsse reduzieren die effektive Fläche, die für die Bruchfestigkeit eine Rolle spielt. Daher ist es zu empfehlen, das Eis binnen weniger Minuten nach der Extrusion zu verschließen.

6.2 Abkühlverhalten der Blower Gun

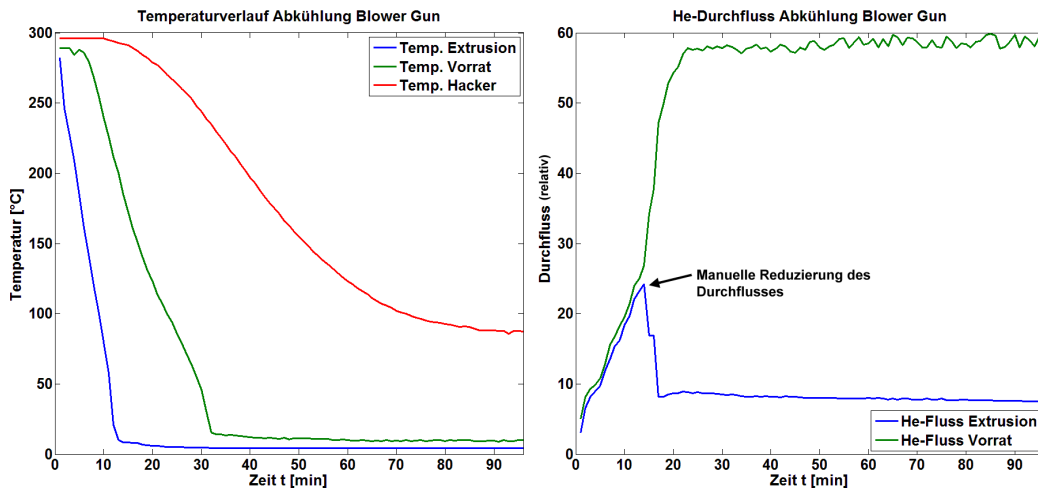


Abbildung 6.2: Verlauf der Temperaturen und Helium-Durchflüsse beim Abkühlen

Bei der Abkühlung der Blower Gun fällt auf, dass die einzelnen Komponenten sehr unterschiedliche Temperaturverläufe aufweisen. Der Extrusionskryostat erreicht nach etwa 13 Minuten die Siedetemperatur des Heliums. Der Vorratskryostat nimmt dagegen erst nach etwa 32 Minuten eine Grenztemperatur an, welche knapp über der Siedetemperatur liegt. Die längere Abkühlzeit liegt hier an der größeren Masse des Vorratskryostaten. Die Grenztemperatur wird durch die Leitung des Heliums durch den Kryostaten beschränkt, sowie durch die große Oberfläche, auf der Wärme eingestrahlt wird. Die Grenz-

temperatur des Hackers liegt deutlich höher als die der Kryostaten. Grund dafür ist die indirekte Kühlung dieses Elements. Der Hacker wird durch Kontakt zum Vorratskryostaten gekühlt. Die endliche Wärmeleitung dieses Kontakts beschränkt die Grenztemperatur auf etwa 80K. Beim Heliumdurchfluss wird deutlich, dass der maximale Durchfluss erst mit einer gewissen Verzögerung erreicht wird. Der Knick in der Kurve des Heliumflusses durch den Extrusionskryostaten nach 14 Minuten ist einer manuellen Reduzierung des Durchflusses geschuldet. Zu diesem Zeitpunkt ist keine weitere Abkühlung des Extrusionskryostaten möglich und der Durchfluss wird auf ein Maß reduziert, welches ausreicht die Grenztemperatur zu halten. Der Durchfluss durch den Vorratskryostaten erreicht nach etwa 22 Minuten sein Maximum. Eine Verringerung des Durchflusses nach Erreichen der Grenztemperatur führt zu einer sofortigen Erhöhung der Kryostattemperatur und darf daher nicht vorgenommen werden. Da die Durchflussmessgeräte nicht kalibriert sind, ist hier ein relativer Durchfluss angegeben.

6.3 Hybrid-Eis

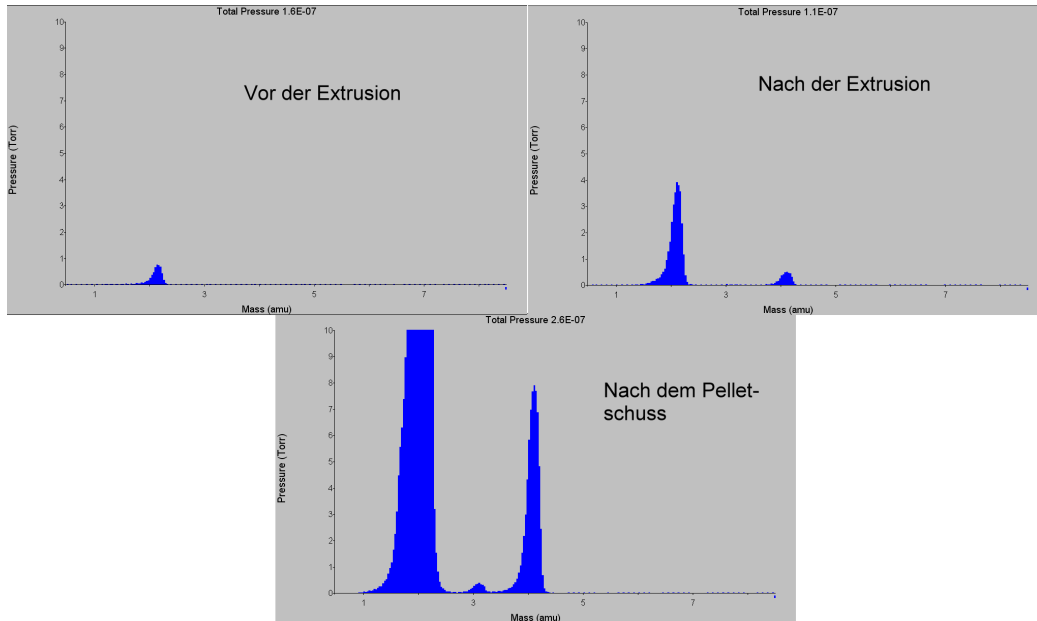


Abbildung 6.3: Ergebnisse des Massenspektrometers

Vor der Extrusion ist ein Wert von $1 \cdot 10^{-8} \text{Torr}$ bei einer Masse von 2amu zu erkennen. Dies ist molekularer Wasserstoff, der hauptsächlich aus dem Wasserdampf stammt. Der Dampf wird an den Filamenten durch Pyrolyse aufgespalten und der Wasserstoff wird als H_2 registriert. Eine Erweiterung des Messbereichs bis 32amu lässt den atomaren Sauerstoff bei 16amu, Wasserdampf bei 18amu und molekularen Sauerstoff bei 32amu erkennen.

Nach der Extrusion ist ein deutlicher Anstieg des Partialdrucks bei den Massen zwei und vier sichtbar. Hierbei ist festzustellen, dass der Partialdruck des Wasserstoffs mit $4 \cdot 10^{-8} \text{Torr}$ deutlich höher ausfällt, als bei Deuterium mit $0,5 \cdot 10^{-8} \text{Torr}$. Beide Komponenten sublimieren aus dem Eis und werden mittels molekularer Strömung durch das Führungsrohr und das Zielgefäß zum Massenspektrometer im Expansionstank transportiert. Der Grund für den höheren Partialdruck des Wasserstoffs ist, dass bei gleicher Temperatur der Dampfdruck des Wasserstoffs erheblich höher ist als der des Deuteriums.

Dadurch ist die Sublimationsrate des Wasserstoffs größer als die des Deuteriums, wodurch der höhere Partialdruck entsteht.

Nach dem Pelletschuss ist ein großes Inventar an Wasserstoff und Deuterium vorhanden. Die Partialdrücke liegen bei $15 \cdot 10^{-8} \text{Torr}$ für H_2 und $8 \cdot 10^{-8} \text{Torr}$ für D_2 . Da die Pellets bei dem Einschlag in das Zielgefäß sofort sublimieren, ist der Unterschied der Partialdrücke nicht mit dem unterschiedlichen Dampfdruck zu erklären. Grund hierfür ist die schlechtere Pumpwirkung für Wasserstoff. Da die Messung mit dem Massenspektrometer erst nach Erreichen eines Gesamtdruckes von unter 10^{-6}mbar möglich ist, ist schon ein gewisser Teil des Deuteriums abgepumpt, wohingegen der Wasserstoff größtenteils noch im Expansionstank verblieben ist. Daher ist zu diesem Zeitpunkt eine Differenz der Partialdrücke sichtbar, obwohl die Gasmischung zu gleichen Teilen aus beiden Gasen besteht. Der kleine Ausschlag bei 3amu ist auf Hybridmoleküle aus Wasserstoff und Deuterium zurückzuführen. Es ist festzustellen, dass sowohl Wasserstoff als auch Deuterium mit den Pellets transportiert wurde. Die Blower Gun ist folglich in der Lage Hybridpellets herzustellen und zu schießen. Für eine quantitative Analyse der Zusammensetzung ist das Quadropol-Massenspektrometer ungeeignet.

6.4 Pelletgeschwindigkeiten

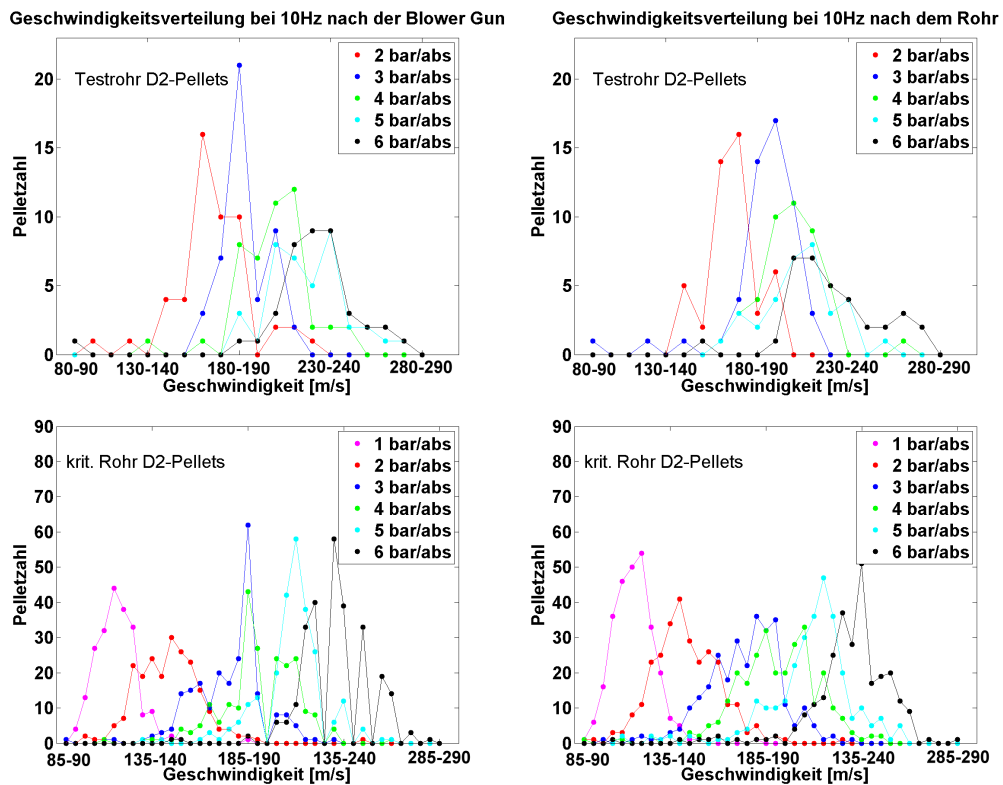


Abbildung 6.4: Pelletgeschwindigkeiten für D_2 -Eis mit dem Testrohr und dem kritischen Rohr

In Abbildung 6.4 und 6.5 sind die Anzahlen an Pellets, die in einem gewissen Bereich von Geschwindigkeiten liegen, für verschiedene Pelletmaterialien und Führungsrohrgeometrien jeweils vor und nach dem Führungsrohr aufgezeigt. Allgemein wird ersichtlich, dass die Pelletgeschwindigkeiten mit steigendem Treibgasdruck zunehmen, was erwartet war. Es wird auch deutlich, dass die Peaks bei den höheren Drücken enger beisammen liegen. Dies macht deutlich, dass eine weitere Erhöhung des Druckes nur sehr geringe Auswirkungen auf die Pelletgeschwindigkeiten haben würde.

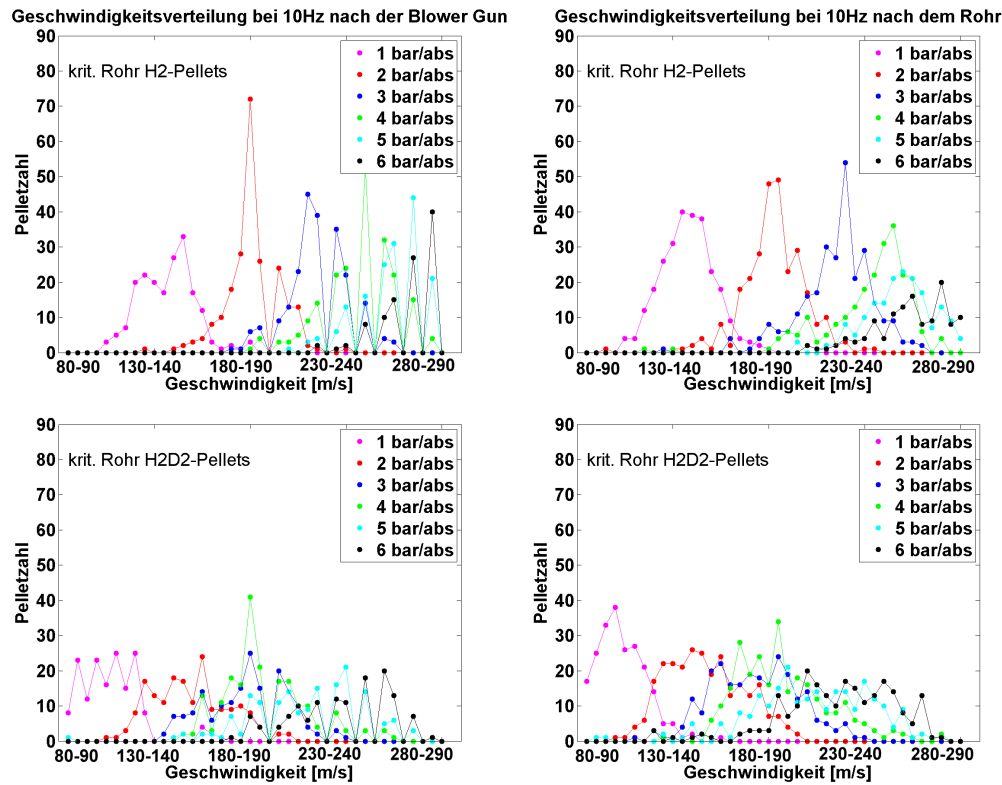


Abbildung 6.5: Pelletgeschwindigkeiten für H_2 -Eis und Hybrideis im kritischen Rohr

Ferner ist zu sehen, dass die Peaks nach dem Führungsrohr etwas breiter und flacher werden ohne dass sich die Peakgeschwindigkeiten signifikant ändern. Dies bedeutet, dass im Mittel fast kein Geschwindigkeitsverlust im Führungsrohr auftritt. Die Streuung der Geschwindigkeiten nimmt jedoch zu. Schon vor dem Rohr ist eine erhebliche Schwankung der Pelletgeschwindigkeit bei jedem Treibgasdruck zu erkennen. Grund dafür ist, dass jedes Pellet eine individuelle Form und damit einen anderen Widerstandswert in der Gasströmung aufweist. Dieses Verhalten zeigt sich für alle Pelletmaterialien und Führungsrohre. Der Vergleich zwischen den Führungsrohren zeigt nur bei 2bar Treibgasdruck eine Auffälligkeit. In diesem Zustand ist die Pelletgeschwindigkeit nach dem Testrohr deutlich höher als nach dem kritischen Führungsrohr. Da das selbe Verhalten schon vor dem Führungsrohr zu erkennen ist, kann der Effekt jedoch der geringen Anzahl an Messpunkten beim

Testrohr geschuldet sein. Der Vergleich zwischen Wasserstoff- und Deuteriumpellets zeigt eine deutlich höhere Pelletgeschwindigkeit der H_2 -Pellets. Dies liegt an der geringeren Dichte des Wasserstoffes und damit an der geringeren Masse des Pellets.

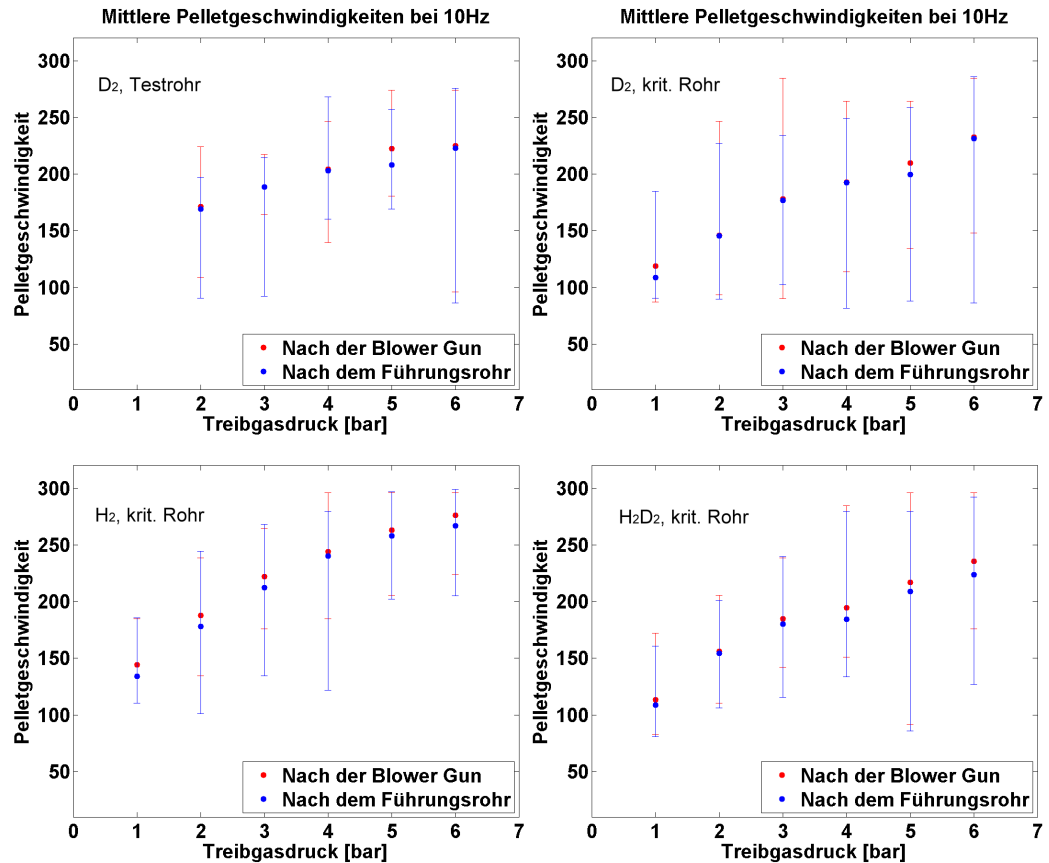


Abbildung 6.6: Mittlere Pelletgeschwindigkeiten

Das beobachtete Verhalten ist im Einklang mit der Theorie aus Kapitel 2.3. Die erwarteten Pelletgeschwindigkeiten werden ebenfalls erreicht. Anders als in der analytischen Betrachtung geschieht dies allerdings erst bei deutlich höheren Drücken. Die Pelletgeschwindigkeiten der Hybridpellets liegen zwischen denen der einzelnen Komponenten. Es ist jedoch auffällig, dass die Peaks deutlich flacher sind als im Falle der reinen Stoffe. Die Streuung der Geschwindigkeiten ist demnach größer. Eine Erklärung dieses Verhaltens ist, dass beide Gase nicht immer zu gleichen Teilen ausfrieren und die

Pellets dadurch unterschiedliche Massen haben. Die Streuung nimmt durch das Führungsrohr weiter zu, wobei im Mittel kein erkennbarer Geschwindigkeitsverlust auftritt. Die Unterschiedlichen Pelletgeschwindigkeiten in den zwei Beschleunigungsstrecken, wie sie in der Arbeit von Jehl[11] festgestellt wurden, konnte in dieser Versuchsreihe nicht beobachtet werden. Dieser Effekt tritt demnach nur bei Pellets geringerer Größe auf. Das Phänomen des "Gas Blocking", dass von Reich[40] nachgewiesen wurde, konnte für die Führungsrohre aufgrund der großen Streuung der Pelletgeschwindigkeiten nicht eindeutig belegt werden.

6.5 Transferrate

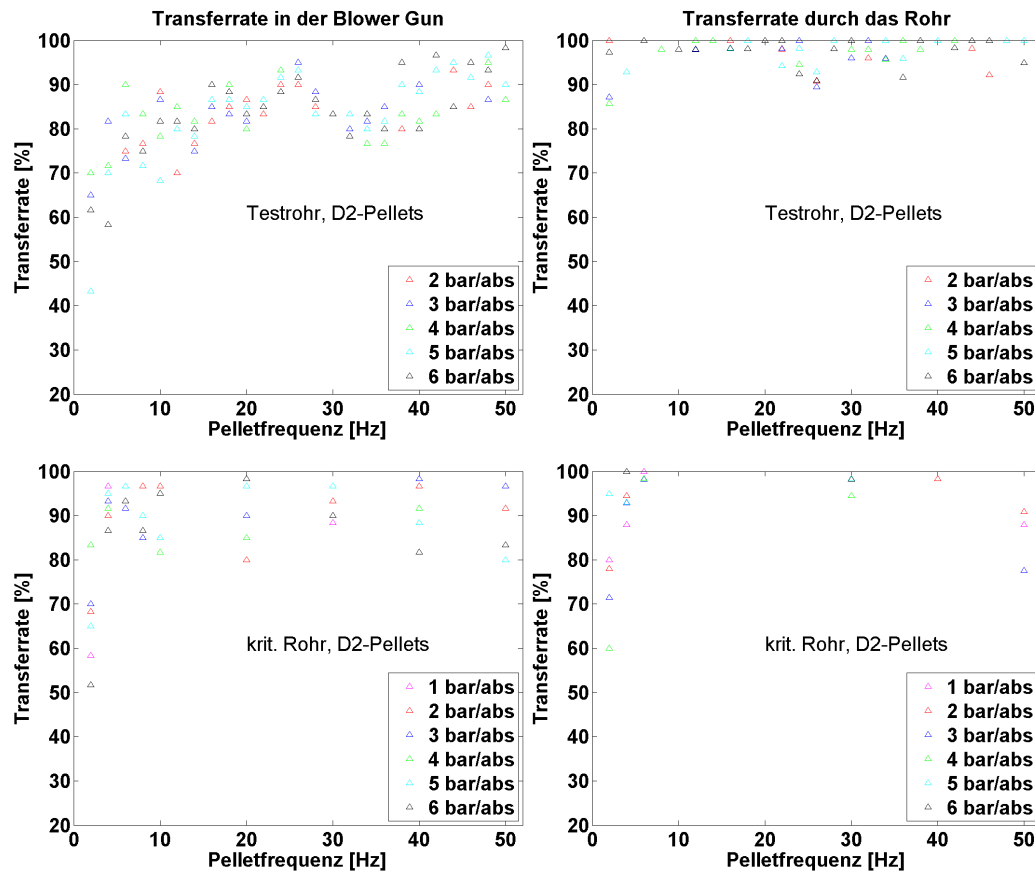


Abbildung 6.7: Transferrate der D_2 -Pellets im Testrohr und im kritischen Rohr

Die Transferrate gibt die Anzahl der Pellets an, die die Blower Gun oder das Führungsrohr verlassen. Diese Zahl wird mit der Anzahl der angeforderten Pellets normiert. Die Transferrate der Pellets ist bei 2Hz Repetitionsrate bedeutend geringer als bei höheren Frequenzen. Dies liegt daran, dass der warme Hacker den Eisstrang antaut, bevor dieser in den Hacker geschoben wird. Die Eisqualität leidet erheblich unter diesem Wärmeeintrag und das Pellet hat eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit zu zerbrechen. Bei höheren Repetitionsraten liegt die Transferrate bei etwa 90%. Ein Vergleich der Raten in der Blower Gun beim Testrohr und beim kritischen Rohr zeigen

eine leichte Erhöhung der Transferrate beim kritischen Rohr. Dies ist kein Effekt des Rohres, da sich die Pellets bei dieser Messung noch in der Blower Gun befinden.

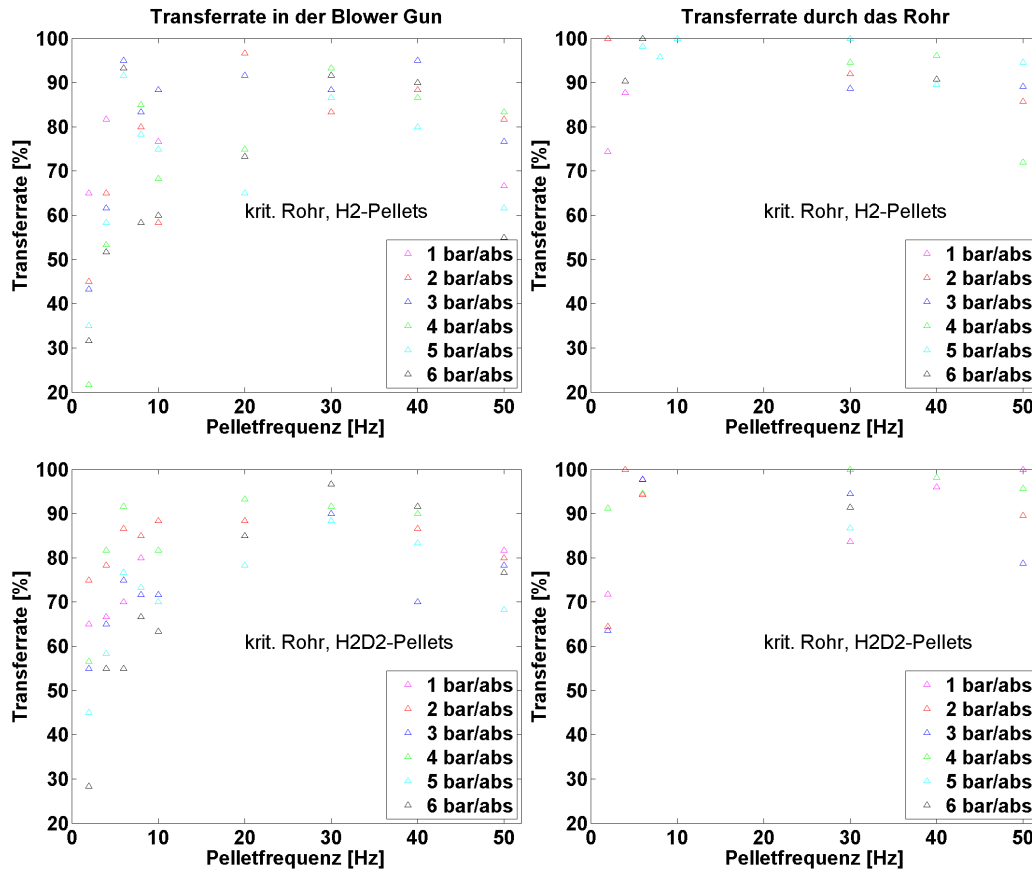


Abbildung 6.8: Transferrate der H_2 - und H_2D_2 -Pellets

Die gesteigerte Transferrate ist hier dem Handvorschub geschuldet. Dadurch wird das erste Pellet nicht vom Beginn des Eisstranges geschnitten, sondern erst etwas weiter hinten im Strang. Die bessere Eisqualität an dieser Stelle verbessert die Überlebenswahrscheinlichkeit des Pellets. Ein Vergleich zwischen H_2 - und D_2 -Eis in der Blower Gun zeigt, dass die Transferraten der Wasserstoffpellets erst ab 15Hz den Wert der Deuteriumpellets erreichen. Grund dafür ist die höhere Temperaturempfindlichkeit des H_2 -Eises. Die Wärmeeinstrahlung des Hackers verschlechtert hier die Eisqualität deutlich stärker als im Falle des Deuteriums. Auffällig ist, dass die Transferrate

der Wasserstoffpellets bei 50Hz plötzlich einbricht. Auch die Hybridpellets erreichen erst bei höheren Repetitionsraten eine Transferrate von etwa 90% und die abnehmende Rate bei 50Hz ist ebenfalls zu erkennen. Daraus ist zu schließen, dass der Wasserstoff die dominante Komponente für das Verhalten der Hybridpellets bezüglich der Transferrate ist. In beiden Führungsrohren ist die Transferrate für alle Frequenzen und Treibgasdrücke sehr hoch. Daher wird in Abbildung 6.9 lediglich die Transferrate in der Blower Gun zusammengefasst. Es ist jedoch zu bemerken, dass die Raten des kritischen Führungsrohres teilweise über 100% liegen, was daran liegt, dass Pellets zerbrechen und mehr Pellets registriert werden, als die Blower Gun verlassen. Außerdem liegen Messpunkte für verschiedene Treibgasdrücke übereinander, wodurch nicht alle Punkte im Diagramm sichtbar sind. Tendenzen bezüglich der Treibgasdrücke sind nicht zu erkennen, was bedeutet, dass der Treibgasdruck keinen ausschlaggebenden Einfluss auf die Transferrate der Pellets hat.

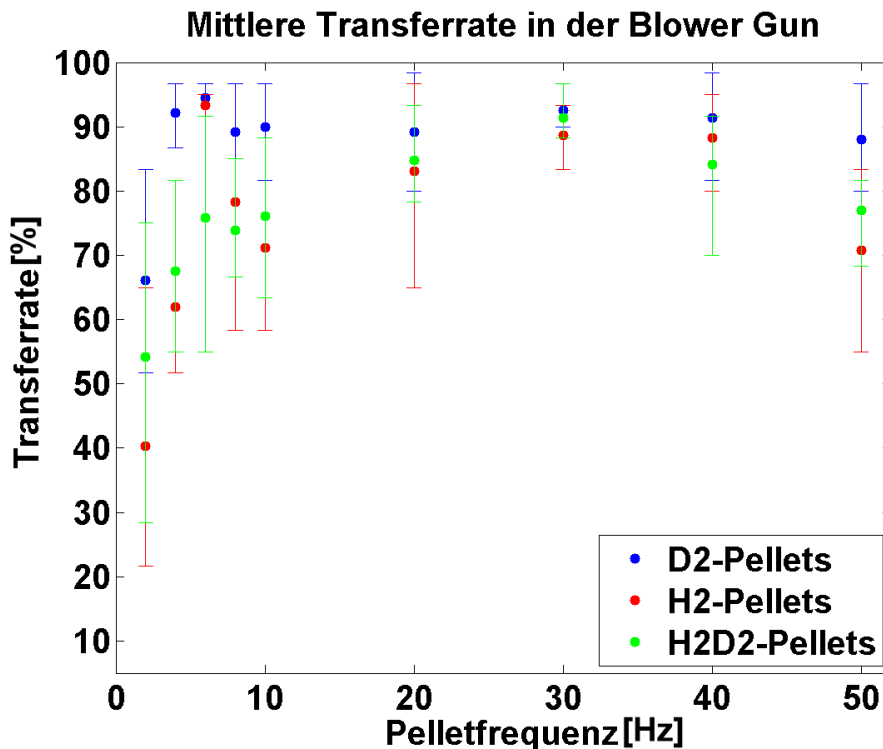


Abbildung 6.9: Mittlere Transferrate in der Blower Gun

6.6 Transfereffizienz

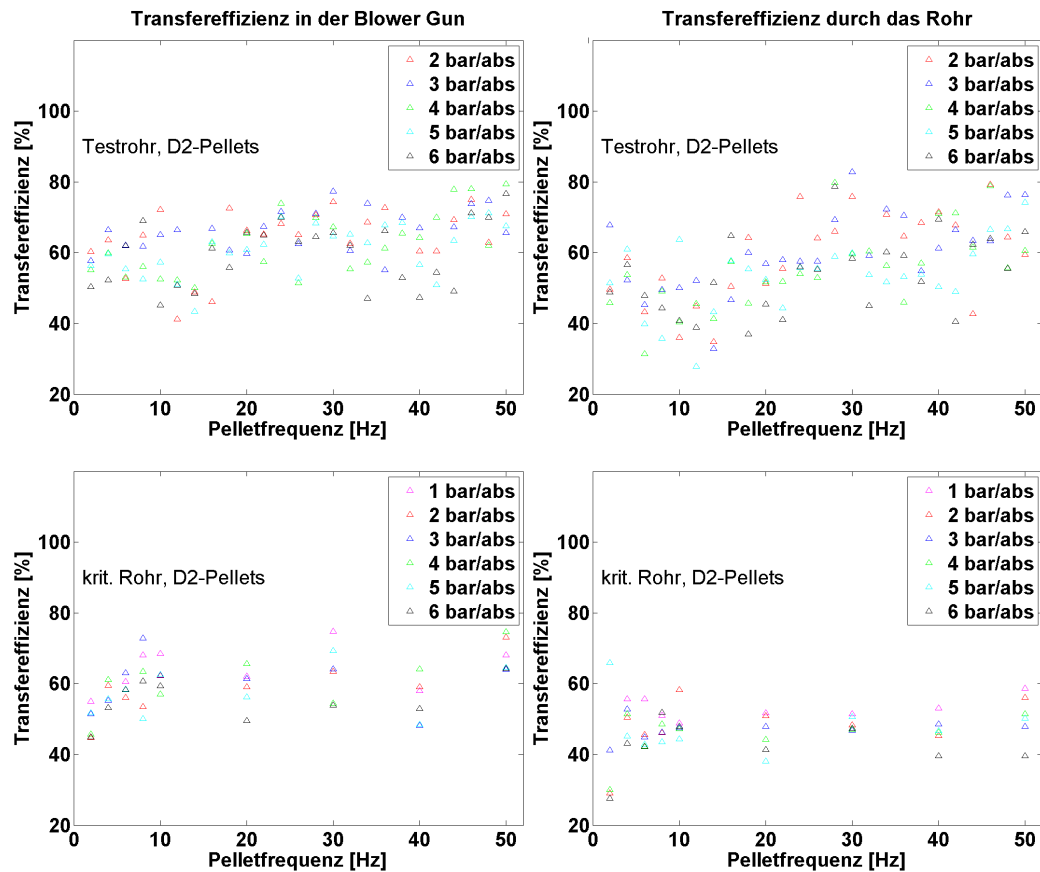


Abbildung 6.10: Transfereffizienz der D_2 -Pellets im Testrohr und im kritischen Rohr

Deuteriumpellets haben am Ende der Beschleunigungsstrecke eine Restmasse, die zwischen 50% und 80% der ursprünglichen Masse beträgt. Für Wasserstoffpellets und Hybridpellets liegt die Streuung der Restmasse zwischen 20% und 70%. Es ist eine sehr geringe Abhängigkeit von der Repetitionsrate zu erkennen. Im Falle von Deuteriumpellets ist ein leichtes Ansteigen der Restmasse mit der Repetitionsrate ersichtlich. Hybridpellets zeigen ein ähnliches Verhalten. Dies ist auf den Hacker zurückzuführen, dessen Wärmestrahlung die Pellets bei geringen Frequenzen länger abtaut. Bei Wasserstoffpellets erreicht man die höchste Restmasse bei etwa 25Hz.

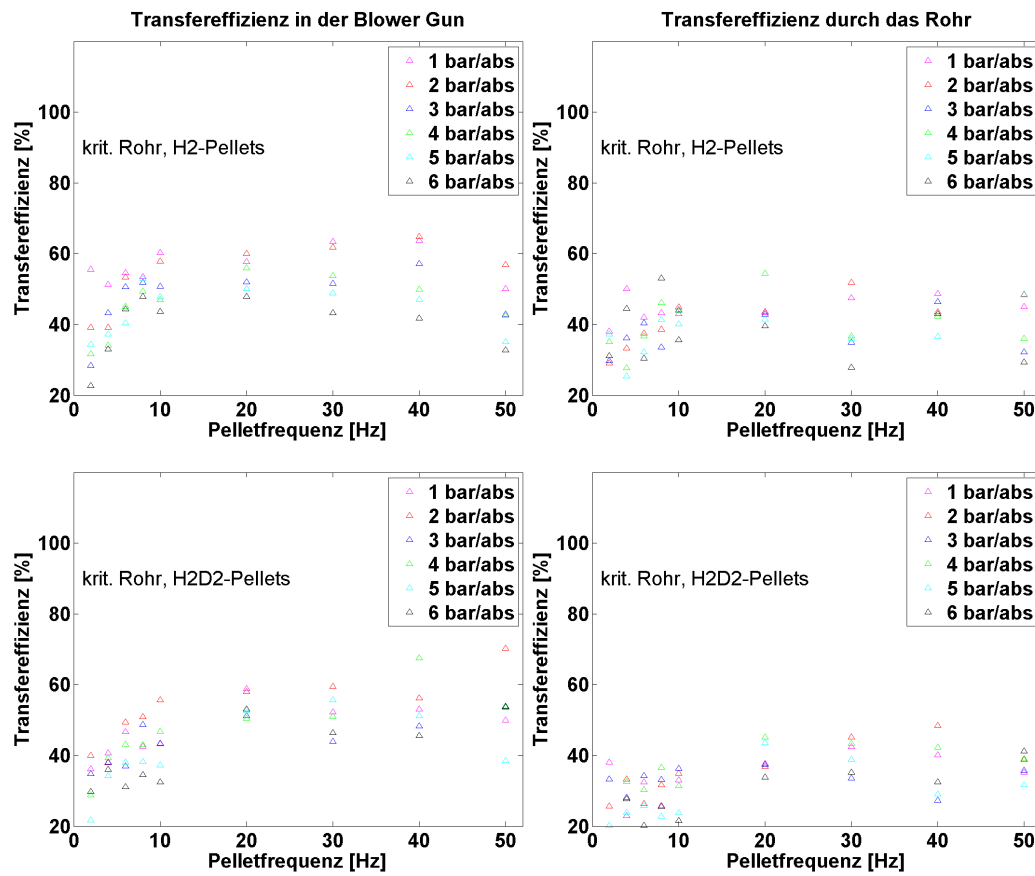


Abbildung 6.11: Transfereffizienz der H_2 - und H_2D_2 -Pellets

Der Einfluss des Treibgasdruckes wird bei allen Pelletmaterialien deutlich. Unabhängig von der Repetitionsrate nimmt die Restmasse am Ende der Beschleunigungsstrecke in der Blower Gun mit zunehmendem Treibgasdruck ab. Dieser Effekt ist durch den höheren Gasmassenstrom zu erklären, der mit steigendem Treibgasdruck die Pellets umströmt. Dadurch ist ein höherer konvektiver Wärmeeintrag in das Pellet vorhanden, welcher zu einer Beschleunigung der Sublimation des Eises führt.

Im Testrohr liegt die Restmasse zwischen 30% und 80%. Im Mittel ist ein deutlich Masseverlust im Vergleich zum Austritt aus der Blower Gun zu erkennen. Grund dafür ist das Führungsrohr, welches Raumtemperatur hat und somit zu einer sofortigen Sublimation des Pellets führt. Die Pellets im Testrohr weisen mit steigender Repetitionsrate eine ansteigende Restmas-

se auf. Verantwortlich dafür ist der Hacker, der bei geringen Frequenzen die Eisqualität stärker verschlechtert und das Pellet dadurch mehr Masse im Rohr verliert. Für D_2 -Pellets im kritischen Führungsrohr ist, mit Ausnahme von 2Hz, kein Einfluss der Repetitionsrate erkennbar. Hier liegt die Restmasse zwischen 35% und 60%. Allerdings wird hier ersichtlich, dass sich der Treibgasdruck auch im Führungsrohr auswirkt. Höhere Drücke führen zu geringeren Restmassen. Der selbe Effekt tritt auch für H_2 -Pellets und Hybridpellets im kritischen Führungsrohr auf. Wasserstoffpellets haben am Ende des Führungsrohres eine Restmasse von 30% bis 50%. Hybridpellets weisen Restmassen zwischen 20% und 50% auf. Eine Erklärung für den erhöhten Masseverlust der Hybridpellets im Vergleich mit den Pellets aus einer Komponente ist, dass der Wasserstoff aufgrund seiner geringeren Sublimationstemperatur vor dem Deuterium in den gasförmigen Zustand übergeht. Dabei bilden sich im Pellet kleine Gaseinschlüsse, die das Deuteriumeis vom Pellet absprengen.

Es ist zu erwähnen, dass die Ergebnisse der Transfereffizienz mit Hilfe der Bayesian Analysis bestimmt wurden und damit einen relativen Fehler zwischen 10% und 60% enthalten. Die große Anzahl an Messergebnissen ermöglicht jedoch eine teilquantitative Aussage.

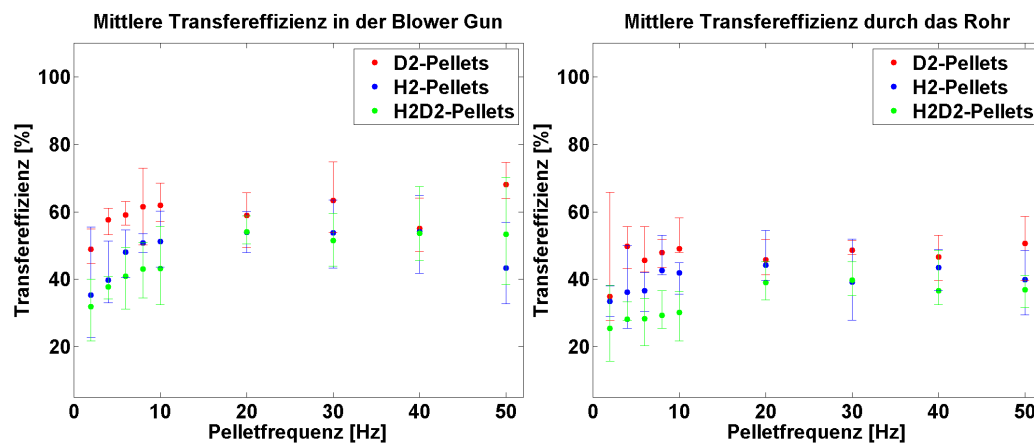


Abbildung 6.12: Mittlere Transfereffizienz

6.7 Austrittswinkel

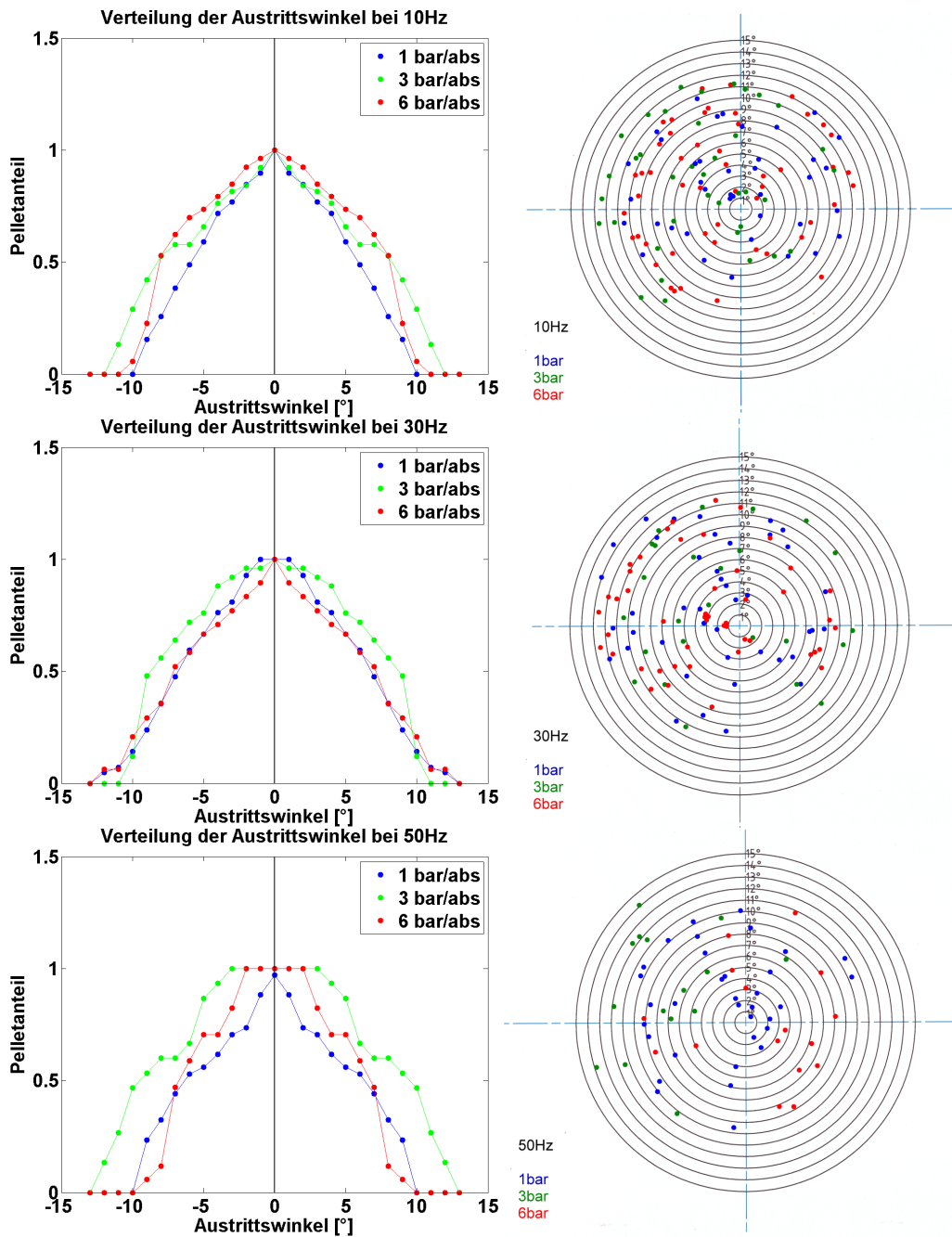


Abbildung 6.13: Verteilung der Austrittswinkel und Streuungen

Die Verteilung der Austrittswinkel weist eine statistische Verteilung auf. Es gibt jedoch eine auffällige Spitze bei einer Repetitionsrate von 10Hz und einem Treibgasdruck von 6bar/abs. Hier liegen außergewöhnlich viele Einschläge unter einem Winkel zwischen 9° und 10° vor. Die anderen Verteilungen sind eher gleichmäßig. Da die Anzahl der Einschläge jedoch nicht mit der Anzahl der in der Blower Gun registrierten Pellets überein stimmt, sind somit mehrere Pellets durch das selbe Einschlagsloch geflogen. Diese können in der Verteilung jedoch nur als ein Pellet gewertet werden. Dadurch wird die Verteilung verzerrt.

Für die Erklärung der Streumuster ist es wichtig zu erwähnen, dass die Flugrichtung des Pellets in die Targetebene hinein geht. Es ist auffällig, dass sich der Großteil der Einschläge auf der linken Hälfte befindet. Dies ist für alle Repetitionsraten und Treibgasdrücke der Fall. Da die zweite Biegung im Führungsrohr eine Rechtskurve ist, liegt der Schluss nahe, dass die Pellets durch die Zentrifugalkraft an die linke Seite der Rohrwand gedrückt werden und mit hoher Wahrscheinlichkeit dort verbleiben bis sie aus dem Führungsrohr austreten. Da es sich jedoch um ein Rohr mit kreisrundem Querschnitt handelt, hat das Pellet, ohne Einwirkung einer relevanten Kraft, keine bevorzugte Position im Rohr. Deshalb trifft auch ein gewisser Teil auf der rechten Hälfte des Ziels auf. Diese Ungewissheit über die Lage des Pellets in einem runden Rohr ist der Grund, weshalb das Führungsrohr des ASDEX Upgrade einen rechteckigen Querschnitt hat. Dadurch werden die Freiheitsgrade des Pellets eingeschränkt. Zudem ist zu erkennen, dass etwas mehr Einschläge auf der oberen Hälfte zu verzeichnen sind. Dieses Phänomen ist auf eine geringe Schräglage des Führungsrohres zurückzuführen. Das Rohr führt leicht nach oben und die Pellets behalten ihre Bewegungsrichtung im Vakuum des Zielgefäßes bei. Ferner ist zu erkennen, dass kein Pellet das Zentrum des Ziels trifft. Der Streuwinkel beträgt zwischen 1° und 14° , unabhängig von der Repetitionsrate oder dem Treibgasdruck.

Da das hier untersuchte kritische Führungsrohr am Experiment W7-X ein Teil des gesamten Führungsrohrsystems ist, ist die hier gemessene Streuung

für das Experiment nicht von großer Bedeutung. Es verdeutlicht jedoch, dass ein Rohr mit rechteckigem Querschnitt vermutlich besser als Führungsrohr geeignet ist, als ein Rohr mit kreisrundem Querschnitt, da die Pellets eine besser definierte Position im Rohr einnehmen. Dies ist besonders beim Einschuss in das Plasma relevant, da in diesem Fall das Plasmazentrum getroffen werden muss. Daher wäre eine Untersuchung eines Rohres mit rechteckigem Querschnitt und gleicher Geometrie zu empfehlen.

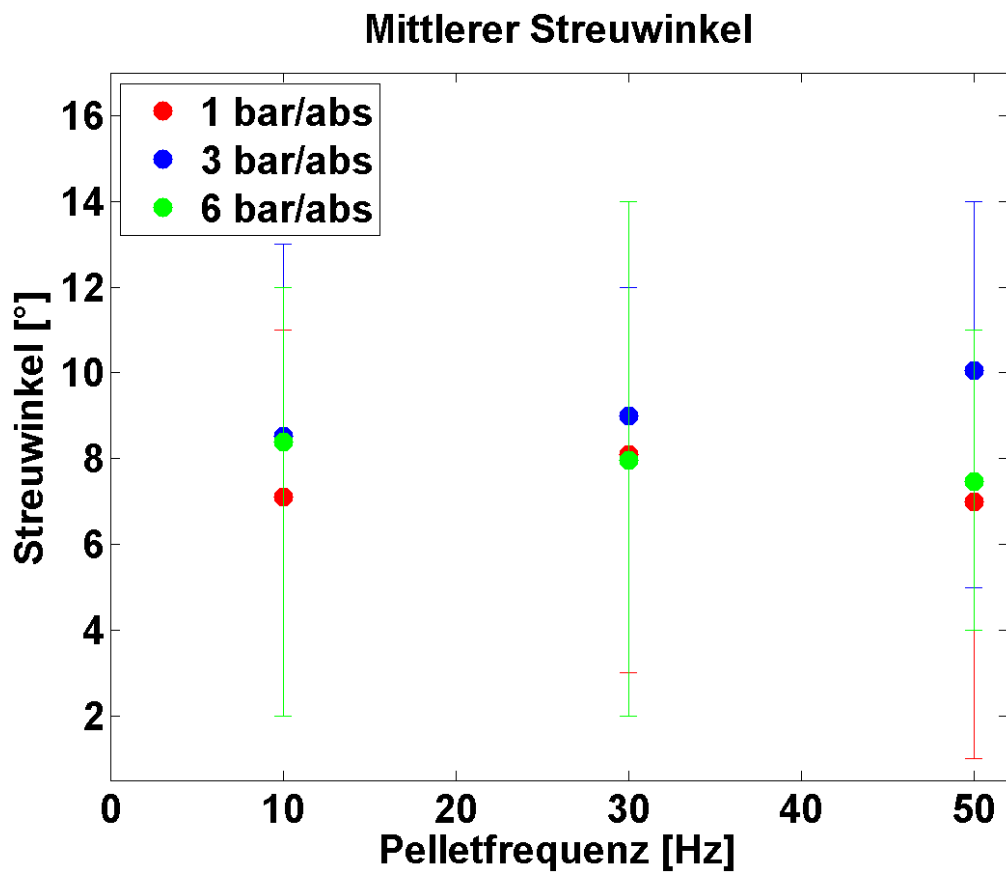


Abbildung 6.14: Mittlere Streuwinkel

Kapitel 7

Zusammenfassung

Ein Ziel dieser Arbeit war, die Blower Gun, die zuvor an ASDEX Upgrade für ELM-pacing Experimente verwendet wurde, in eine Konfiguration umzurüsten, die zur Brennstoffnachfüllung geeignet ist. Simulationen wiesen drauf hin, dass zylindrische Pellets mit 2mm Durchmesser und 2mm Länge am besten dafür geeignet sind. Der Injektor wurde entsprechend umgebaut. Die Modifikationen an der Blower Gun erwiesen sich als erfolgreich und es konnten Eisstränge mit hoher Zuverlässigkeit hergestellt werden.

Ferner war zu untersuchen, wie leistungsfähig die Blower Gun mit dem Führungsrohrsystem von W7-X ist. Dafür wurde zunächst ein leicht gekrümmtes Führungsrohr für Testzwecke an die Blower Gun angebaut und am Austritt des Rohres wurde eine Messstrecke installiert. In dieser Konfiguration wurde der Injektor und die Messsysteme bei verschiedenen Repetitionsraten und Treibgasdrücken getestet. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Blower Gun Pellets produzieren und verschießen kann. Zudem konnte belegt werden, dass die Messeinrichtungen den Ansprüchen genügten. Nach Abschluss der ersten Versuchsreihe wurde das leicht gekrümmte Testrohr durch ein doppelt gekrümmtes Führungsrohr ersetzt, welches den kritischen Teil des Führungsrohrsystems an W7-X repräsentiert. Dieses wurde mit Deuteriumpellets, Wasserstoffpellets und Hybridpellets aus 50% Wasserstoff und 50%

Deuterium untersucht. Dabei konnte erstmals gezeigt werden, dass die Blower Gun auch mit Wasserstoff und Gasmischungen zuverlässig funktioniert. Während der Versuche wurde der Injektor im Dauerbetrieb getestet und erwies sich auch nach mehreren Stunden als sehr stabil. Nach Beendigung dieser Versuchsreihen wurde die Messtrecke am Ende des Führungsrohres entfernt um eine Streuwinkelmessung durchzuführen. Diese wurde mittels eines Papiervorschubs im Zielgefäß und Wasserstoffpellets umgesetzt.

Die Messung der Pelletgeschwindigkeiten ergab, dass die Blower Gun D_2 -Pellets mit Geschwindigkeiten zwischen $110 \frac{m}{s}$ und $260 \frac{m}{s}$ verschießen kann, je nach Treibgasdruck. H_2 -Pellets erreichen Geschwindigkeiten zwischen $120 \frac{m}{s}$ und $260 \frac{m}{s}$ und Hybridpellets $110 \frac{m}{s}$ und $260 \frac{m}{s}$. Dabei tritt eine Streuung der Pelletgeschwindigkeiten von bis zu $90 \frac{m}{s}$ auf, besonders bei Hybridpellets. Ein relevanter Geschwindigkeitsverlust im Rohr ist weder beim Testrohr noch beim kritischen Führungsrohr zu erkennen.

Für die Überlebensrate der Pellets in der Blower Gun konnte eine Abhängigkeit von der Repetitionsrate nachgewiesen werden. Bei einer Frequenz von 2Hz liegt die Überlebensrate für Deuteriumpellets bei etwa 60%. Diese nimmt mit steigender Frequenz schnell zu und erreicht bei 4Hz bereits über 90%. Dieser Wert bleibt bis 50Hz konstant. Wasserstoffpellets haben bei niedrigen Repetitionsraten eine geringere Überlebenswahrscheinlichkeit als Deuteriumpellets. Zudem wird eine Überlebensrate von 90% erst bei einer Frequenz von 15Hz erreicht. Dieser bleibt konstant, bis eine Repetitionsrate von 50Hz eingestellt wird. Hier sinkt die Überlebensrate auf unter 80%. Für die Hybridpellets ist ein ähnliches Verhalten zu beobachten. Die hohen Verluste bei geringen Frequenzen sind auf den Hacker zurückzuführen. Dieser hat eine deutlich höhere Temperatur als das Eis und führt durch seine Wärmestrahlung zur Sublimation des Eises. Dieser Effekt wirkt sich bei niedrigen Repetitionsraten stärker aus, da das Eis dem warmen Hacker länger ausgesetzt ist. Durch das Führungsrohr ist die Abhängigkeit von der Repetitionsrate nicht so eklatant. Die Überlebensrate liegt hier nahe bei 100%, sowohl für das Test-

rohr als auch für das kritische Führungsrohr. Der Treibgasdruck wirkt sich nicht erkennbar auf die Überlebensrate aus.

Die Restmasse von Deuteriumpellets beim Austritt aus der Blower Gun beträgt zwischen 50% und 80%, bei Wasserstoffpellets und Hybridpellets 20% bis 70%. Durch das Führungsrohr verlieren die Pellets nochmals an Masse. D_2 -Pellets haben am Ende des Führungsrohres noch zwischen 35% und 60% ihrer ursprünglichen Masse. H_2 -Pellets verbleiben mit 30% bis 50% und Hybridpellets mit 20% bis 50%. Die Transfereffizienz steigt nur in sehr geringem Maße mit der Repetitionsrate. Der Treibgasdruck hat hingegen einen erheblichen Einfluss auf die Restmasse. Mit steigendem Druck nimmt die Restmasse ab. Dieser Effekt gilt für alle Repetitionsraten und ist auch im Führungsrohr nachweisbar.

Der Austrittswinkel aus dem Führungsrohr liegt zwischen 1° und 14° . Die Pellets haben in diesem Bereich keinen erkennbar bevorzugten Streuwinkel. Nach dem Streumuster zu urteilen verbleibt ein großer Teil der Pellets auf der Seite des Rohres, auf die sie durch die Zentrifugalkraft in der letzten Krümmung gezwungen wurden. Da die Pellets in einem runden Rohr keine bevorzugte Position einnehmen, sind jedoch eine erhebliche Anzahl an gestreuten Pellets zu verzeichnen.

Kapitel 8

Ausblick

Bevor die Blower Gun zum operativen Einsatz am Stellarator Wendelstein 7-X abgestellt wird, bieten sich noch eine Reihe weiterführender Untersuchungen an. So wäre zum Beispiel die Herstellung von Eissträngen verschiedener Temperaturen von Interesse. Dies könnte durch Einstellung des Heliumdurchflusses im Vorratskryostaten erreicht werden. Sinnvoller wäre jedoch eine Kryostatheizung, wie sie schon am Extrusionskryosten angebracht ist. Dazu müsste noch das Vakuum im Extrusionsgefäß verbessert werden. Dies könnte durch eine Boosterpumpe erzielt werden. Eine solche Untersuchung könnte Erkenntnisse über die Temperaturabhängigkeit der Festigkeit des Eises liefern und eine bessere Einstellung der Kryostaten ermöglichen. Dies gilt besonders für Kryostaten, die für eine kontinuierliche Eisproduktion verwendet werden.

Außerdem empfiehlt es sich, die hier untersuchte Führungsrohrgeometrie mit einem Rohr mit rechteckigem Querschnitt zu untersuchen. Die Streuwinkel-messung belegt, dass die Pellets keine definierte Position im Rohr einnehmen. Dies könnte im Rechteckrohr anders sein. Obgleich dies für das Führungsrohrsystem von W7-X keine Möglichkeit ist, könnte ein Vergleich zweier identischer Geometrien mit rundem und rechteckigem Querschnitt Erkenntnisse für das Design zukünftiger Führungsrohre liefern.

Zudem wäre eine Untersuchung des gesamten Führungsrohrsystems von W7-X empfehlenswert. Das hier geprüfte Rohr ist zwar der kritischste Teil des Gesamtsystems, jedoch ist die Strecke am Experiment bedeutend länger und enthält weitere Biegungen. Daher sollte die Blower Gun idealerweise mit dem komplette Rohrsystem auf seine Leistungsfähigkeit hin untersucht werden. Dies ist im Labor, in dem die Blower Gun getestet wurde, jedoch nicht ohne Weiteres möglich, da der benötigte Bauraum nicht vorhanden ist.



Abbildung 8.1: Bauraum im Pelletlabor

Anhang A

Soffwerte

Stoffwerte für die feste Phase

	Wasserstoff	Deuterium	Helium
Wärmeleitfähigkeit Eis $\lambda \left[\frac{W}{mK}\right]$	0,6 [13]	0,42 [13]	-
Dichte Eis (unverdichtet) $\rho \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	89 [12]	216 [12]	-
Dichte Eis (verdichtet) $\rho_{Eis} \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	90	220	-
Schmelzenthalpie $h_{Sm} \left[\frac{J}{kg}\right]$	58615 [13]	49195 [13]	-
Verdampfungsenthalpie $h_v \left[\frac{J}{kg}\right]$	581110 [14]	358390 [14]	21700 [15]
Sublimationsenthalpie $h_s \left[\frac{J}{kg}\right]$	639725	407585	-
Sublimationstemperatur $T_{sub} [K]$	13,95 [17]	18,55 [16]	-
Absorptionsgrad $\alpha [-]$	0,2	0,2	-
Bruchspannung $\sigma_B [bar]$	0,7 - 3,5	2,1 - 5,3[20]	-

Stoffwerte der Gase[24][25]

	Wasserstoff	Deuterium	Helium	Argon	Neon
Molare Masse $M \left[\frac{kmol}{kg}\right]$	2,016	4,028	4,0026	39,948	20,18
Adiabatenexponent $\gamma [-]$	1,42	1,43	1,67	1,71	1,68
Kinematische Viskosität $\nu \left[\frac{m^2}{s} * 10^{-6}\right]$	126	123	104,2	16,1	33,5
Prandtl-Zahl $Pr [-]$	0,67	0,67	0,667	0,65	0,668
Wärmeleitfähigkeit Gas $\lambda_{gas} \left[\frac{W}{mK}\right]$	0,19	0,12	0,14	0,018	0,046
Wärmekapazität $c_{v,gas} \left[\frac{J}{kgK}\right]$	10110	5069	5193	306	613

Anhang B

Spezifikationen der Pumpen

Spezifikationen der Turbopumpe Leybold Turbovac 361[27]

Pumprate [$\frac{l}{s}$]	400
Minimaler Vakuumdruck für N_2 [$mbar$]	$\leq 10^{-10}$
Vorvakuumdruck [$mbar$]	$\leq 0,5$
Drehzahl [rpm]	45 000
Hochlaufzeit [s]	≈ 120
Anschlussflansch	CF 160
Gewicht [kg]	≈ 12
Maximale Umgebungstemperatur [K]	328

Spezifikationen der Drehschieberpumpe Leybold Trivac D30A[28]

Pumprate [$\frac{l}{s}$]	12,67
Minimaler Vakuumdruck [$mbar$]	$\approx 4 * 10^{-4}$
Minimaler Vakuumdruck mit Gasballast [$mbar$]	$\approx 4 * 10^{-3}$
Drehzahl [rpm]	1725
Motorleistung [kW]	1,12
Anschlussflansch	KF 40
Gewicht [kg]	$\approx 73,94$
Maximale Umgebungstemperatur [K]	313

Spezifikationen der Drehschieberpumpe Leybold Trivac DK200[29]

Pumprate [$\frac{l}{s}$]	62,5
Minimaler Vakuumdruck [$mbar$]	$\approx 5 * 10^{-4}$
Minimaler Vakuumdruck mit Gasballast [$mbar$]	$\approx 4 * 10^{-3}$
Drehzahl [rpm]	540
Motorleistung [kW]	5,5
Anschlussflansch	63 ISO-K
Gewicht [kg]	≈ 375

Anhang C

Schaltpläne

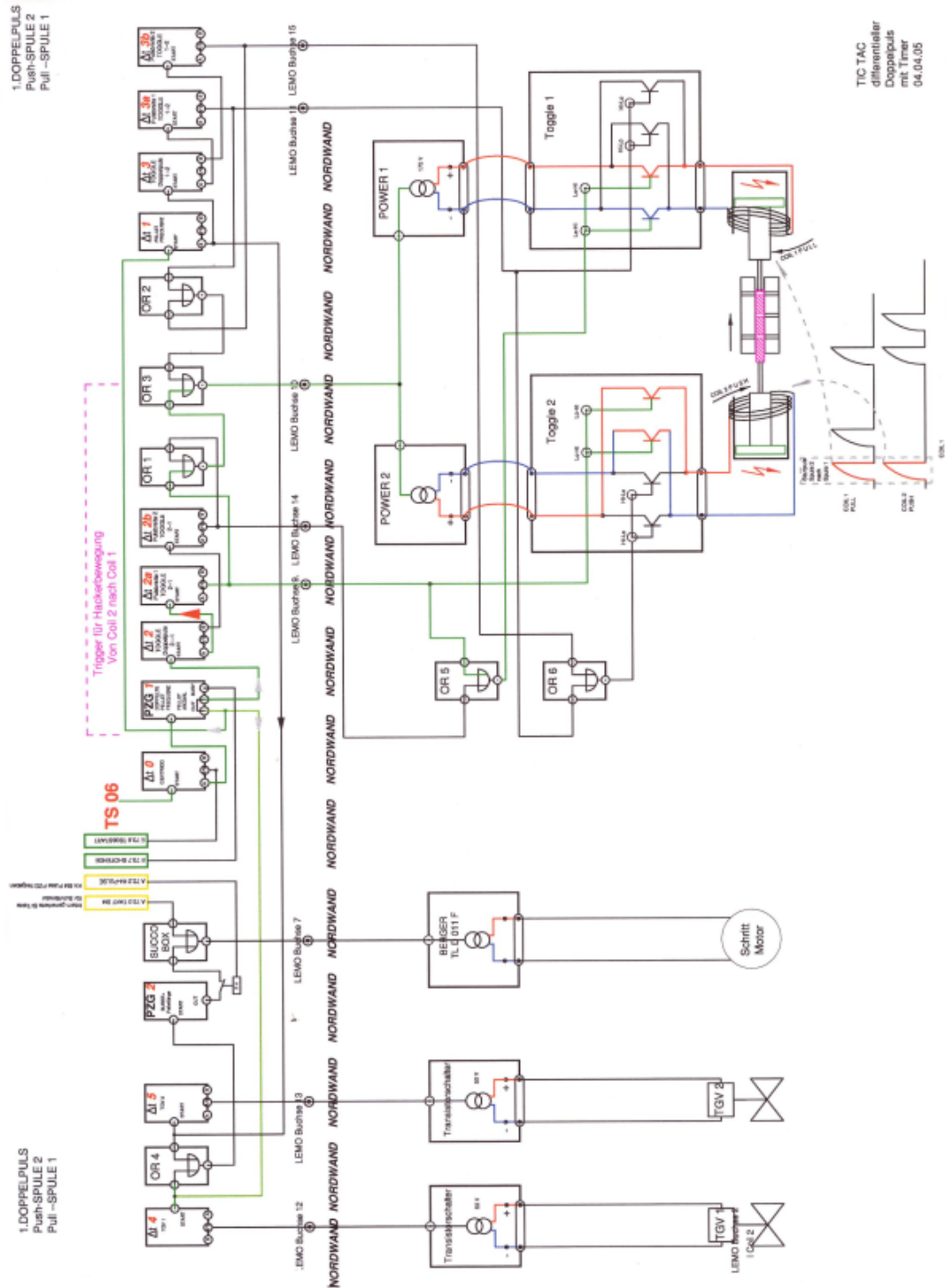
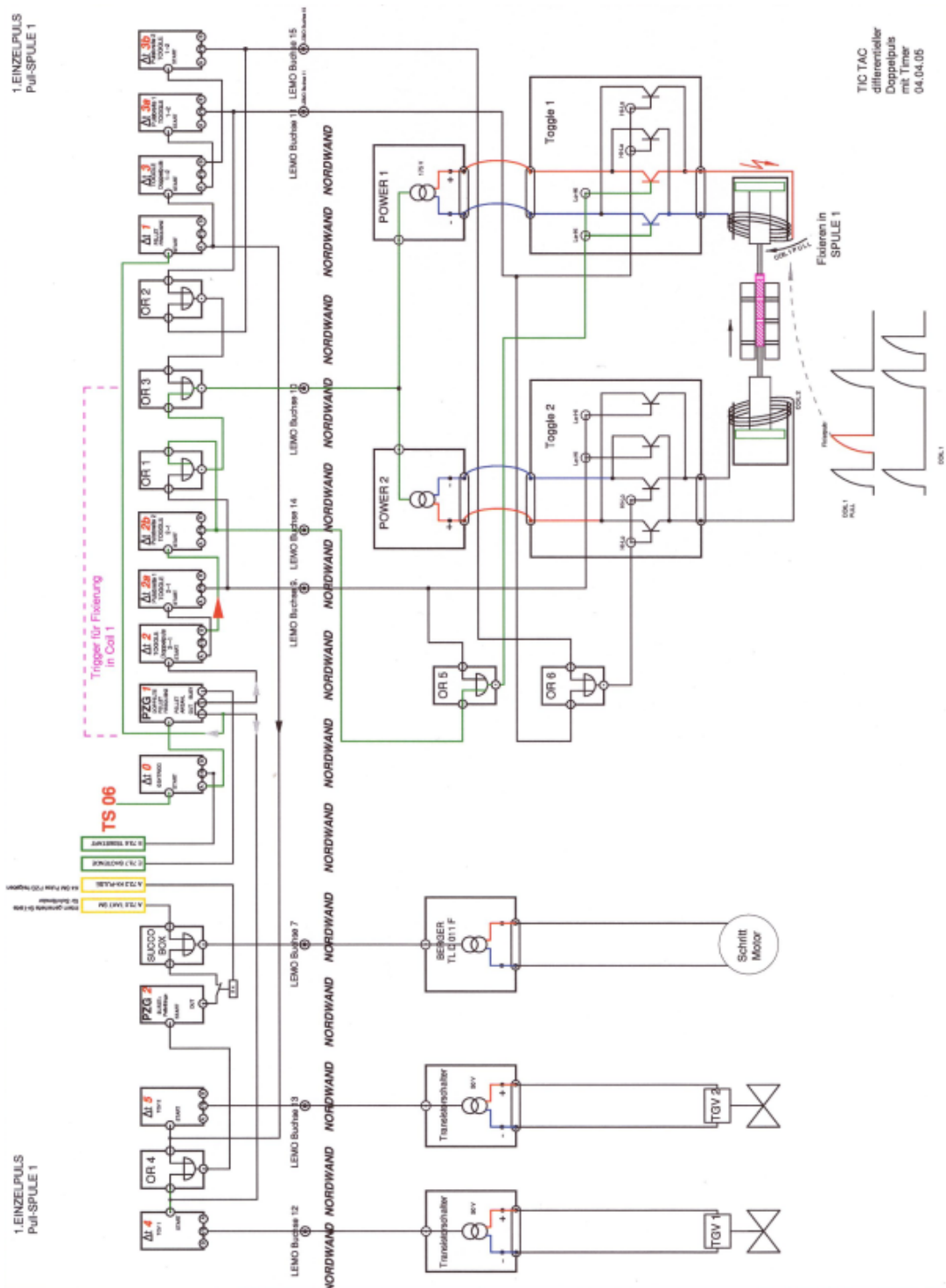


Abbildung C.1: Schaltung für den ersten Doppelpuls[38]



TIC TAC
differenzieller
Doppelpuls
mit Timer
04.04.05

Abbildung C.2: Schaltung für den ersten Nachpuls[38]

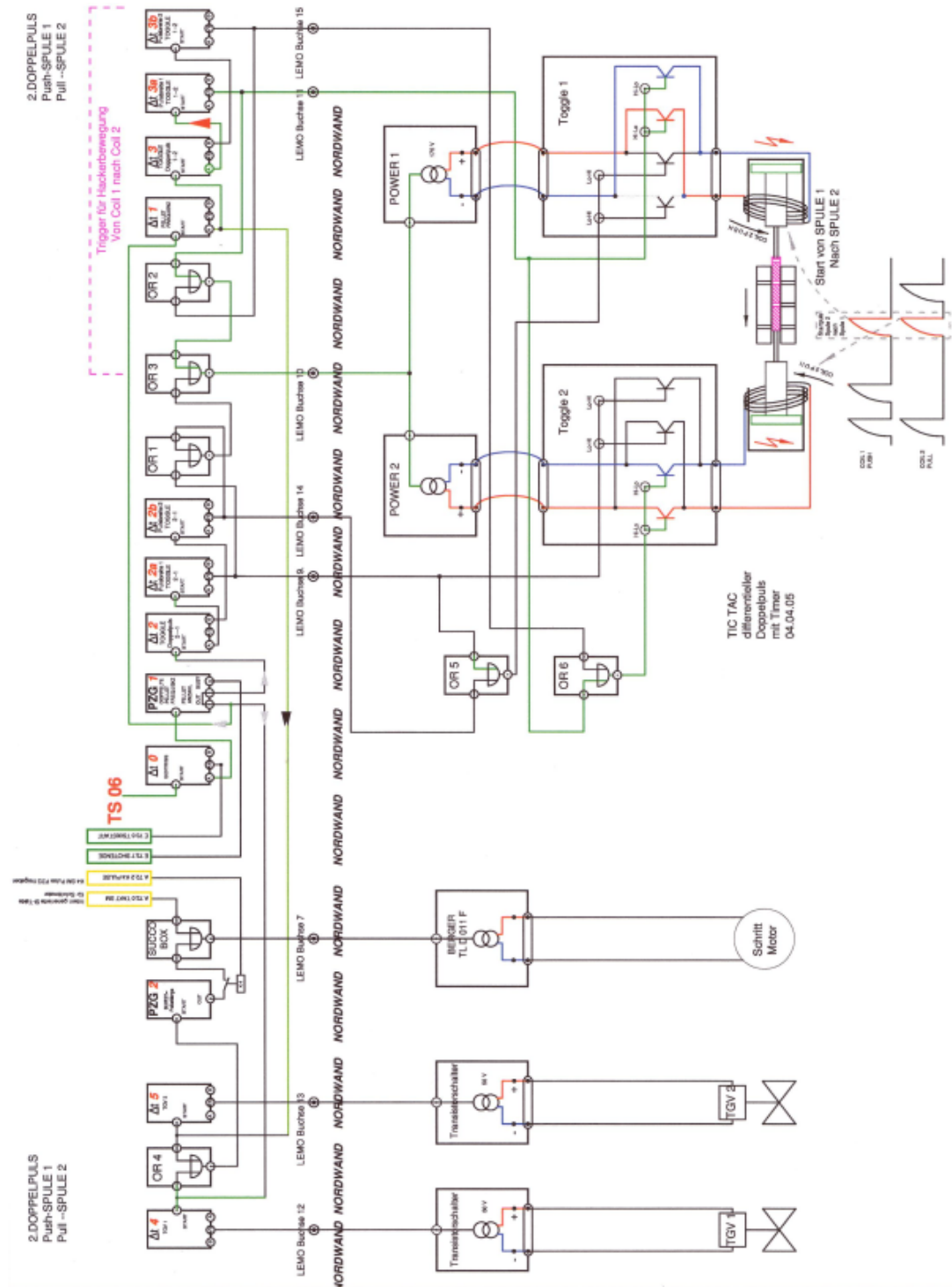


Abbildung C.3: Schaltung für den zweiten Doppelpuls[38]

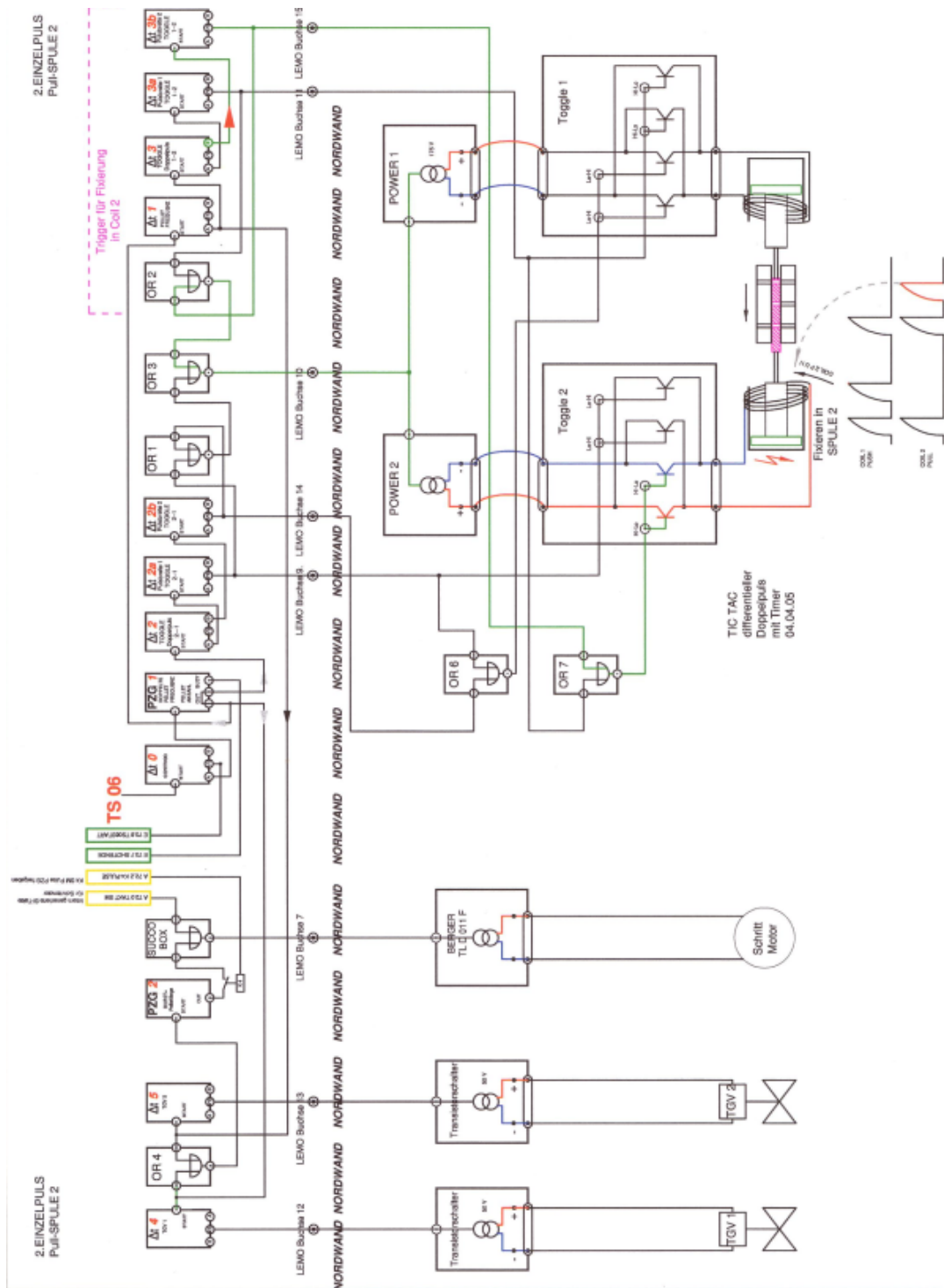


Abbildung C.4: Schaltung für den zweiten Nachpuls[38]

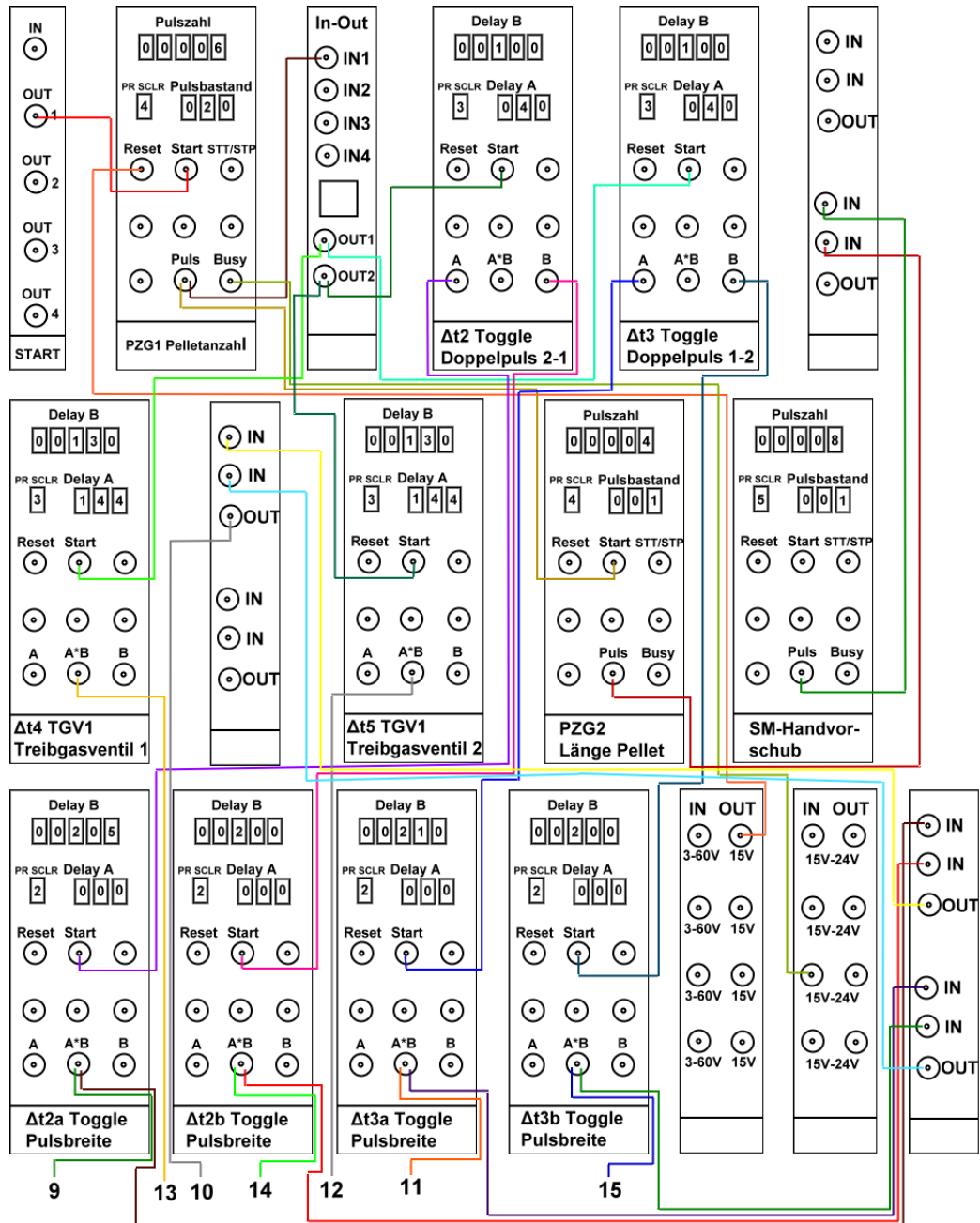


Abbildung C.5: Verkabelung der Module

Anhang D

Fehlerrechnung

D.1 Geschwindigkeitsmessung

Für die Bestimmung der Pelletgeschwindigkeiten werden jeweils zwei Lichtschranken nach der Beschleunigungsstrecke und nach dem Führungsrohr verwendet. Die Geschwindigkeit setzt sich aus dem räumlichen Abstand der Lichtschranken und dem zeitlichen Abstand der Lichtschrankensignale zusammen. Der Abstand der vorderen Lichtschranken beträgt $s_1 = 0,037m$ und der der hinteren Lichtschranken $s_2 = 0,193m$. Die Messung der Abstände erfolgte durch einen Zollstock. Daher wird der Fehler der Längenmessung bei 5% festgelegt. Die zeitliche Abweichung hängt von der Aufnahmezeit ab. Dieses arbeitet mit 1GHz. Daher kann ein eingehendes Signal mit einer maximalen Abweichung von $\Delta t = 1 * 10^{-6}s$ aufgezeichnet werden. Die maximale Abweichung der Geschwindigkeiten wird nach dem Prinzip der arithmetischen Fehlerfortpflanzung bestimmt.

$$\Delta v_P = \left| \frac{\partial v_P}{\partial s} \right| * \Delta s + \left| \frac{\partial v_P}{\partial t} \right| * \Delta t = \left| \frac{1}{t} \right| * \Delta s + \left| -\frac{s}{t^2} \right| * \Delta t \quad (\text{D.1})$$

Damit ergeben sich für die relevanten Pelletgeschwindigkeiten folgende Abweichungen.

Vordere Lichtschranken

v_P	$70 \frac{m}{s}$	$80 \frac{m}{s}$	$90 \frac{m}{s}$	$100 \frac{m}{s}$	$110 \frac{m}{s}$	$120 \frac{m}{s}$	$130 \frac{m}{s}$	$140 \frac{m}{s}$
Δv_P	$3,63 \frac{m}{s}$	$4,17 \frac{m}{s}$	$4,72 \frac{m}{s}$	$5,27 \frac{m}{s}$	$5,83 \frac{m}{s}$	$6,39 \frac{m}{s}$	$6,94 \frac{m}{s}$	$7,54 \frac{m}{s}$
v_P	$150 \frac{m}{s}$	$160 \frac{m}{s}$	$170 \frac{m}{s}$	$180 \frac{m}{s}$	$190 \frac{m}{s}$	$200 \frac{m}{s}$	$210 \frac{m}{s}$	$220 \frac{m}{s}$
Δv_P	$8,09 \frac{m}{s}$	$8,70 \frac{m}{s}$	$9,26 \frac{m}{s}$	$9,85 \frac{m}{s}$	$10,46 \frac{m}{s}$	$11,08 \frac{m}{s}$	$11,71 \frac{m}{s}$	$12,32 \frac{m}{s}$
v_P	$230 \frac{m}{s}$	$240 \frac{m}{s}$	$250 \frac{m}{s}$	$260 \frac{m}{s}$	$270 \frac{m}{s}$	$280 \frac{m}{s}$	$290 \frac{m}{s}$	$300 \frac{m}{s}$
Δv_P	$12,92 \frac{m}{s}$	$13,57 \frac{m}{s}$	$14,19 \frac{m}{s}$	$14,86 \frac{m}{s}$	$15,47 \frac{m}{s}$	$16,14 \frac{m}{s}$	$16,71 \frac{m}{s}$	$17,49 \frac{m}{s}$

Hintere Lichtschranken

v_P	$70 \frac{m}{s}$	$80 \frac{m}{s}$	$90 \frac{m}{s}$	$100 \frac{m}{s}$	$110 \frac{m}{s}$	$120 \frac{m}{s}$	$130 \frac{m}{s}$	$140 \frac{m}{s}$
Δv_P	$3,52 \frac{m}{s}$	$4,04 \frac{m}{s}$	$4,55 \frac{m}{s}$	$5,06 \frac{m}{s}$	$5,45 \frac{m}{s}$	$6,07 \frac{m}{s}$	$6,61 \frac{m}{s}$	$7,09 \frac{m}{s}$
v_P	$150 \frac{m}{s}$	$160 \frac{m}{s}$	$170 \frac{m}{s}$	$180 \frac{m}{s}$	$190 \frac{m}{s}$	$200 \frac{m}{s}$	$210 \frac{m}{s}$	$220 \frac{m}{s}$
Δv_P	$7,59 \frac{m}{s}$	$8,11 \frac{m}{s}$	$8,61 \frac{m}{s}$	$9,19 \frac{m}{s}$	$9,65 \frac{m}{s}$	$10,17 \frac{m}{s}$	$10,73 \frac{m}{s}$	$11,25 \frac{m}{s}$
v_P	$230 \frac{m}{s}$	$240 \frac{m}{s}$	$250 \frac{m}{s}$	$260 \frac{m}{s}$	$270 \frac{m}{s}$	$280 \frac{m}{s}$	$290 \frac{m}{s}$	$300 \frac{m}{s}$
Δv_P	$11,78 \frac{m}{s}$	$12,30 \frac{m}{s}$	$12,82 \frac{m}{s}$	$13,35 \frac{m}{s}$	$13,87 \frac{m}{s}$	$14,41 \frac{m}{s}$	$14,95 \frac{m}{s}$	$15,47 \frac{m}{s}$

D.2 Pelletvolumen

Für die Berechnung der Transfereffizienz wird das Pelletvolumen nach der Beschleunigungsstrecke und nach dem Führungsrohr bestimmt. Dies geschieht durch Volumenrekonstruktion mittels der Bayesian analysis aus den Schattensbildern. Der in diesem Prozess auftretende Fehler ΔV wird über die Gauss'sche Fehlerfortpflanzung bestimmt. Dazu wird zunächst ein quadratischer erwarteter Pelletradius und eine quadratische erwartete Pelletlänge bestimmt.

$$E'(r) = \int_{0mm}^{1mm} r^2 * \left(\int_{0mm}^{2mm} P(r, h | D', L', A') dh \right) dr \quad (D.2)$$

$$E'(h) = \int_{0mm}^{2mm} h^2 * \left(\int_{0mm}^{1mm} P(r, h | D', L', A') dr \right) dh \quad (D.3)$$

Diese unterscheiden sich von den Gleichungen (2.42) und (2.43) dadurch, dass sie mit dem quadrierten Radius, beziehungsweise der quadrierten Länge

berechnet werden. Im nächsten Schritt werden die Abweichungen des Radius und der Länge bestimmt.

$$\Delta r = \sqrt{E'(r) - E(r)^2} \quad (\text{D.4})$$

$$\Delta h = \sqrt{E'(h) - E(h)^2} \quad (\text{D.5})$$

Schließlich wird die Abweichung des Volumens durch das Gauss'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet.

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial E(r)} * \Delta r\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial E(h)} * \Delta h\right)^2} \quad (\text{D.6})$$

$$= \sqrt{(2 * \pi * E(r) * E(h) * \Delta r)^2 + (\pi * E(r)^2 * \Delta h)^2} \quad (\text{D.7})$$

Daraus kann nun der prozentuale Fehler der Volumenrekonstruktion bestimmt werden.

$$\frac{\Delta V}{V_{rec}} * 100\% \quad (\text{D.8})$$

Abbildung D.1 zeigt repräsentativ die prozentualen Fehler der Volumen-

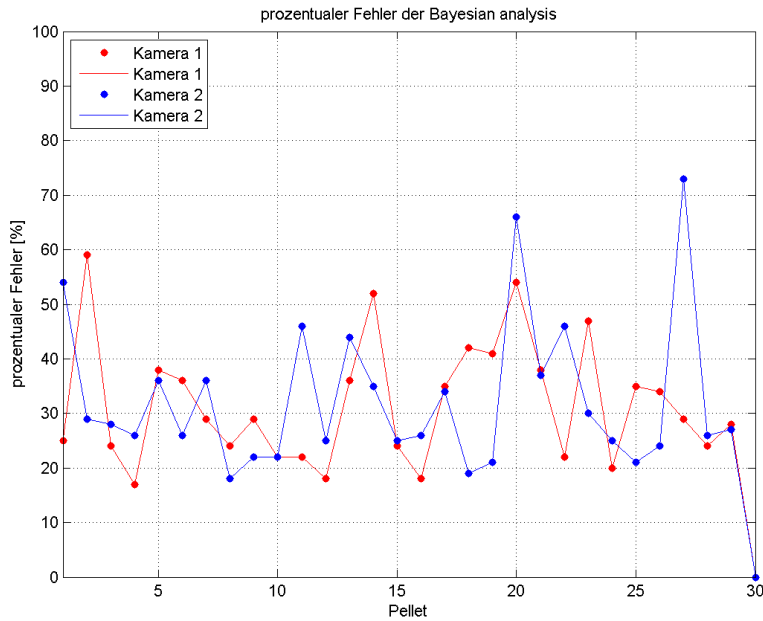


Abbildung D.1: prozentualer Fehler der Bayesian analysis

rekonstruktion mittels der Bayesian analysis. Das Diagramm zeigt die Abweichungen innerhalb eines Eisstranges. Der Fehler hängt nur bedingt vom Betriebszustand der Blower Gun ab, da zylindrische Pellets einen geringeren Fehler erzeugen als angetaute Pellets. So wird bei höheren Repetitionsraten ein geringerer Fehler gemessen. Allgemein liegt die Abweichung zwischen 10% und 60%, wobei in seltenen Fällen maximale Abweichungen von bis zu 80% auftreten.

D.3 Austrittswinkel

Der Austrittswinkel wird durch die Streuung der Einschläge auf dem Papier vorschub bestimmt. Dazu wird der Abstand des Rohraustritts zum Papier b und der Abstand vom unabgelenkten Auftreffpunkt zum Einschlagspunkt a bestimmt. Der Winkel α ergibt sich aus der Beziehung (3.6). Die Länge b wurde durch einen Zollstock bestimmt und beträgt 221mm. Die Unsicherheit wird aufgrund des Messverfahrens zu 5% gewählt. Das das Papier beim Einschlag aufreißt, kann der Einschlagspunkt nicht sehr genau bestimmt werden. Daher wird für die Länge a eine Unsicherheit von 20% festgelegt. Die arithmetische Fehlerfortpflanzung sieht für den Austrittswinkel folgendermaßen aus.

$$\Delta\alpha = \left| \frac{\partial\alpha}{\partial a} \right| * \Delta a + \left| \frac{\partial\alpha}{\partial b} \right| * \Delta b \quad (\text{D.9})$$

$$= \left| \frac{b}{a^2 + b^2} \right| * \Delta a + \left| -\frac{a}{a^2 + b^2} \right| * \Delta b \quad (\text{D.10})$$

Damit ergeben sich für die relevanten Winkel folgende Abweichungen.

α	1°	2°	3°	4°	5°
$\Delta\alpha$	$4,37 * 10^{-3\circ}$	$8,10 * 10^{-3\circ}$	$1,30 * 10^{-2\circ}$	$1,74 * 10^{-2\circ}$	$2,17 * 10^{-2\circ}$
α	6°	7°	8°	9°	10°
$\Delta\alpha$	$2,60 * 10^{-2\circ}$	$3,02 * 10^{-2\circ}$	$3,45 * 10^{-2\circ}$	$3,86 * 10^{-2\circ}$	$4,28 * 10^{-2\circ}$
α	11°	12°	13°	14°	15°
$\Delta\alpha$	$4,68 * 10^{-2\circ}$	$5,09 * 10^{-2\circ}$	$5,48 * 10^{-2\circ}$	$5,87 * 10^{-2\circ}$	$6,25 * 10^{-2\circ}$

Anhang E

Fragebogen von W7-X bezüglich der Blower Gun

Nachdem entschieden wurde, dass die Blower Gun für die erste Operationsphase an W7-X zum Einsatz kommen wird, musste festgestellt werden, welche Anforderungen der Injektor bezüglich Aufbau und Betrieb stellt. Zu diesem Zweck wurde von Jürgen Baldzuhn ein Fragebogen erstellt, um zu klären, welche Vorbereitungen zu treffen sind. In Zusammenarbeit mit der Pelletgruppe in Garching wurde dieser Fragebogen beantwortet. Im Folgenden ist das Ergebnis zusammengestellt.

Quelle: Baldzuhn[41]

Außenabmessungen des Injektors?

Länge = 2000mm, Breite = 800mm, max. Höhe (He-Anschlüsse oben auf) = 2300mm. Durch darüber hinaus ragende Teile, Schläuche und weiters benötigt der Injektor ein lichte Weite von Länge = 2200mm, Breite = 1000mm, max. Höhe = 3300mm. Der Injektor sitzt in einem Alu-Gestell mit 6 Füßen. Die Höhenverstellbarkeit ist gering, Gesamthub ca. 30mm.

Höhe des Ausschuss-Stutzens über dem Boden?

1300mm. Der gesamte Injektor muss auf ein Podest mit ca. 900mm - 1000mm Höhe, genauso die He-Dewars um auf die 2250mm Einschusshöhe über der EG-Plattform zu kommen. In dieser Höhe würde auch das Loch in die Wand der Torushalle gebohrt. Der Raum unter dem Podest kann genutzt werden für die drei nötigen Drehschieberpumpen D40 sowie Netzteile.

Durchmesser Ausschuss-Rohrstück - wie sieht die mechanische Anbindung an das Führungsrohr aus? Standardflansche? Schweißen?

Zurzeit sind Standard-KF und CF-Flansche zur Anbindung verwendet. Galvanisierte Kupfertrichter kanalisieren die Pellets nach der Freiflugstrecke. Im jetzigen Zustand reicht das Schussrohr (Außen 6mm) stumpf in das Führungsrohr (Außen 10mm).

Mögliche Abstufung der Durchmesser der weiteren Rohre nach Unterbrechungen?

Bei Verwendung eines Trichters empfiehlt sich, bei jedem weiteren Rohr um 4 mm im Durchmesser hochzugehen.

Gewicht des Injektors?

Etwa 750kg.

Wie genau sehen die Füße aus? Wie müsste die Plattform aussehen?

Die Füße sind rund und haben 80mm Außendurchmesser. Die Plattform könnte ein "Tisch" sein mit genau den Außenabmessungen des Injektors, eventuell mit einem Extrapodest für den He-Dewar, da die flexiblen Heberleitungen nur ca. 500mm lang sind. Man müsste dann immer mit einer Leiter am Injektor arbeiten. Alternativ: ein 1 Meter hohes Podest mit etwa 3 x 3 Metern, auf dem man auch oben rumlaufen kann.

Wie kommt man mit dem Helium an den Injektor?

Flexible Heberschläuche mit ca. 500mm Länge sind vorhanden, die Dewars müssen sicherlich auf ein Podest mit ca. 1 Meter Höhe. Die Heberstange hat 12,2mm Außendurchmesser. Bei Verwendung der eigenen 100 Liter-Dewars müsste eventuell ein Adapter angebaut werden, was unproblematisch ist. Die Garchinger 200-Liter-Dewars sind Mangelware, ein Ausleihen wird problematisch. Die Garchinger Dewars haben 900mm Außendurchmesser, sind ca. 2000mm hoch, etwa 250kg schwer (gefüllt), Inhalt etwa 270 Liter.

Sicherheit: N_2 -Spülung vorgesehen? Bleibt der H_2 -Gehalt immer unter 3%, auch bei Lufteinbruch in den vollen Vorratskryostaten?

Ja. Bei 60 Pellets im Vorrat liegt das H_2 -Inventar bei 0,85 bar*1, die Injektorkammer hat ca. 50 Liter Innenvolumen. Bei Lufteinbruch erreicht man somit max. 1,7 Vol-% H_2 Konzentration und bleibt sicher unter der Explosionsgrenze.

Wie genau wird N_2 gespült? Konstanter Durchfluss oder stoßweise?

Konstanter Durchfluss aus einem N_2 -Dewar mit flüssigem N_2 , das langsam verdampft und durch den Gasballast der drei Drehschieberpumpen D40 geleitet wird. Der Durchfluss-Strom ist unbekannt. Dieser muss gemessen werden und bei Bedarf muss das System modifiziert werden. Neben der Gasballast-Spülung muss auch eine Ölsumpf-Spülung installiert werden.

Volumen innerhalb des Injektors?

Ca. 50 Liter.

Bei welchen Betriebszuständen wird Alarm ausgelöst? Welche Sensoren sind in einer Sicherheitsschleife eingeschleift?

Bisher keine, noch zu machen.

Gibt es ein Explosionsschutz-Dokument?

In Garching nein (noch zu machen), in Greifswald ja.

Wird der Injektor als Zündquellenfrei definiert oder wo sind Zündquellen?

Zündquellen sind viele vorhanden, aber es wird davon ausgegangen dass entweder der Absolutdruck nie auf 300 mbar steigt beziehungsweise nie mehr als 3Vol-% H_2 -Konzentration erreicht werden.

Welche Explosionsschutzzone?

Nicht definiert.

Gibt es noch einen Schieber im Injektor?

Noch nicht, aber es wird in Greifswald einer eingebaut.

Abschätzung des Wasserstoff-Flusses in das Abgas-System (maximal / zeitgemittelt). Schnelles Ventil: Effektive Öffnungsdurchmesser, Öffnungszeit?

Siehe hierzu das Ex-Schutzdokument 1-CHD-Q0000 beziehungsweise die Sicherheitsanalyse 1-CHD-T0000.

Gasventile: Wieviele und wo genau? Normal geschlossen? Wie angesteuert?

Anschlüsse an Glasflaschen: Details?

Die Gasflaschen sind per Standard-Druckminderern angeschlossen.

Steuerung: wieviele Leitungen gehen rein? Wieviele raus? Welche Signale gehen netto rein? Liste mit: Signalart, Kabelanforderung, Logik/analog, woher kommt das Signal? Welche Signale gehen netto raus Liste mit: Signalart, Kabelanforderung, Logik/analog, wohin geht das Signal?

Zur Steuerung gibt es noch keine Details, diese soll erst in Zukunft fertiggestellt werden. Der Kabelbaum zwischen Injektor und den 2 Racks hat ca. 40 Kabel, Gesamtquerschnitt etwa 150 x 150 mm, also sehr überschaubar.

Wie werden die Pellets zum Schießen getriggert? Jedes einzeln per kurzem Puls? Oder Freigabe per langem Puls, während dem eine Sequenz von Pellets kommt solange das Signal auf aktiv steht?

Die Pellets kommen in Sequenzen, voraussichtlich in etwa 10 Hz Taktfrequenz während eines langen Freigabe-Zeitfensters. Die Zahl der Pellets kann über die Länge des Freigabe-Zeitfensters gesteuert werden. Es lassen sich auch Sequenzen von Sequenzen ansteuern, also Pulskämme von n ms Länge und dies m mal wiederholt. Wichtig ist vor Allem: die Shuttlefrequenz ist konstant, aber dafür startet das Shuttle bei Ansteuerung aus dem Ruhezustand heraus instantan und braucht keine große Anlaufzeit.

Leitungsaufnahme Elektrik Injektor? Größe der Vorpumpen, Zahl, Leistungsaufnahme?

Dominierend sind die drei D40'er Vorpumpen und die drei 360'er Turbos.

Zahl der Schaltschränke? Größe der Schaltschränke? Gewichte der Schaltschränke?

Es gibt 2 Racks mit 600 x 600 x 2000 Größe, vorne und hinten offen. Diese können auf dem EG-Boden stehen. Gewicht unbekannt, dürfte aber jeweils < 100 kg sein.

Literaturverzeichnis

- [1] Stiftung Weltbevölkerung, *Datenreport 2012*
- [2] Paul Crompton et al.: *Energy consumption in China: Past trends and future directions*. School of Economics and Commerce, 2005
- [3] U.S. Energy Information Administration, *International Energy outlook 2011*
- [4] Shahriar Shafiee et al.: *When will fossil fuel reserves be diminished*. Energy policy, Volume 37, Issue 1, 2009
- [5] Soukhanovskii et al.: *Supersonic gas jet for fueling experiments on NSTX*. ECA Volume 28B, P-2.190, 2004
- [6] Lang et al.: *The new centrifuge high-speed pellet injector for ASDEX Upgrade*. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, IPP 1/274, 1993
- [7] Lang et al.: *High-Efficiency Plasma Refuelling by Pellet Injection from the Magnetic High-Field Side into ASDEX Upgrade*. Phys. Rev. Lett. 79, 1487, 1997
- [8] Lang et al.: *Controlled High Density Operation on ASDEX Upgrade by Pellet Refueling from the Magnetic High-Field Side*. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, IPP 1/314, 1998
- [9] Lorenz et al.: *Impact strength of cryogenic deuterium pellets for injection into tokamak plasmas*. Review of scientific instruments. Vol. 71, No. 10, 2000

- [10] Dorner et al.: *Inbetriebnahme und Charakterisierung der Leidenfrost Gaskanone beim Testbetrieb am Fusionsexperiment ASDEX Upgrade*. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, IPP 1/336, 2006
- [11] Jehl et al.: *Charakterisierung des Blower Gun Pellet Injektors zur ELM-Frequenzkontrolle am Tokamak ASDEX Upgrade*. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2011
- [12] Megaw et al.: *Density and Compressibility of Solid Hydrogen and Deuterium at 4,2 K*. Nature. Vol. 138, No. 244, 1936
- [13] Woolley et al.: *Compilation of Thermal Properties of Hydrogen in Its Various Isotopic and Ortho-para Modifications*. National Bureau of Standards. Vol. 41, No. RP1932, 1948
- [14] White et al.: *The Heats of Vaporization of Para-hydrogen and Ortho-deuterium from their Boiling Points to their Critical Temperatures*. The Journal of physical chemistry. Vol. 63, No. 7, 1959
- [15] Berman et al.: *On the Latent Heat and Vapour Density of Helium*. Philosophical Magazine Series 7. Vol. 43, No. 345, 1952
- [16] Schwalbe et al.: *A Review of Deuterium Triple-Point Temperatures*. J. Phys. Chem. Ref. Data. Vol. 13, No. 3, 1984
- [17] Roder et al.: *Survey of the Prop. of the Hydrogen Isotopes Below Their Critical Temp.* National Bureau of Standards., No. 641, 1973
- [18] Zdravkovich et al.: *Flow past short circular cylinders with two free ends*. Journal of Fluid Mechanics., Vol. 203, P. 557-575, 1989
- [19] Lengyel et al.: *Estimates on the Acceleration of Pellets by Gasdynamic and Electrostatic Means*. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, IPP 4/171, 1978

- [20] Lorenz et al.: *Optimized Pellet Guiding to the Magnetic High Field Side of ASDEX Upgrade*. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, IPP 1/317, 1998
- [21] Walker: *Boiling and the Leidenfrost effect*. Cleveland State University
- [22] Burton et al.: *Geometry of the Vapor Layer Under a Leidenfrost Drop*. Physical Review Letters, PRL 109, 2012
- [23] Leidenfrost: *On the fixation of water in diverse fire*. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 9, P. 1153-1166, 1966
- [24] Müller-Steinhagen: *Wärme- und Stoffübertragung Stoffwertesammlung*. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart
- [25] Clifford et al.: *The Thermal Conductivity of Hydrogen, Deuterium and Their Mixtures Near Room Temperature within the Pressure Range 2 - 36 MPa*. Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie, Vol. 84, P. 9-18, 1980
- [26] Szepesi et al.: *Volume measurement of cryogenic deuterium pellets by Bayesian analysis of single shadowgraphy images*. Review of Scientific Instruments, Vol. 79, 2008
- [27] Leybold Vacuum: *Turbovac Operating Instructions*. GA05118-1302, 2004
- [28] Leybold Vacuum: *Trivac A Dual Stage Rotary Vane Pump Manual*. 722-78-001-L
- [29] Leybold Vacuum: *E and DK - Pumps Operating Instructions*. GA02.200/8.02, 2002
- [30] Umrath et al.: *Grundlagen der Vakuumtechnik*. Leybold Vacuum, 2002
- [31] Pfeiffer Vacuum: *Datenblatt - Digital Piezo Transmitter CPT100.*, 2013

- [32] Pfeiffer Vacuum: *Datenblatt - Digital Pirani/Bayard-Alpert Transmitter HPT100.*, 2013
- [33] Pfeiffer Vacuum: *Datenblatt - Pirani-Messröhre TPR 018.*, 2013
- [34] Pfeiffer Vacuum: *Datenblatt - Kaltkathoden-Messröhre IKR 050.*, 2013
- [35] Acebes et al.: *Pellet Injector for W7-X*. Poster, 2012
- [36] Pégourién et al.: *Homogenization of the pellet ablated material in tokamaks taking into account the B-induced drift*. Nucl. Fusion Vol. 47, p. 44-56, 2007
- [37] Bronkhorst: *Datenblatt - F113*.
- [38] Weißbart et al.: *Präsentation Blower Gun Timer*. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2013
- [39] Siemens: *SIMATIC S7-300 High Speed Boolean Processor FM 352-5.*, Bedienhandbuch, 2013
- [40] Reich et al.: *Herstellung und Untersuchung dotierter Deuterium-pellets zur Verbesserung der Brennstoffnachfüllung in Tokamak-Fusionsreaktoren*. Max-Planck- Institut für Plasmaphysik, 2001
- [41] Baldzuhn: *Der Garching Pellet-Injektor (Blower Gun) für den W7-X*. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2013
- [42] Allsbach Archiv: *IfD-Umfragen 10070*. Allsbach Institut, 2011
- [43] Kaufmann et al.: *Plasma Shielding of Hydrogen Pellets*. Nucl. Fusion, Vol. 26, No. 2, 1986