

WESTFÄLISCHE
WILHELMS-UNIVERSITÄT
MÜNSTER

Untersuchungen zum Düsensystem des WASA-at-COSY Pelletttargets

**Investigations on the Nozzle System of the WASA-at-COSY
Pellet Target**

Bachelorarbeit im Fach Physik

vorgelegt von

Florian Schepers

Institut für Kernphysik

Westfälische Wilhelms Universität Münster

Februar 2013

b

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theorie und Grundlagen	3
2.1. Das Standardmodell der Teilchenphysik	3
2.2. Symmetrie des Standardmodells	5
2.3. Wirkungsquerschnitt, Ereignisrate und Luminosität	5
2.4. Interne Targets	7
2.4.1. Gasjettarget	8
2.4.2. Clusterjettarget	9
2.4.3. Pelletttarget	9
3. WASA-at-COSY	13
3.1. Das Cooler Synchotron (COSY)	13
3.2. Das WASA-Detektorsystem	14
3.2.1. Der Vorwärtsdetektor (FD)	14
3.2.2. Der Zentraldetektor (CD)	17
3.3. Das WASA-Pelletttarget	20
3.3.1. Aufbau und Funktionsweise des Pelletttargets	21
3.4. Das Düsenhaltersystem und die Glasdüse	31
3.4.1. Das Düsenhaltersystem	31
3.4.2. Der Piezoaktor	34
3.4.3. Die Glasdüse	35
3.4.4. Störungen aufgrund des Düsenhaltersystems	36
4. Untersuchungen zum Schwingungsverhalten des Düsenhaltersystems	39
4.1. Der piezoelektrische Effekt	39
4.2. Mechanische Schwingungsmoden	41
4.3. Die Scheinwiderstandsmessung	44
4.3.1. Das Van-Dyke-Ersatzschaltbild	44
4.3.2. Umsetzung der Scheinwiderstandsmessung	49
4.3.3. Scheinwiderstandsmessung mehrerer Düsenhaltersysteme . . .	52

4.3.4. Folgerungen zu den Scheinwiderstandsmessungen an unterschiedlichen Düsenhaltersystemen	61
4.3.5. Scheinwiderstandsmessungen am WASA-Pelletttarget	62
4.3.6. Folgerungen aus den Scheinwiderstandsmessungen am WASA-Pelletttarget	72
4.4. Die Mikrofonmessungen	73
4.4.1. Aufbau zur Mikrofonmessung	73
4.5. Berechnung der mechanischen Leistung	75
4.6. Aufnahme der Intensitätsspektren	78
4.6.1. Vergleich zwischen Mikrofonmessung und Scheinwiderstandsmessung	79
4.6.2. Folgerungen aus dem Vergleich zwischen Mikrofon- und Scheinwiderstandsmessungen	86
5. Durchflussmessungen am Düsenteststand	89
5.1. Aufbau des Düsenteststandes	90
5.1.1. Berechnung des Düsendurchmessers	92
5.1.2. Ansteuerung des Piezoaktors	93
5.1.3. Die Datenaufnahme	94
5.2. Langzeitmessungen am Düsenteststand	95
5.2.1. Langzeitmessung der Düse 225	95
5.2.2. Langzeitmessung der Düse 257	98
5.2.3. Langzeitmessung der Düse 220	101
5.3. Folgerungen aus den Durchflussmessungen	103
6. Zusammenfassung und Ausblick	105
6.1. Schlussfolgerungen für das Schwingungsverhalten des Düsenhaltersystems	105
6.2. Schlussfolgerungen für die Düsenteststation	108
A. Scheinwiderstandsmessungen	111
B. Mikrofonmessungen	114
C. Literaturverzeichnis	122

1. Einleitung

Der Begriff Atom wurde um 500 vor Christus von Leukipp, einem griechischen Naturphilosophen eingeführt. Atom wird abgeleitet vom griechischen „Atomos“ (ἀτομος, unteilbar) [Sch02]. Der griechische Philosoph Demokrit (460 - 371 v. Chr.) vertrat die Annahme, Materie sei nicht unendlich oft teilbar, und postulierte das Atom als kleinstmögliches Materieteilchen [DES13]. So wurden Atome zunächst als massive, nicht zerteilbare Kugeln angesehen. Durch eine Entdeckung Rutherford's kam es zu einem Wandel dieser Vorstellung. 1906 zeigte dieser anhand eines Streuexperiments, dass Atome nicht als kleinste Bausteine der Materie gelten können, da sie sich aus einem Atomkern und einer Atomhülle zusammensetzen [DES13]. Die Atomhülle besteht dabei aus negativ geladenen Elektronen. Diese gehören zu den sogenannten Leptonen und sind nicht weiter zerlegbar. Der Atomkern wiederum besteht aus Neutronen und positiv geladenen Protonen. Diese Nukleonen, die zur Gruppe der Baryonen gehören, können abermals zerlegt werden in noch kleinere Bausteine, die Quarks. Die elektrische Ladung der positiven Protonen im Kern des Atoms und der negativen Elektronen in seiner Hülle gleichen sich aus, so dass es im Normalzustand nach außen hin elektrisch neutral ist.

Eine Beschreibung für den Aufbau der Materie ist durch das Standardmodell der Teilchenphysik gegeben [Dem10]. Forscher weltweit widmen sich der Aufgabe, das Standardmodell zu überprüfen und streben eine Vervollständigung des Modells an, um bisher fehlende Aspekte berücksichtigen zu können. Forschungsgrundlage bilden dabei die, aus Experimenten an Teilchenbeschleunigern, gewonnen Daten.

Solche Experimente werden am Forschungszentrum in Jülich mit dem WASA-at-COSY Detektor durchgeführt. Dieser wird zur Untersuchung der Produktions- und Zerfallsmechanismen von leichten Mesonen eingesetzt. Die Mesonen werden dabei durch die Wechselwirkung des Beschleunigerstrahls des *COoler SYnchrotron* mit den Teilchen, die vom Pelletttarget des *Wide Angle Shower Apparatus* bereitgestellt werden, erzeugt. Als Strahl- und Targetteilchen werden Protonen und Deuteronen verwendet. Aufgrund des gut fokussierten Beschleunigerstrahls und der großen Targetdichte des Pelletttargets können dabei Luminositäten von über $10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ erreicht werden. Diese hohen Luminositäten steigern die Wahrscheinlichkeit auch seltene Zerfälle zu beobachten. Das Pelletttarget stellt das Targetmaterial in Form

eines Strahls aus gefrorenen Wasserstoff- beziehungsweise Deuteriumtropfen zur Verfügung, die im nachfolgenden als Pellets bezeichnet werden. Aufgrund der geringen räumlichen Aufweitung des Pelletstrahls wird eine präzise Vertexrekonstruktion, sowie der Einsatz eines 4π -Detektors ermöglicht. Für die Erzeugung der Pellets verantwortlich ist der sogenannte Pelletgenerator. Darin wird zunächst durch den Einsatz einer Glasdüse mit einem Innendurchmesser von etwa $13\text{ }\mu\text{m}$ ein feiner Flüssigkeitssstrahl des Targetmaterials erzeugt. Über einen Piezoaktor, der mit dem Halter dieser Düse verbundenen ist, kann diesem Flüssigkeitsstrahl von außen eine feste Frequenz aufgeprägt werden, mit der er in einzelne Tropfen, die sogenannten Droplets, aufbricht. Das Ausfrieren der Droplets zu Pellets wird über eine anschließende Injektion ins Hochvakuum erreicht.

Die effektive Übertragung der Piezoaktorschwingungen auf den Flüssigkeitsstrahl und der störungsfreie Fluss des Targetmaterials durch die Glasdüse sind dabei für einen reibungsfreien Betrieb des WASA-Pelletttarget unerlässliche Voraussetzungen. Um optimale Betriebsbedingungen zu gewährleisten werden im Rahmen dieser Arbeit Methoden untersucht, die eine qualitative Beurteilung der Düsenhaltersysteme, bestehend aus Piezoaktor, Düsenhalter und Glasdüse, vor ihrem Einbau in das WASA-Pelletttarget ermöglichen sollen.

Dazu gehören die Verfahren der Scheinwiderstands- und Mikrofonmessung mit denen das Schwingungsverhalten von unterschiedlichen Düsenhaltersystemen untersucht werden kann und die Lage von Resonanzfrequenzen bestimmt werden können. Es soll festgestellt werden, ob die Möglichkeit besteht, mittels dieser Verfahren zu beurteilen ob ein vorliegendes Düsenhaltersystem beim späteren Einsatz im Target für den Betrieb geeignete Droplets erzeugt. Dazu werden überdies Messungen am WASA-Pelletttarget in Jülich vorgenommen, die Aufschluss über das Schwingungsverhalten des Düsenhaltersystems unter Betriebsbedingungen geben sollen.

Ferner soll mit Hilfe von Langzeitmessungen an mehreren Düsen festgestellt werden, ob sich die von C. Husmann entwickelte Düsenteststation dazu eignet Düsen zu identifizieren, die eine lange Laufzeit im Pelletttarget versprechen, ohne zu blockieren [Hus12].

2. Theorie und Grundlagen

2.1. Das Standardmodell der Teilchenphysik

Heutzutage wird in der Physik zwischen vier Grundkräften unterschieden: der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Wechselwirkung, sowie der Gravitation. Abgesehen von der Gravitation, deren Auswirkungen im Größenordnungsbereich der Elementarteilchenphysik verschwindend gering sind, ist das Standardmodell der Teilchenphysik gut zur Beschreibung dieser Kräfte geeignet [Res10]. In diesem Modell werden die drei Wechselwirkungen durch den Austausch von Vektorbosonen beschrieben, die daher auch häufig als Austauschteilchen bezeichnet werden [P⁺06]. Insgesamt sind bis heute zwölf Austauschteilchen bekannt und nachgewiesen (vgl. Tabelle 2.1). Dazu gehören acht Gluonen (g_1, \dots, g_8), welche durch die Feldtheorie der Quantenchromodynamik postuliert werden und die starke Wechselwirkung vermitteln. Gluonen tragen Farbladungen, wodurch sie in der Lage sind, miteinander wechselzuwirken, und sie unterliegen dem sogenannten Confinement. Dieses bewirkt, dass die starke Wechselwirkung, trotz der Masselosigkeit von Gluonen, auf Abstände von weniger als 1 fm begrenzt sind.

Das Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung ist das Photon, welches gleichzeitig auch eine Quantisierung der elektromagnetischen Wellen darstellt. Da das Photon masselos ist, ist die Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung unendlich groß.

Für die schwache Wechselwirkung wirken das neutrale Z-Boson Z^0 und die positiv bzw. negativ geladenen W-Bosonen W^+ und W^- als Austauschteilchen. Diese tragen Masse, wodurch die Reichweite der schwachen Wechselwirkung auf Distanzen von bis zu 10^{-3} fm begrenzt wird.

Als elementare Bausteine für die Materie werden im Standardmodell zwölf Spin- $\frac{1}{2}$ Teilchen, also Fermionen, und ihre Antiteilchen verwendet (vgl. Tabelle 2.2). Die Fermionen, die der starken Wechselwirkung unterliegen, werden Quarks genannt, während die anderen, die ihr nicht unterliegen, Leptonen heißen.

Die starke Wechselwirkung, die neben den Quarks auch die Gluonen unterliegen, wird mit Hilfe der Quantenchromodynamik beschrieben. Jedes Quark trägt eine ro-

Wechselwirkung	koppelt an	Austauschteilchen	Masse (GeV/c ²)	I^P
stark	Farbladung	8 Gluonen	0	1^+
elektro-magnetisch	elektrische Ladung	1 Photon	0	1^+
schwach	schwache Ladung	W^\pm, Z^0	80, 90	1

Tabelle 2.1.: Die drei Wechselwirkungen des Standardmodells und ihre Austauschteilchen nach [Dem10].

te, grüne oder blaue Farbladung und kann nur in einem gebundenen Zustand mit anderen Teilchen auftreten. Dieser Zustand muss nach außen hin farbneutral, also weiß sein [Ber06].

Die aus Quarks gebildeten Zustände werden Hadronen genannt. Es gibt zwei Möglichkeiten Quarks zu farbneutralen Teilchen zu kombinieren. Die erste Möglichkeit ist der Zusammenschluss eines Quarks mit einem Antiquark entsprechender Antifarbe. Hadronen, die aus einer solchen Quark-Antiquark-Paarbildung bestehen, werden als Mesonen bezeichnet und besitzen einen ganzzahligen Gesamtspin.

Die zweite Möglichkeit zur Bildung von Hadronen ist die Zusammensetzung aus drei Quarks mit jeweils unterschiedlicher Farbe, beziehungsweise aus drei Antiquarks mit jeweils unterschiedlicher Antifarbe. Die Kombination aus allen drei Farben, rot, grün und blau, beziehungsweise deren Antifarben, antirot, antigrün und antiblau, ergibt einen weißen Zustand. Teilchen, die aus drei Quarks gebildet werden, heißen Baryo-

Fermionen	Familie			elektrische Ladung	Farbe	Spin
	1	2	3			
Leptonen	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	-	$1/2$
	e^-	μ^-	τ^-	-1	-	$1/2$
Quarks	u	c	t	+2/3	r, g, b	$1/2$
	d	s	b	-1/3	r, g, b	$1/2$

Tabelle 2.2.: Die zwölf elementaren Materie-Bausteine geordnet nach ihren Familien [Dem10].

nen. Die Kombinationen aus drei Antiquarks werden dementsprechend Antibaryonen genannt. Sowohl Baryonen als auch Antibaryonen besitzen einen halbzahligen Gesamtspin. Bekannte Beispiele für Baryonen sind die Nukleonen, wie das Proton oder das Neutron.

2.2. Symmetrie des Standardmodells

Im Rahmen des Standardmodells lassen sich für die drei Wechselwirkungen Symmetrien und Erhaltungsgrößen vorhersagen. So sind für alle drei die Energie E , der Impuls p , der Drehimpuls L und die Ladung Q Erhaltungsgrößen. Ferner sind die Baryonenzahl B und die drei Leptonenfamilienzahlen L_e, L_μ und L_τ für alle Wechselwirkungen des Standardmodells erhalten [P⁺06].

Die Parität P und die Ladungskonjugation C hingegen sind nur Erhaltungsgrößen der elektromagnetischen und der starken Wechselwirkung. Wobei die Parität das Verhalten eines physikalischen Systems unter Raumspiegelung beschreibt und die Ladungskonjugation die Teilchen eines Systems in ihre entsprechenden Antiteilchen überführt. Das bedeutet, dass Prozesse der elektromagnetischen und der starken Wechselwirkung dem Standardmodell zufolge unter Raum- bzw. Ladungsspiegelung invariant sind. Für Prozesse der schwachen Wechselwirkung trifft dies nicht zu. Darüber hinaus ist auch das Produkt aus Parität und Ladungskonjugation, die CP -Parität, in der schwachen Wechselwirkung nicht erhalten. Über dies haben Beobachtungen gezeigt, dass die schwache Wechselwirkung nicht symmetrisch unter Zeitumkehrung T ist. Dem CPT -Theorem zufolge sind das Produkt aus Parität, Ladungskonjugation und T -Symmetrie, bei allen drei Wechselwirkungen erhalten. Eine Auflistung der Erhaltungsgrößen mit Angabe für welche Wechselwirkungen sie gelten ist in Tabelle 2.3 gegeben.

Die durch das Standardmodell postulierten Symmetrien und Erhaltungssätze werden immer wieder auf den Prüfstand gestellt, da jeder Verstoß gegen sie auf Physik jenseits des Standardmodells hinweisen würde.

2.3. Wirkungsquerschnitt, Ereignisrate und Luminosität

In der Kern- und Teilchenphysik wird die Wahrscheinlichkeit, dass es zwischen einem einfallenden Teilchen (Projektil) und einem anderen Teilchen (Target) zu einer be-

Erhaltungsgröße	el.-mag.	schwache	starke
	W.W.	W.W.	W.W.
Energie	ja	ja	ja
Impuls	ja	ja	ja
Drehimpuls	ja	ja	ja
Baryonenzahl B	ja	ja	ja
Leptonenzahl L	ja	ja	ja
Parität P	ja	nein	ja
Ladungskonjugation C	ja	nein	ja
Produkt $C \cdot P$	ja	nein	ja
Zeitspiegelinvarianz T	ja	nein	ja
Produkt $C \cdot P \cdot T$	ja	ja	ja

Tabelle 2.3.: Erhaltungsgrößen bezüglich der drei Wechselwirkungen des Standardmodells nach [Dem10].

stimmten Wechselwirkung kommt, mit Hilfe des Wirkungsquerschnittes σ beschrieben [P⁺06]. Dieser wird in der Größeneinheit Barn ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$) angegeben und besitzt die Dimension einer Fläche. Anschaulich lässt sich der Wirkungsquerschnitt für eine bestimmte Reaktion als eine dem Target zugeordnete Trefferfläche vorstellen. Dabei wäre jedes Targetteilchen von einer Fläche mit der Größe des Wirkungsquerschnittes umgeben und es würde immer dann zu der entsprechenden Reaktion kommen, wenn diese Fläche von einem einfallenden, punktförmigen Teilchen getroffen wird. Ein großer Wirkungsquerschnitt entspricht somit einer häufig auftretenden Reaktion und ein kleiner Wirkungsquerschnitt einer selteneren Reaktion.

Um auch seltene Reaktionen mit einer genügend großen Statistik untersuchen zu können, muss eine ausreichend hohe Anzahl an Projektil- und Targetteilchen vorhanden sein. Dabei darf die Summe der Reaktionsraten aller auftretenden Reaktionen jedoch nicht zu groß werden, da ansonsten die Wahrscheinlichkeit steigt, dass mehrere Reaktionen in so kurzer Zeit, hintereinander auftreten, dass sie sich im Rahmen der Zeitauflösung des Detektorsystems überlagern.

Die Reaktionsrate \dot{N} am Interaktionspunkt für eine Reaktion mit dem Wirkungsquerschnitt σ ist gegeben durch [Dem10]

$$\dot{N} = \frac{N_B \cdot N_T}{A} \cdot f \cdot \sigma. \quad (2.3.1)$$

Dabei stehen N_B für die Anzahl der Strahlteilchen im Beschleunigerring und N_T für die Anzahl der im Strahl befindlichen Targetteilchen. A steht für die Strahlquerschnittsfläche und f für die Umlauffrequenz.

Der Proportionalitätsfaktor

$$L = \frac{N_B \cdot N_T}{A} \cdot f \quad (2.3.2)$$

zwischen Reaktionsrate und Wirkungsquerschnitt wird als Luminosität bezeichnet und ist ein Maß für die Anzahl der Teilchenbegegnungen pro Zeit und Fläche.

Aus Gleichung 2.3.2 ergibt sich, dass die Luminosität proportional zur Flächendichte $\rho_T = \frac{N_T}{A}$ des Targets ist:

$$L = \rho_T \cdot N_B \cdot f \quad (2.3.3)$$

Folglich ist auch die Reaktionsrate proportional zur Flächendichte des verwendeten Targets:

$$\dot{N} = \rho_T \cdot N_B \cdot f \cdot \sigma. \quad (2.3.4)$$

Die Art eines Targets hat also einen signifikanten Einfluss auf die Statistik der Messungen. In Abschnitt 2.4 wird eine knappe Vorstellung des Gasjet-, Clusterjet- und Pelletttargets gegeben, in der auch die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen internen Targettypen kurz erwähnt werden sollen.

2.4. Interne Targets

Bei internen Targets handelt es sich um Targets, welche direkt im Beschleunigerring aufgebaut sind [Eks95]. Sie sind, anders als zum Beispiel die externen Targets, so konzipiert, dass bei jedem Umlauf immer nur ein Teil des Beschleunigerstrahls mit dem Targetmaterial interagiert. So durchläuft ein Beschleunigerstrahl mehrfach den Ring und trifft dabei immer wieder auf das Target. Die Targetdichte ist dabei von besonderer Bedeutung (vgl. Abschnitt 2.3). Wenn sie zu hoch ist, wird der Beschleunigerstrahl durch das Target zu stark abgelenkt und die Impulsverschmierung des Strahls nimmt zu. Außerdem kann es zu mehrfachen gleichzeitigen Reaktionen am Interaktionspunkt kommen, die sich anschließend im Detektorsystem überlagern und in der Auswertung nur schwer voneinander zu trennen sind. Ist die Targetdichte wiederum zu gering, so sinkt die Reaktionsrate und die Messdauer wird erhöht. Exemplarisch für interne Targets sollen im Nachfolgenden kurz die Funktionsweisen des Gasjet-, Clusterjet und Pelletttargets vorgestellt werden. Da das Pelletttarget eine besondere Rolle in dieser Arbeit einnimmt, wird dieses in Abschnitt 3.3 zusätzlich noch einmal am Beispiel des WASA-at-COSY-Pelletttargets detailliert beschrieben.

2.4.1. Gasjettarget

Eine mögliche Form eines internen Targets stellt das Gasjetttarget dar. Eine schematische Darstellung von diesem ist in Abbildung 2.1 gegeben.

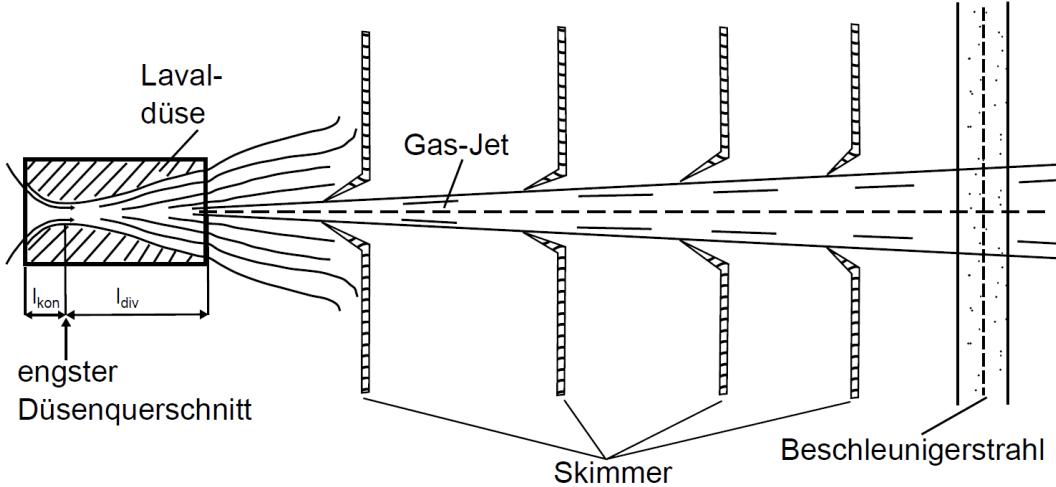


Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung eines Gasjetttargets mit den eingezeichneten Längen l_{kon} und l_{div} für den konvergenten und divergenten Teil der Lavaldüse [GBF⁺89].

Im Gasjetttarget wird zur Erzeugung eines gebündelten Gasstrahls eine Kombination aus einer Lavaldüse und mehreren Skimmern verwendet [GBF⁺89]. Die Lavaldüse sorgt aufgrund ihrer besonderen konvergenten Eingangs- und divergenten Ausgangsform dafür, dass die thermische Energie des Gases, also der transversale Bewegungsanteil der Gasteilchen, in kinetische Energie in Strahlrichtung umgewandelt wird. Es entsteht ein gerichteter Gasstrahl. Dieser behält allerdings stets eine gewisse Resttemperatur, welche dafür sorgt, dass sich der Strahl mit der Zeit wieder aufweitet. Um die Temperatur des Strahls weiter zu senken und ihn fokussiert zu halten, werden mehrere hintereinander aufgebaute Skimmer verwendet. Diese lassen nur den inneren, stark gerichteten Bereich des Strahls durch, während sie die äußeren Teilchen mit hohen transversalen Geschwindigkeiten abfangen. Zwischen den Skimmerebenen wird dabei der Druck schrittweise gesenkt, so dass dieser nach der letzten Skimmerebene auf einem für den Beschleunigerstrahl notwendigem Niveau ist.

Vorteile des Gasjetttargets sind, dass es bei Raumtemperatur betrieben werden kann und am Interaktionspunkt ein zeitlich konstantes und homogen verteiltes Target zur Verfügung stellt. Aufgrund der stetigen Aufweitung des Strahls ist der Abstand zwis-

schen Target und Wechselwirkungspunkt jedoch auf unter einen Meter begrenzt, da bei größerem Abstand die auftretende Targetdichte zu gering ist. Dadurch werden die räumlichen Möglichkeiten für den Aufbau eines Detektorsystems stark eingeschränkt.

2.4.2. Clusterjetttarget

Nach einem ähnlichen Prinzip wie das Gasjetttarget arbeitet das Clusterjetttarget. Auch hier wird eine Lavaldüse benutzt, um einen gerichteten Strahl zu erzeugen (vgl. Abbildung 2.2) [K⁺13]. In Beschleunigerexperimenten wird häufig Wasserstoff- oder Deuteriumgas verwendet. In diesem Fall das Gas vor der Lavaldüse bereits auf eine Temperatur von 20 bis 50 K herab gekühlt. Es wird dann durch die Lavaldüse in die dahinter liegende Vakuumkammer gepresst. Dabei erreicht das Gas in der Lavaldüse Überschallgeschwindigkeit.

Aufgrund der adiabatischen Expansion im divergenten Bereich der Düse kondensiert ein Teil der Gasmoleküle über Drei-Körper-Stöße zu Clustern, welche in diesem Fall durch Van-der-Waals Kräfte zusammengehalten werden. Die Gasmoleküle, welche keine Cluster gebildet haben, werden mit Hilfe eines Skimmer vom Clusterstrahl getrennt und anschließend über ein Pumpsystem abgepumpt. Mit Hilfe eines Kolimators kann dem Strahl zusätzlich eine gewünschte Form gegeben werden. So ist es möglich bei geringer Restgasproduktion eine hohe Überschneidung zwischen Beschleunigerstrahl und Clusterstrahl zu erreichen.

Der Vorteil des Clusterstrahls gegenüber dem Gasstrahl des Gasjetttargets liegt darin, dass er über wesentlich weitere Strecken gebündelt bleibt und sich nur langsam aufweitert. Dadurch ist es möglich auch bei einem Düsenabstand von über zwei Metern Targetdichten von 10^{15} Atome/cm² zu erreichen [T⁺11].

2.4.3. Pelletttarget

Ein weiterer interner Targettyp ist das Pelletttarget. Eine schematische Darstellung von diesem ist in Abbildung 2.3 gegeben. Das Target kann wahlweise mit Wasserstoff oder Deuterium betrieben werden [E⁺96]. Der Einfachheit halber wird im nachfolgenden Text die Funktionsweise am Beispiel von Wasserstoff erklärt. Der Betrieb mit Deuterium ist identisch, abweichende Betriebsparameter sind in Klammern angegeben.

Bei einer Temperatur von 14 K (17 K bei Deuterium) wird Wasserstoff durch eine Glasdüse gepresst, deren Innendurchmesser sich zur Spitze hin auf 13 μm verengt.

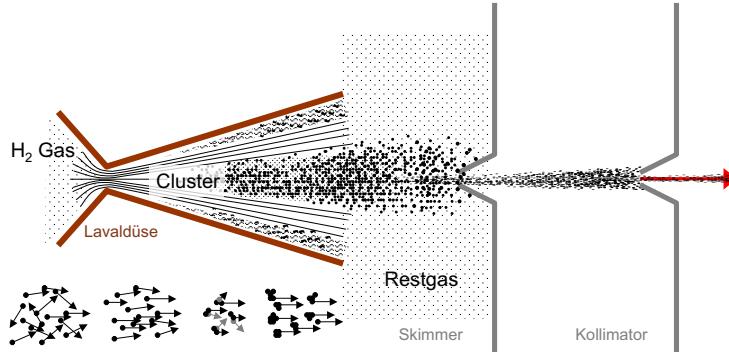


Abbildung 2.2.: Erzeugung eines Clusterstrahls mit Hilfe einer Lavaldüse [K⁺13]. Die Überschall schnellen Teilchen formen über Drei-Körper-Stöße Cluster. Über den Skimmer und den Collimator kann der Strahl extrahiert und geformt werden.

Über einen mit der Düse verbundenen Piezoaktor wird die Glasdüse in Schwingungen versetzt, was zu einem periodischen Aufbrechen des Wasserstoffstrahls in kleine Tropfen führt. Diese Tropfen werden im Nachfolgenden Droplets genannt. Direkt hinter der Düse befindet sich eine mit Helium gefüllte Kammer, in der ein Druck von etwa 20 mbar herrscht. Dieser verhältnismäßig hohe Druck bewirkt, dass der Wasserstoff in der Düse nicht gefriert und diese verstopft. Über eine Vakuuminjektionskapillare gelangen die Droplets in eine Vakuumkammer mit einem Druck von etwa 10⁻³ mbar. Durch den großen Druckunterschied zwischen den beiden Kammern gefrieren die Droplets zu sogenannten Pellets und werden beschleunigt. Gleichzeitig sorgt die hohe Druckdifferenz auch für turbulente Gasströmungen in der Vakuuminjektionskapillare, die dazu führen, dass sich der entstehende Dropletstrahl aufweitet. Durch den Einsatz eines Skimmers, der auf die Vakuuminjektion folgt, kann die Aufweitung des Strahls wieder verringert werden.

Da die Pellets mit einer Austrittsgeschwindigkeit von 60 ms⁻¹ bis 100 ms⁻¹ relativ langsam sind, sollte das Pelletttarget senkrecht aufgebaut werden [Nor05]. Der große Vorteil des Pelletttargets ist, dass sich der Pelletstrahl auch über weite Distanzen nur geringfügig aufweitet und so Raum für ein ausgedehntes Detektorsystem lässt. So bleibt der Strahl zum Beispiel bei einer Distanz zwischen Target und Wechsel-

wirkungspunkt von über zwei Metern noch auf einen Durchmesser von zwei bis vier Millimeter beschränkt. Dies ermöglicht eine präzise Bestimmung der Vertexregion und somit eine bessere Impulsauflösung.

Bei dem in Abschnitt 3 vorgestellten Experiment WASA-at-COSY handelt es sich derzeit um das weltweit einzige Experiment mit einem Pelletttarget im Beschleunigerbetrieb. Eine detaillierte Beschreibung von diesem ist in Abschnitt 3.3 gegeben.

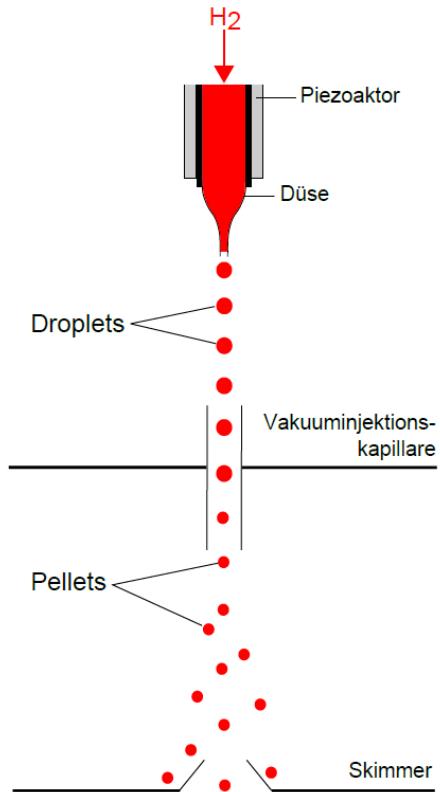


Abbildung 2.3.: Vereinfachte Darstellung eines Pelletgenerators [Hus12]. Mit Hilfe des Piezoaktors wird ein regelmäßiger Dropletstrahl erzeugt, dessen Droplets beim Übergang durch die Vakuuminjektionskapillare ins Vakuum zu Pellets gefrieren.

3. WASA-at-COSY

Das Wide Angle Shower Apparatus (WASA) Experiment wurde ursprünglich für den CELSIUS-Beschleuniger in Uppsala, Schweden, zur Produktion und Untersuchung leichter Mesonen und ihrer Zerfälle entwickelt [A⁺04]. Dabei handelte es sich bei den leichten Mesonen hauptsächlich um über Proton-Proton und Proton-Deuteron Interaktionen hergestellte Pionen und η -Mesonen. Ihre Produktion ermöglicht neue Einblicke in die Nukleon-Nukleon Interaktion und über die Untersuchung ihrer seltenen Zerfälle besteht die Möglichkeit einer Überprüfung des Standardmodells.

Nach der Schließung des CELSIUS-Beschleunigers (Cooling with Electrons and Sto-ring of Ions from the Uppsala Synchrocyclotron) im Jahr 2005 wurde WASA zum Cooler Synchrotron (COSY) in Jülich gebracht und dort im Jahr 2006 mit einigen Änderungen wieder in Betrieb genommen [Win11].

Das WASA-Experiment lässt sich in das Detektorsystem und das Pelletttarget unterteilen. Dabei zeichnet sich das Detektorsystem durch seine hohe geometrische Akzeptanz von 96% aus und wird daher auch als 4π -Detektor bezeichnet. Eine genauere Beschreibung des Detektorsystems, in der Form wie es heute in Betrieb ist, ist in Abschnitt 3.2 gegeben.

Das für das WASA-Experiment entwickelte Pelletttarget stellt derzeit das einzige im Beschleunigerbetrieb aktiv verwendete Pelletttarget weltweit dar. Es ist in der Lage sowohl Wasserstoff- als auch Deuteriumpellets mit Dichten von mehr als 10^{15} Atome/cm² zu produzieren, so dass am COSY-Beschleuniger Luminositäten von über 10^{31} cm⁻²s⁻¹ erreicht werden können. Da das Pelletttarget eine besondere Rolle in dieser Arbeit einnimmt, wird es in Abschnitt 3.3 genauer beschrieben.

3.1. Das Cooler Synchotron (COSY)

Der Teilchenbeschleuniger Cooler Synchrotron (COSY) (vgl. Abbildung 3.1) wird am Institut für Kernphysik am Forschungszentrum Jülich (FZJ) betrieben. Er ist in der Lage sowohl polarisierte als auch unpolarisierte Protonen und Deuteronen auf Impulse von $0,3 \text{ GeV c}^{-1}$ bis $3,7 \text{ GeV c}^{-1}$ zu beschleunigen [A⁺04]. Zur Minimierung des Phasenraumvolumens des Strahls stehen am COSY je nach Impulsbereich der

Teilchen zwei unterschiedliche Strahlkühlungsmethoden zur Verfügung. Für Strahlen mit Energien im Bereich der Injektionsenergie, d.h. mit Impulsen bis zu $0,6 \text{ GeV c}^{-1}$, wird die Elektronenkühlung verwendet [Mai97]. Bei höherenergetischen Strahlen mit Teilchenimpulsen von $1,5 \text{ GeV c}^{-1}$ bis $3,3 \text{ GeV c}^{-1}$ kommt die stochastische Kühlung zum Einsatz.

Zusammengesetzt ist der COSY-Aufbau aus einer Ionenquelle, dem Zyklotron JU-LIC, einer Injektions Beam Line, dem Speicherring, mehreren internen und externen Experimentierstationen und den Aufbauten zur Strahlkühlung.

Die Ionenquelle erzeugt über die Kollision von Protonen bzw. Deuteronen mit einem Caesiumstrahl H^- bzw. D^- -Ionen, welche anschließend in den Zyklotron JULIC eingespeist werden [G⁺04, S⁺97]. Dieser beschleunigt sie auf Energien von 45 MeV bzw. 90 MeV. Bevor sie über die Injektions Beam Line in den Speicherring geleitet werden, durchlaufen sie eine Kohlenstofffolie, an der ihre Elektronen abstreift werden und nur ihre positiv geladenen Kerne übrig bleiben. Der Speicherring hat einen Umfang von 184 m und kann bis zu 10^{11} Teilchen aufnehmen. Er besitzt zwei 40 m lange, gerade Abschnitte an denen verschiedene interne Experimente, sowie die zur Strahlkühlung verwendeten Aufbauten Platz finden. Derzeit sind die internen Experimente WASA und ANKE, das Strahlpolarimeter EDDA und das externe Experiment COSY-TOF an der COSY-Anlage aufgebaut.

3.2. Das WASA-Detektorsystem

Das 4π -Detektorsystem von WASA besteht aus zwei Komponenten: Dem Vorwärtsdetektor, der zur Messung von Teilchen mit großen Impulsen in Strahlrichtung verwendet wird, und dem Zentraldetektor, der zum Nachweis der Zerfallsprodukte von π^0 und η -Mesonen benötigt wird [A⁺04].

Der Aufbau dieser beiden Detektorsysteme ist in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt und wird im Nachfolgenden grundlegend erklärt. Eine detaillierte Beschreibung des Detektorsystems ist in [A⁺04] zu finden.

3.2.1. Der Vorwärtsdetektor (FD)

Der Vorwärtsdetektor wurde entwickelt, um Teilchen mit großen Impulsen in Strahlrichtung zu detektieren und zu identifizieren, die zum Beispiel bei Reaktionen zur Produktion von π - und η -Mesonen entstehen. Bei diesen Teilchen handelt es sich zumeist um schwere geladene Teilchen wie Protonen, Deuteronen und Heliumkerne.

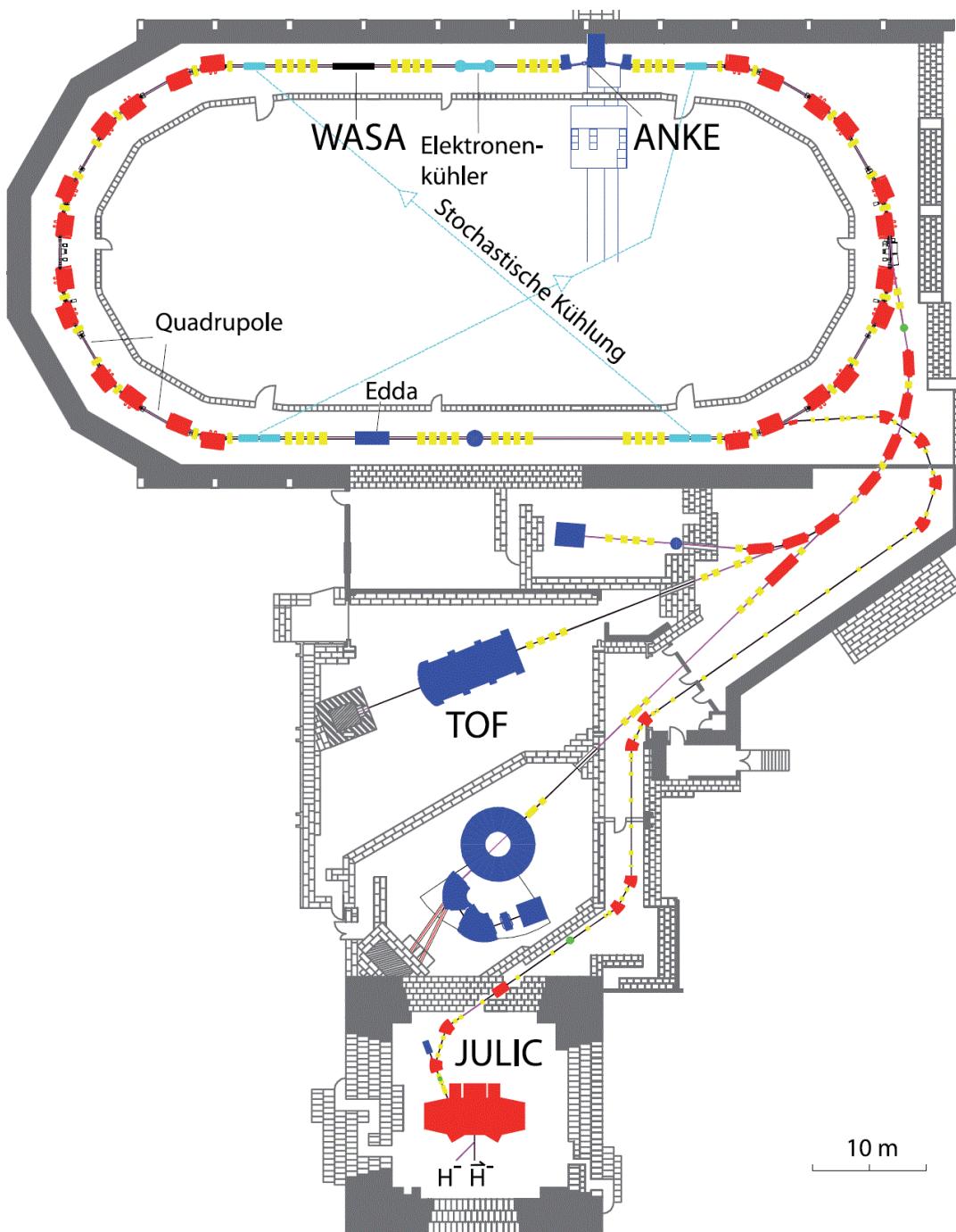


Abbildung 3.1.: Schematische Zeichnung der Beschleunigeranlage COSY am Forschungszentrum Jülich entnommen aus [Hus12] nach [A⁺04]. Dargestellt sind die Ionenquellen, das Zyklotron JULIC, der Speicherring, sowie die an diesem befindlichen internen Experimente WASA und ANKE, das Stahlpolarimeter EDDA und das externe Experiment COSY-TOF.

3. WASA-at-COSY

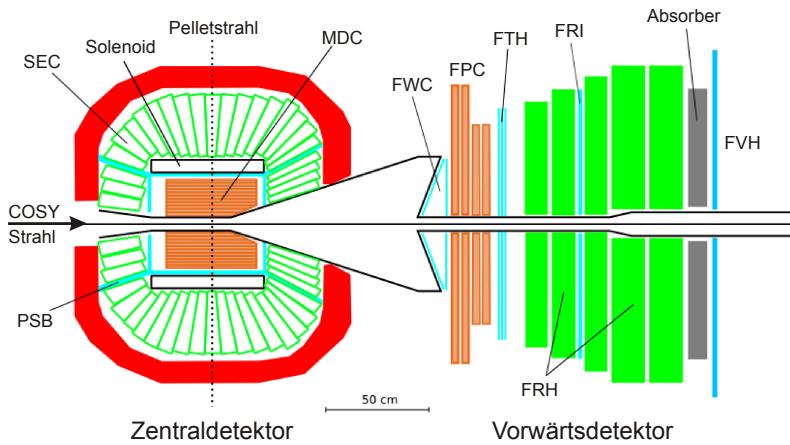


Abbildung 3.2.: Schematische Darstellung des Detektorsystems des WASA Experimentaufbaus entnommen aus [Hus12] nach [A⁺04]. Zu sehen ist der Zentraldetektor, welcher radial um den Interaktionspunkt, an dem sich COSY- und Pelletstrahl kreuzen, gebaut ist, sowie der in COSY-Strahlrichtung folgende Vorwärtsdetektor.

Es können aber auch Neutronen und geladene Pionen nachgewiesen werden.
Der Vorwärtsdetektor besteht aus mehreren Schichten unterschiedlicher Detektoren.

- In der ersten Schicht in Strahlrichtung befindet sich der *Forward Window Counter (FWC)*. Dieser, aus 12,5 mm dicken Szintillatoren zusammen gesetzte Detektor, liefert Triggersignale erster Stufe.
- Auf den FWC folgt die *Forward Proportional Chamber (FPC)*, welche zur Spurrekonstruktion dient. Sie ist aufgebaut aus vier hintereinanderliegenden Modulen mit je vier Lagen aus 122 Proportionaldriftkammern. Die Module sind in der Ebene senkrecht zur Strahlrichtung um 45° zueinander gedreht und werden zur Bestimmung der Spurkoordinaten und des Streuwinkels am Wechselwirkungspunkt verwendet.
- Die nächste Lage bildet das *Forward Trigger Hodoscope (FTH)*, welches Triggersignale zur Reduzierung des Untergrundes liefert. Es besteht aus drei Lagen mit 5 mm dicken Szintilationsdetektoren. Die ersten beiden Lagen sind spiralförmig strukturiert und enthalten je 24 Detektorelemente. Die Krümmungsrichtung der Detektorelemente in einer Lage ist dabei jeweils entgegengesetzt zu der Krümmungsrichtung in der anderen Lage. Die dritte Lage hat eine radiale Symmetriestruktur und besteht aus 48 Detektorelementen. Durch diese

besondere Geometrie der drei Lagen ist es möglich mehrere gleichzeitige Treffer auszuwerten.

- Zur Identifikation und Energiebestimmung, anhand der $\Delta E - E$ Technik, von geladenen Teilchen wird zusammen mit dem FTH das *Forward Range Hodoscope (FRH)* verwendet. Dieses befindet sich direkt hinter dem FTH und besteht aus fünf Lagen mit je 24 Szintillatoren. Dabei besitzen die vorderen drei Szintillatoren 11 cm und die hinteren beiden 15 cm.
- Zwischen der zweiten und dritten Lage des FRH befindet sich das *Forward Range Interleaving Hodoscope (FRI)* [Demm10]. Es besteht aus zwei gekreuzten Lagen mit je 32 5,2 mm dicken Szintillationsdetektoren und wird für eine zweidimensionale Positionsbestimmung der Teilchen innerhalb des FRH verwendet. Diese Position wird zur Bestimmung der Streuwinkel von Neutronen benötigt.
- Die letzte Detektorenlage des Vorwärtssystems ist das *Forward Veto Hodoscope (FVH)*. Es besteht aus zwölf horizontal angebrachten Szintillationsdetektoren, mit deren Hilfe Teilchen gemessen werden, die das FRH durchdrungen haben und daher bereits auf der Triggerebene mit einem Veto belegt werden sollen.
- Es besteht die Option zwischen dem FRH und dem FVH einen Absorber aus Eisen einzusetzen, dessen Dicke von 5 mm bis 100 mm variieren kann. Mit Hilfe des Absorbers können zum Beispiel Protonen der Reaktion $pp \rightarrow pp\eta$, die das FRH durchdrungen haben, gestoppt werden. Die Protonen des Beschleunigerstrahls, die elastisch gestreut wurden, gelangen jedoch aufgrund ihrer hohen Energie den Absorber und können im FVH nachgewiesen und mit einem Veto belegt werden.

3.2.2. Der Zentraldetektor (CD)

Der Zentraldetektor ist in erster Linie entwickelt worden, um die Zerfallsprodukte von π^0 und η -Mesonen, wie Photonen, Elektronen und geladene Pionen, zu messen und zu identifizieren. Er ist in mehreren Schichten rund um den Interaktionspunkt aufgebaut und wird nur durch eine Leitung zur Heliumkühlung des Solenoidmagnets, sowie den Durchführungen des Strahl- und des Pelletrohrs unterbrochen. Dadurch erreicht der Zentraldetektor eine sehr hohe geometrische Aktzeptanz und wird oft auch als 4π -Detektor bezeichnet.

Des Weiteren ist der Zentraldetektor in der Lage Photonen über einen Energiebereich von einigen MeV bis zu 800 MeV zu messen. Er kann außerdem den Impuls von Elektronen und Positronen in einem Impulsbereich von etwa 20 MeV c^{-1} bis 600 MeV c^{-1} bis auf zwei Prozent genau bestimmen.

Wie oben bereits erwähnt, ist der Zentraldetektor in mehrere Schichten unterteilt, die im Nachfolgenden genauer beschrieben werden:

- Die innerste Schicht bildet die *Mini Drift Chamber (MDC)*. Sie besteht aus insgesamt 1738 Driftröhren, die in 17 Lagen zylinderförmig um das Strahlrohr aufgebaut sind. In neun der 17 Lagen verlaufen die Driftröhren parallel zum Strahlrohr. Die anderen Röhren sind um 6° bis 9° gegenüber der Strahlachse verdreht. Durch diesen besonderen Aufbau können über die Trefferpunkte die Teilchenspuren und der Vertex rekonstruiert werden. Die Mini Drift Chamber und der Interaktionspunkt befinden sich in dem Magnetfeld eines supraleitenden Solenoiden (siehe unten). Daher kann für geladene Teilchen über die Krümmung Ihrer Flugbahn der Impuls berechnet werden.
- Die MDC ist umgeben von dem *Plastic Scintillator Barrel (PSB)*. Es besteht aus drei Segmenten: Einem zylindrischen Element, das um die MDC gelegt ist, und zwei kreisförmigen Segmenten mit extra Öffnungen für das Strahlrohr, die an den beiden Seiten der MDC angebracht sind. Insgesamt ist das PSB aus 146 8 mm dicken Szinzillatorstreifen aufgebaut, die sich an ihren Übergängen überlappen, so dass keine Lücken zwischen den Streifen entstehen.
Das PSB liefert Triggersignale erster Stufe und wird in Kombination mit der MDC und dem Scintillator Electromagnetic Calorimeter (siehe unten) verwendet, um geladene Teilchen über die $\Delta E - p$ und $\Delta E - E$ Methode zu identifizieren. Es wird außerdem als Veto für die Photon-Identifikation verwendet.
- Um mittels der MDC den Impuls von geladenen Teilchen bestimmen zu können, wird ein starkes Magnetfeld benötigt, welches die Teilchen auf Kreisbahnen zwingt. Zur Erzeugung dieses Magnetfeldes befindet sich um das PSB der *Superconducting Solenoid (SCS)*. Dieser erzeugt ein Magnetfeld von bis zu 1,3 T und wird nach außen hin durch ein fünf Tonnen schweres Eisenjoch abgeschirmt. Der Solenoid besteht aus supraleitendem NbTi/Cu und wird zum Betrieb mittels flüssigem Helium auf 4,5 K heruntergekühlt. Um eine hohe Genauigkeit bei den Energiemessungen über das Scintillator Electromagnetic Calorimeter (siehe unten) zu gewährleisten, ist der Solenoid möglichst dünn gehalten.

- Zur Messung der Energie von Photonen, Elektronen und Positronen mit einer Energie von bis zu 800 MeV befindet sich zwischen dem SCS und dem Eisenjoch das *Scintillator Electromagnetic Calorimeter (SEC)*. Es besteht aus insgesamt 1012 natriumdotierten Cäsiumiodid-Kristallen ($\text{CsI}(\text{Na})$), welche um den Interaktionspunkt angeordnet sind, und deckt einen Streuwinkel von 20° bis 169° ab. Der Schwellwert des SEC zur Messung von Photonen liegt bei 2 MeV.

3.3. Das WASA-Pelletttarget

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, handelt es sich bei dem WASA-Pelletttarget zur Zeit um das weltweit einzige Pelletttarget im Beschleunigerbetrieb [A⁺⁰⁴, Nor04]. Es wurde speziell für den WASA-Experimentaufbau entwickelt und muss dafür einige besondere Anforderungen erfüllen [E⁺⁹⁶]. So muss die Strahlaufweitung des Pelletstrahls möglichst gering sein, da aufgrund des 4π -Detektoraufbaus, welcher den Interaktionspunkt umgibt, die Pellets durch eine 5 mm dünne und 2 m lange Rohrleitung bis zum Interaktionspunkt geleitet werden müssen. Außerdem bewirkt eine geringe Strahlaufweitung am Interaktionspunkt eine kleine Vertexregion, wodurch eine gute Impulsauflösung ermöglicht wird.

An die Targetdichte sind ebenfalls besondere Anforderungen gestellt. So muss sie ausreichend groß sein, um akzeptable Ereignisraten zu gewährleisten, während sie andererseits nicht zu groß werden darf, da sie ansonsten zu einer zu großen Impulsverschmierung und einer kurzen Lebensdauer des Beschleunigerstrahls führt.

Das WASA-Pelletttarget ist genau an diese Anforderungen angepasst. Die Strahlaufweitung des Pelletstrahls liegt am Interaktionspunkt bei 2 mm bis 4 mm, wobei der Pelletgenerator über zwei Meter vom Interaktionspunkt entfernt ist [A⁺⁰⁴]. Die Targetdichte liegt sowohl beim Betrieb mit Wasserstoff als auch beim Betrieb mit Deuterium bei mehr als 10^{15} Atome/cm², so dass an COSY Luminositäten von mehr als 10^{-31} cm⁻² s⁻¹ erreicht werden können [A⁺⁰⁴]. Die wichtigsten Betriebsparameter des WASA-Pelletttargets sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Targematerial	H ₂ /D ₂
Betriebstemperatur	≈ 14 K
Targetdicke	>10 ¹⁵ Atome/cm ²
Pelletdurchmesser	≈ (25-35) μm
Pelletfrequenz	(5-12) kHz
Pelletgeschwindigkeit	(60-80) m s ⁻¹
Durchmesser des Pelletstrahls am Interaktionspunkt	(2-4) mm

Tabelle 3.1.: Wichtige Betriebsparameter des WASA-Pelletttargets [A⁺⁰⁴, E⁺⁹⁶]

3.3.1. Aufbau und Funktionsweise des Pelletttargets

Die Generierung des Pelletstrahls unterteilt sich in mehrere Stufen. So werden mit Hilfe eines Kaltkopfes und eines speziellen Düsenhaltersystems zunächst Droplets erzeugt, die anschließend beim Übergang ins Vakuum durch die Vakuumkapillare zu Pellets gefrieren. Mit Hilfe eines Skimmers wird der Strahl kollimiert und über das zwei Meter lange Strahlrohr bis zum Interaktionspunkt geführt. Um durch Restgase verursachte Untergrundreaktionen zu reduzieren, befindet sich unterhalb des Interaktionspunktes der Beam Dump. Dieser fängt die Pellets auf, lässt sie verdampfen und pumpt das dabei entstehende Gas ab.

Eine technische 3D-Darstellung des WASA-Pelletttargets ist in Abbildung 3.3 gegeben. Dort sind neben einigen der Bereits oben erwähnten Komponenten zwei Justierische (Koordinatentische) zu sehen. Auf deren Zweck und ihre Funktionsweise wird weiter unten noch einmal genauer eingegangen.

Da sich die Pellets mit Geschwindigkeiten von 60 m s^{-1} - 100 m s^{-1} relativ langsam bewegen ist es wichtig, dass das Pelletttarget senkrecht aufgebaut wird. Bei einem waagerechten Aufbau würden die Pellets ansonsten, auf Grund der Gravitation, schon nach einer Strecke von 3 m um 1,4 cm - 2,5 cm von ihrer Sollbahn abweichen [Hus12].

Das Gassystem

Das WASA Pelletttarget kann wahlweise mit Wasserstoff oder Deuterium betrieben werden (vgl. Abbildung 3.4). Beide Gase stehen in Gasflaschen zur Verfügung. Aus Kostengründen wird das Deuterium allerdings meist über einen Deuteriumgenerator bereitgestellt, welcher Deuterium durch die Elektrolyse von schwerem Wasser erzeugt.

Es ist äußerst wichtig, dass das verwendete Gas ein hohes Maß an Reinheit aufweist, da schon kleinste Verunreinigungen als Kristallisationskeime dienen können und ein Zufrieren der Leitungen oder der Düse bewirken. Daher durchläuft das Wasserstoff- beziehungsweise Deuteriumgas einen Palladiumreinger, bevor es in das System des Pelletttargets geleitet wird. Der Palladiumreiniger besteht, vereinfacht dargestellt, aus einer Palladiummembran, die auf 300°C erhitzt wird. Bei dieser Temperatur ist die Palladiummembran durchlässig für reines Wasserstoff beziehungsweise reines Deuterium, während alle anderen Fremdgase heraus gefiltert werden. Nachdem das Gas gereinigt wurde, kann es über einen Druckregler in das System des Pelletttargets geleitet werden.

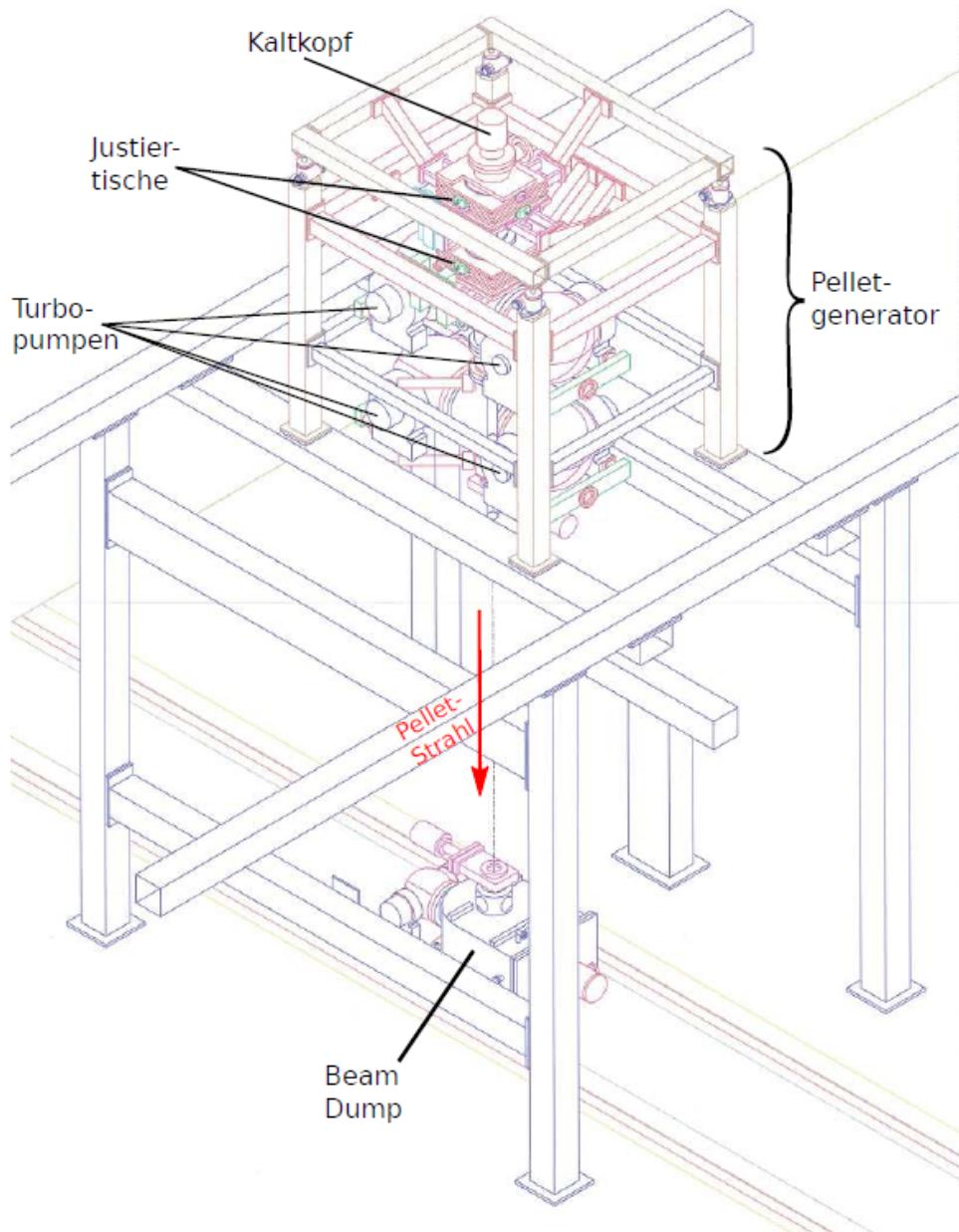


Abbildung 3.3.: Technische 3D-Darstellung des WASA-Pelletttargets [Hus12].

Zusätzlich zum Wasserstoff und Deuterium benötigt das Pelletttarget Helium zum Füllen der Dropletkammer. Dieses benötigt keine zusätzliche Reinigung, sondern kann direkt aus bereitstehenden Gasflaschen entnommen werden.

Der Verbrauch des Targets liegt beim Betrieb mit Wasserstoff bei etwa 2501 Wasserstoff und 2501 Helium pro Tag². Im Betrieb mit Deuterium wird etwa ein Liter schweres Wasser pro Woche und 10001 Helium pro Tag benötigt [Hus12].

Die Funktionsweise des Pellettargets wird im Nachfolgenden exemplarisch am Betrieb mit Wasserstoff beschrieben. Der Betrieb mit Deuterium funktioniert weitgehend identisch, abweichende Parameter für Deuterium sind gegebenenfalls angegeben.

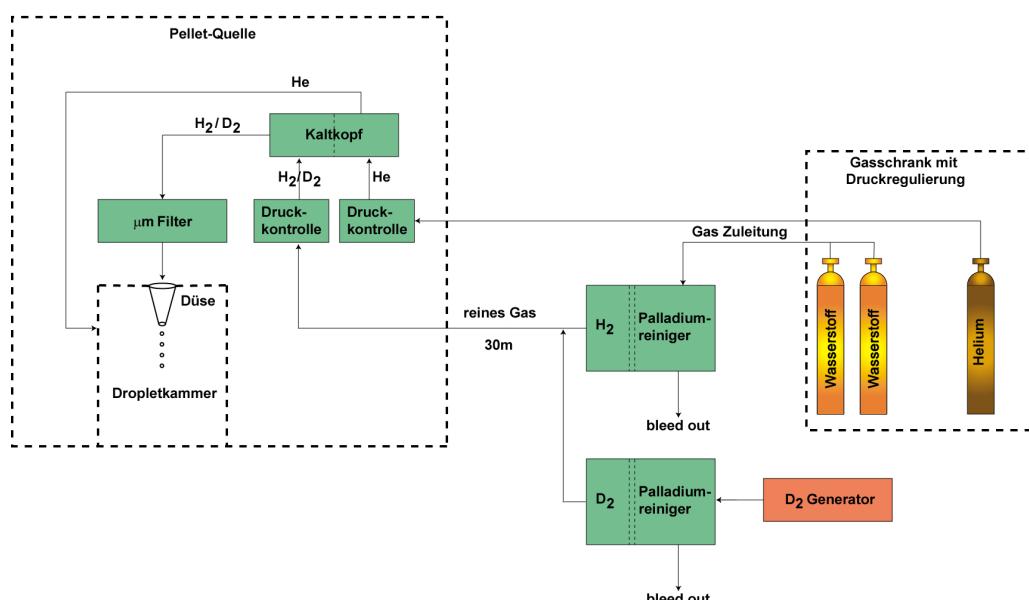


Abbildung 3.4.: Vereinfachte Darstellung des Gassystems für das WASA-Pelletttarget [Hus12]. In der Darstellung ist gut zu erkennen, dass für Wasserstoff und Deuterium zwei separate Palladiumreiniger verwendet werden.

Die Dropleterzeugung

Die Wasserstoff-Pellets werden innerhalb des WASA-Pelletttargets mit Hilfe des so genannten Pelletgenerators erzeugt (vgl. Abbildung 3.5). Dabei kühlt zunächst ein mit Helium betriebener Kaltkopf das Wasserstoff auf Temperaturen knapp über dessen Tripelpunkt ab [Nor04]. Die Tripelpunkt-Temperatur von Wasserstoff liegt bei

²Sofern nicht anders angegeben handelt es sich um Liter unter Normalbedingungen.

($13,96 \pm 0,05$) K und von Deuterium bei ($18,6 \pm 0,2$) K [NIS]. Der Druck in den Wasserstoffleitungen wird auf 400 mbar bis 800 mbar gehalten, so dass sich der Wasserstoff in einem flüssigen Zustand befindet.

Am Ausgang des Kaltkopfes befindet sich eine Glasdüse, welche zusammen mit ihrem Halterungssystem das Herzstück des Pelletttargets bildet. Die Untersuchung dieses Düsenhaltersystems und seiner Funktion stellen den zentralen Aspekt dieser Arbeit dar und werden deshalb in Abschnitt 3.4 noch einmal detailliert beschrieben.

Das flüssige Wasserstoff wird durch die Glasdüse gepresst, deren Öffnung sich an der Spitze zu einem Durchmesser von etwa $13\text{ }\mu\text{m}$ verengt. Über einen an dem Kupferhalter befestigten Piezoaktor kann der Glasdüse eine regelmäßige Schwingung aufgezwungen werden, die den Wasserstoffstrahl aufbricht, so dass sich kleine Tropfen (Droplets) bilden. Üblicherweise wird der Piezo mit einer sinusförmigen Wechselspannung von 30 kHz bis 80 kHz und einer Peak-to-Peak-Amplitude von 105 V_{pp} ³ betrieben.

Nach dem sich die Droplets von der Düse gelöst haben, befinden sie sich in der sogenannten Dropletkammer. Diese ist mit Helium gefüllt, welches zur gleichmäßigen Verteilung über zwei gegenüberliegende Zuleitungen in die Kammer geführt wird. Der Druck der Kammer liegt bei etwa 20 mbar (für Deuterium bei 50 mbar bis 60 mbar). Dieser relativ hohe Druck bewirkt, dass die Droplets flüssig bleiben und die Düsen spitze nicht zufriert.

Dabei ist wichtig, dass der Druck in der Dropletkammer nicht zu stark von diesem Wert abweicht. Ist er zu niedrig, so beginnen die äußeren Schichten der Droplets zu verdampfen, während der Kern aufgrund der Verdunstungskälte vorzeitig gefriert. Des Weiteren besteht die Gefahr eines Zufrierens der Düse. Ist der Druck zu hoch, entstehen aufgrund der hohen Druckdifferenz zwischen Droplet- und Skimmerkammer zusätzliche Turbulenzen in der nachfolgenden Vakuuminjektionskapillare, welche die empfindlichen Droplets leicht zerstören können und eine Aufweitung des Pelletstrahls bewirken.

Eine Kombination aus Stroboskoplampe und Kamera erlaubt es den Dropletstrahl aufzunehmen. Dabei ist die Stroboskoplampe auf die selbe Frequenz eingestellt wie der Piezoaktor, so dass die entstehenden Droplets immer in der selben Position beleuchtet werden. Ein mit diesem Aufbau aufgenommenes Foto ist in Abbildung 3.6 zu sehen.

³V_{pp}-Peak-to-Peak Spannung eines Wechselstromsignals

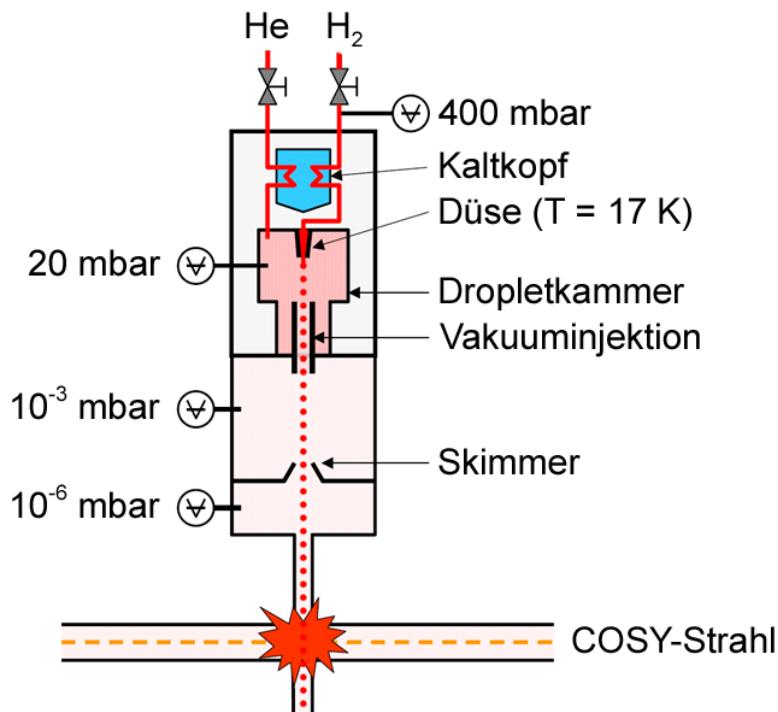


Abbildung 3.5.: Schematische Darstellung des WASA-Pelletttargets entnommen aus [Hus12] nach [Nor04]. Bei den angegebenen Druck- und Temperaturwerten handelt es sich um die typischen Werte beim Betrieb mit Wasserstoff.

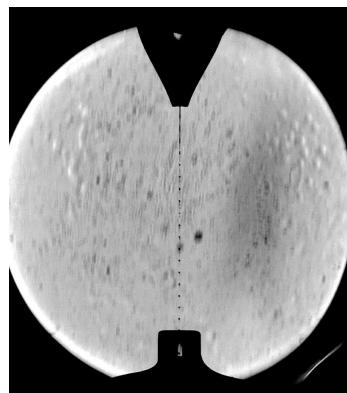


Abbildung 3.6.: Foto des Dropletstrahls innerhalb der Dropletkammer [A⁺04]. Oben ist der Ausgang der Düse und unten der Eingang der Vakuuminjektionskapillare zu erkennen. Das Foto wurde mit Hilfe einer Stroboskoplampe aufgenommen, welche auf die gleiche Frequenz wie der Piezoaktor eingestellt war.

Die Vakuuminjektion

Die Fallstrecke der Droplets durch die Dropletkammer beträgt ungefähr einen Zentimeter. Danach erreichen die Droplets den Eingang der Vakuuminjektionskapillare, welche die Dropletkammer mit der Skimmerkammer verbindet. Eine schematische Darstellung der Vakuuminjektionskapillare ist in Abbildung 3.7 zu sehen. Die Kapillare hat eine Länge von 7 cm und einen Innendurchmesser von 0,8 mm, der sich am Ausgang auf 0,6 mm verjüngt [Nor04]. In der Skimmerkammer wird der Druck auf 10^{-3} mbar gehalten, so dass entlang der Kapillare ein Druckabfall entsteht. Dieser sorgt dafür, dass die äußere Schicht der Droplets auf ihrem Weg durch die Kapillare verdampft, während der Kern aufgrund der entstehenden Verdunstungskälte zu Pellets gefriert.

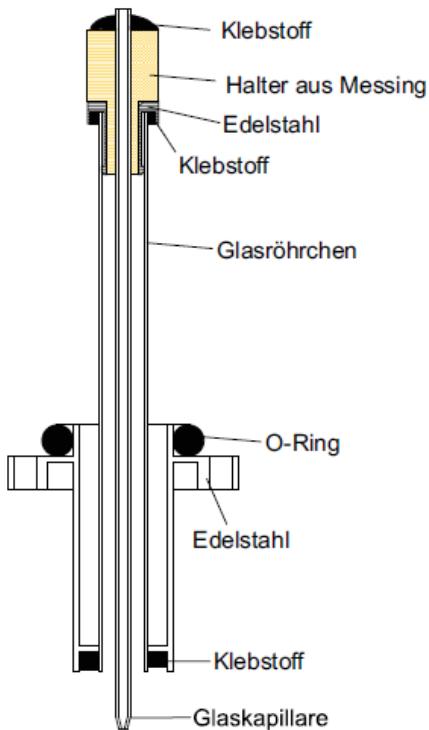


Abbildung 3.7.: Darstellung des Querschnittes der Vakuuminjektionskapillare entnommen aus [Hus12] nach [Nor04].

Der Skimmer

Durch die auftretenden Turbulenzen in der Vakuuminjektionskapillare wird der Pelletstrahl stark aufgeweitet. Um einer zu starken Strahlaufweitung entgegen zu wir-

ken, befindet sich 70 cm hinter der Vakuuminjektionskapillare ein Skimmer. Dieser besteht aus einem Metallkegel mit einer 1 mm großen Öffnung und sorgt dafür, dass Pellets mit einem zu großem Winkel reflektiert werden (vgl. Abbildung 3.8) [Nor06]. Die reflektierten Pellets werden an den Wänden der Skimmerkammer mehrmals reflektiert bis sie schließlich aufplatzen und verdampfen. Um einen Druckanstieg in der Skimmerkammer zu vermeiden, wird das bei der Verdampfung entstehende Gas über Pumpen abgesaugt. So werden nur Pellets mit einer maximalen Divergenz von 1,4 mrad durchgelassen und es entsteht ein gut kollimierter Strahl.

Um bei Bedarf den Interaktionspunkt vom Pelletstrahl abschirmen zu können, ohne den Pelletgenerator abzuschalten, lässt sich mittels einer Hydraulik ein Metallblech vor den Skimmer fahren. Diese versperrt den Weg zum Interaktionspunkt, woraufhin die Pellets in der Skimmerkammer verdampfen und über das Pumpsystem abgeführt werden.

Das Metallblech kommt zum Beispiel während der Beschleunigungsphase des COSY-Strahls zum Einsatz, da zu dieser Zeit Interaktionen zwischen Pellet- und COSY-Strahl unerwünscht sind.

Interaktionspunkt

Nachdem die Pellets den Skimmer passiert haben befinden sie sich in einer Kammer, die über das Pelletstrahlrohr direkt mit dem COSY-Strahlrohr verbunden ist. Der Druck in dieser Kammer beträgt etwa 10^{-6} mbar.

Von hier aus werden die Pellets über das bis zu fünf Millimeter schmale Pelletstrahlrohr zur Streukammer (COSY-Strahlrohr) geführt. Hier treffen sich Pellet- und COSY-Strahl und bilden mit ihrem Überschneidungsbereich den Wechselwirkungspunkt.

Anders als bei Gas- oder Clusterjetttargets ist beim Pelletttarget das Targetmaterial am Interaktionspunkt nicht homogen im Raum verteilt, sondern lokal auf kleine Bereiche konzentriert. Somit muss die effektive Targetdichte ρ_t^{eff} zunächst anhand der Pelletdichte ρ_p über die folgende Gleichung berechnet werden:

$$\rho_t^{eff} = \rho_p \cdot \frac{A_p}{A_b} \quad (3.3.1)$$

Dabei entspricht A_p der dem Beschleuniger sichtbaren Fläche eines Pellet

$$A_p = \pi \frac{D^2}{4} \quad (3.3.2)$$

und A_b der Beschleunigerstrahlfläche in der sich im Mittel genau ein Pellet befindet

$$A_b = S_{ip} \cdot \langle l \rangle . \quad (3.3.3)$$

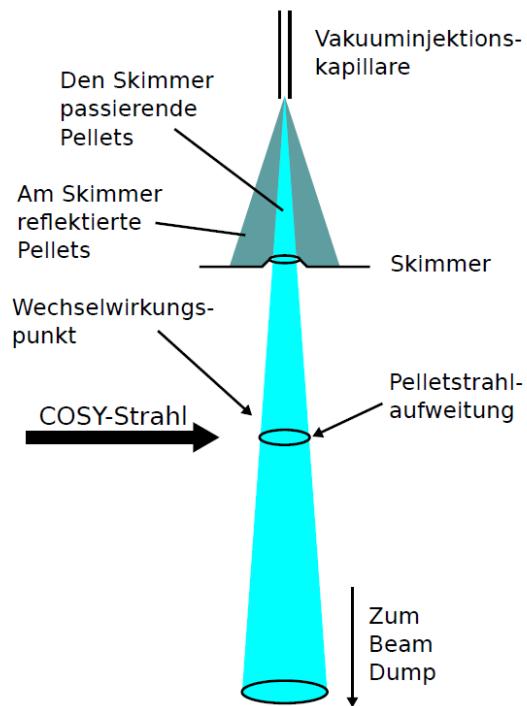


Abbildung 3.8.: Schematische Darstellung des Funktionsprinzipiels des Skimmers entnommen aus [Hus12] nach [Nor06]. Pellets mit großen Winkeln werden durch den Skimmer abgefangen, so dass nur der gut kollimierte, innere Teil des Pelletstrahls den Wechselwirkungspunkt erreicht.

Hierbei ist $\langle l \rangle$ der mittlere Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Pellets, S_{ip} die Aufweitung des Pelletstrahls am Wechselwirkungspunkt und D der Pelletdurchmesser.

Bei einer typischen Pelletdichte von $\rho_p = 10^{20} \text{ cm}^2$, einem mittleren Pelletabstand von $\langle l \rangle = 5 \text{ mm}$ und einer Strahlauflaufweitung am Wechselwirkungspunkt von $S_{ip} = 2 \text{ mm}$ ergibt sich nach Gleichung 3.3.1 eine effektive Targetdichte von $\rho_t^{eff} = 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

Der Beam Dump

Um die Entstehung von Restgas in der Streukammer zu verhindern, werden die Pellets, nachdem sie den COSY-Strahl passiert haben, durch den sogenannten Beam Dump aufgefangen. Dieser ist in Abbildung 3.9 skizziert. Im Beam Dump treffen die Pellets auf Metallbleche und verdampfen. Das entstehende Gas wird über Turbomolekularpumpen entfernt. Der Druck im Beam Dump liegt etwa in der Größenordnung von 10^{-4} mbar und liefert aufgrund des konstanten Saugvermögens der Pumpen eine gute erste Abschätzung für die Pelletrate. Um die Pelletrate exakt bestimmen zu können wurde der sogenannte Pellet Counter entwickelt. Dieser wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

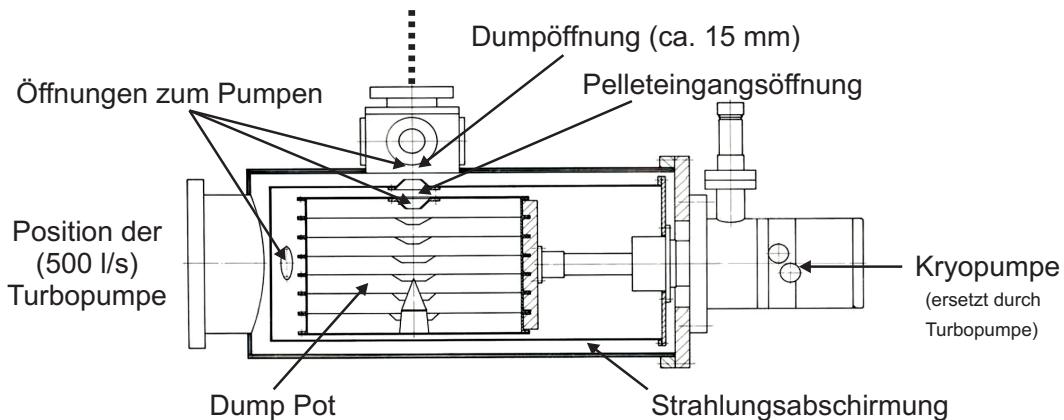


Abbildung 3.9.: Schematische Darstellung des WASA-Beam Dumps [Cal08]. Die Kryopumpe wurde mittlerweile durch eine Turbomolekularpumpe ersetzt.

Der Pellet Counter

Zur genaueren Bestimmung der Pelletrate ist unterhalb des Skimmers der Pellet Counter installiert. Die Funktionsweise des Counters ist in Abbildung 3.10 schematisch dargestellt. Ein Laserstrahl wird über zwei in der Kammer gegenüberliegende Fenster durch den Pelletstrahl geleitet und anschließend über einen Spiegel aus dem Pellet Counter hinausgelenkt.

Fällt nun ein Pellet durch den Laserstrahl, so wird das Licht des Lasers von diesem gestreut. Über zwei Kollimatoren wird das vom Pellet gestreute Laserlicht getrennt von dem Licht, das durch die Fenster gestreut wird. Anschließend wird es durch eine Sammellinse auf einem Photomultiplier fokussiert, der das optische Signal der Pellets in ein elektrisches umwandelt. Über einen am Photomultiplier angeschlossenen Zähler kann schließlich die genaue Pelletrate bestimmt werden.

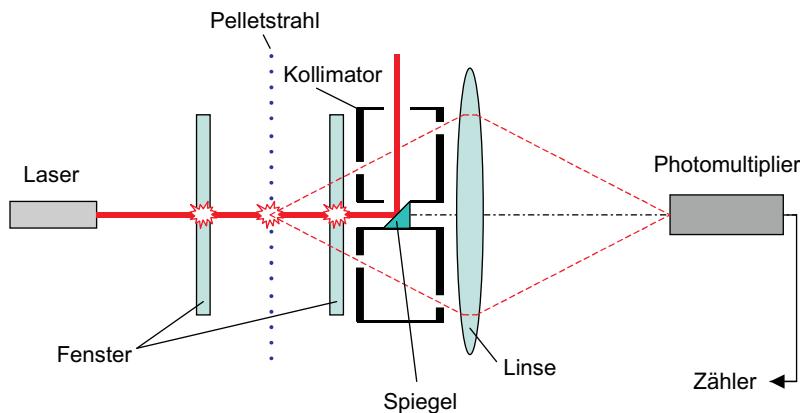


Abbildung 3.10.: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips des Pellet Counters entnommen aus [Hus12] nach [Nor04].

Die Koordinatentische

Zum Ausrichten des Droplet- beziehungsweise Pelletstrahls werden zwei Koordinatentische benutzt, welche sich über Schrittmotoren in vier verschiedene Richtungen bewegen lassen. Der obere der beiden Tische dient dazu den Dropletstrahl durch die Vakuuminjektionskapillare zu leiten (vgl. Abbildung 3.11). Dabei wird die Düse zunächst durch Verschieben des Tisches in der horizontalen X-Y-Ebene mittig auf den Eingang der Kapillare ausgerichtet. Um den Strahl anschließend durch die Kapillare zu führen, lässt sich der Tisch zusätzlich in X'- und Y'-Richtung verkippen. Dabei wird er automatisch in X- und Y-Richtung nachgeführt, so dass der Dropletstrahl stets auf den Eingang der Kapillare ausgerichtet bleibt.

Der untere Tisch funktioniert nach demselben Prinzip wie der Obere und wird da-

zu verwendet den Pelletstrahl durch den Skimmer, die Strahldurchführung und die Streukammer bis hin zum Beam Dump zu führen.

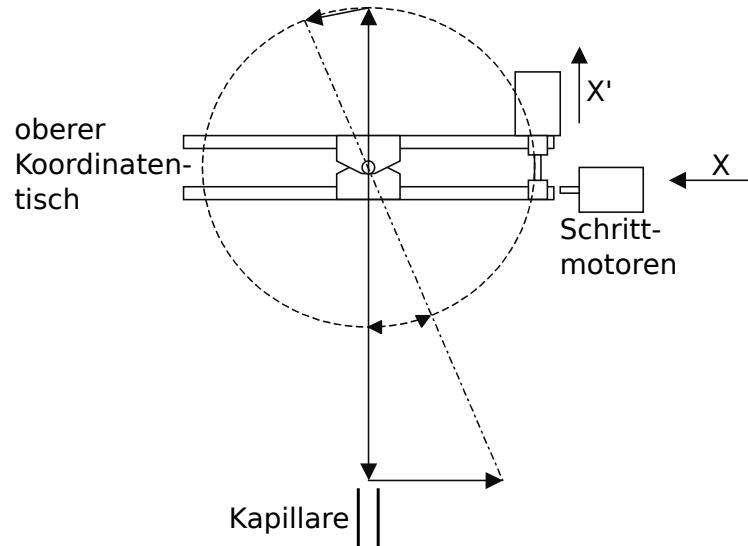


Abbildung 3.11.: Schematische Darstellung des unteren Koordinatentisches entnommen aus [Hus12] nach [Nor04].

3.4. Das Düsenhaltersystem und die Glasdüse

Das Düsenhaltersystem ist das Herzstück des WASA-Pelletttargets, und in seiner reibungslosen Funktion liegt die Grundlage für einen erfolgreichen Betrieb des gesamten WASA-Experimentaufbaus. Jeder Ausfall eines eingebauten Haltersystems führt zu einem aufwendigen Düsenhalterwechsel, welcher den Strahlbetrieb verzögert. Daher ist das zentrale Ziel dieser Arbeit verschiedene Düsenhaltersysteme genau zu untersuchen und Anhaltspunkte zu finden, welche eine gute Funktionalität dieser Systeme im späteren Betrieb erwarten lassen. Dazu soll in diesem Kapitel zunächst der Aufbau und die Funktionsweise des Düsenhaltersystem beschrieben werden. Anschließend wird auf typische im Betrieb auftretende Störungen eingegangen, welche im weiteren Verlauf der Arbeit genauer untersucht werden sollen.

3.4.1. Das Düsenhaltersystem

Das Düsenhaltersystem besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten: dem Düsenhalter, dem Piezoaktor und der Glasdüse (vgl. Abbildung 3.12). Der Düsenhalter besteht aus Kupfer und wird bei der Herstellung individuell für einen bestimmten

Piezoaktor angefertigt. Dies ist notwendig, da die Abmessungen des Piezoaktors bei der Herstellung nur in einem gewissen Rahmen vorgegeben werden können. Bei einer eventuellen Beschädigung des piezoelektrischen Elements kann dieses daher nicht ausgetauscht werden.

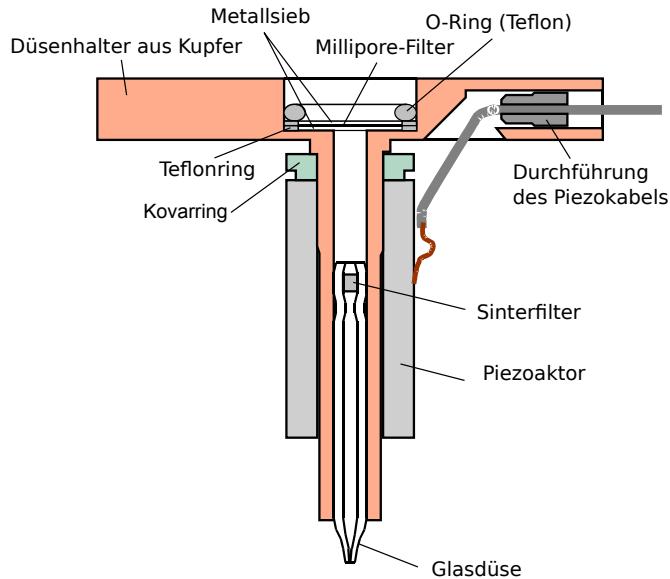


Abbildung 3.12.: Schematische Darstellung des Düsenhaltersystems, bestehend aus den drei Hauptbestandteilen: Piezoaktor, Kupferhalter und Glasdüse (entnommen aus [Hus12] nach [Nor04]).

Der Piezoaktor hat die Form eines Hohlzylinders. Seine gekrümmten Innen- und Außenseiten sind versilbert und dienen als Elektroden [Mor2]. Beim Zusammenbau des Düsenhaltersystems wird der Piezoaktor auf das Kupferrohr des Düsenhalters gesteckt. Der Bereich an dem sich die Innenseite des Piezoaktors und das Kupferrohr berühren ist nur wenige Millimeter lang (vgl. Abbildung 3.13). Über die Stirnseite des Piezoaktors wird dieser zur zusätzlichen Befestigung mit Zwei-Komponenten-Kleber an einen Ring aus Kovar geklebt, welcher mit dem Düsenhalter verbunden ist.

Um den Piezoaktor später von außen ansteuern zu können, wird eine elektrische Zuleitung über eine abgedichtete Kabeldurchführung im tellerförmigen Teil des Kupferhalters an die Außenseite des Piezoelements geführt und dort über eine Lötverbindung befestigt. Als Pol für die Innenseite des Piezoaktors dient der Kupferhalter selbst.

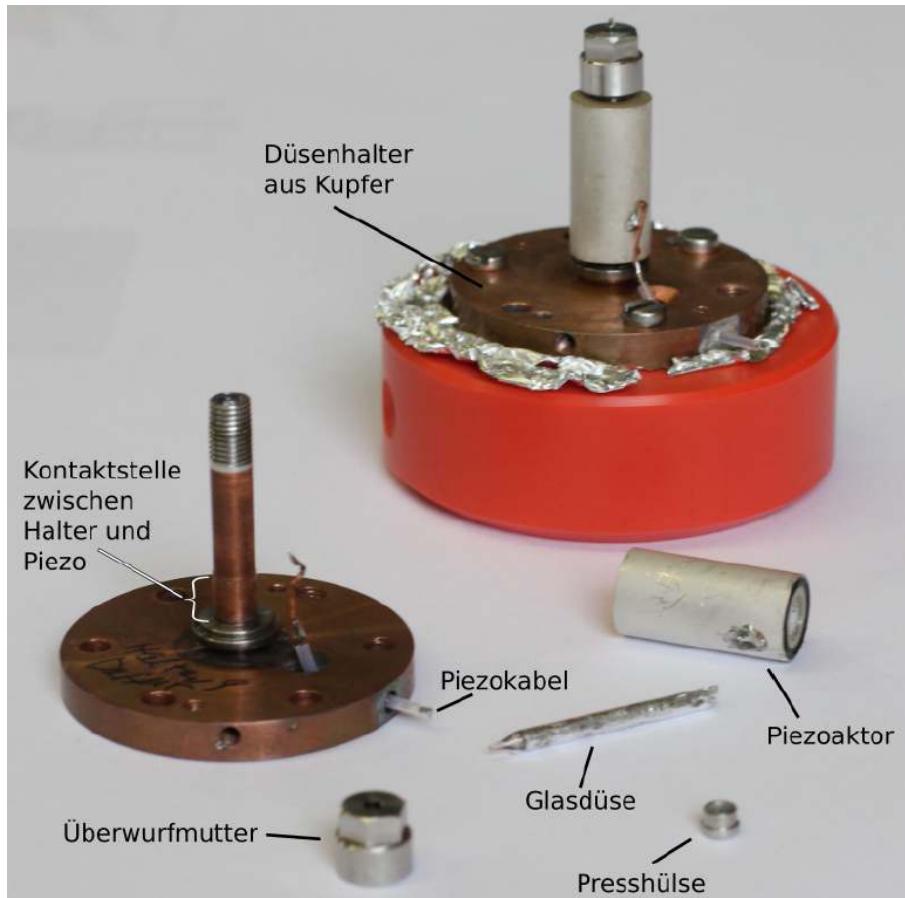


Abbildung 3.13.: Foto von zwei Düsenhaltern [Hus12].

Oben: Zusammengebauter Düsenhalter, befestigt auf einem Plastikhalter

Unten: Ein in seine Bestandteile zerlegter Düsenhalter. Am Piezoaktor sind die Lötstelle (an der Außenelektrode) und die Reste des Zwei-Komponentenklebers (an der Stirnseite) zu erkennen. Die Glasdüse weist Reste der Indiumdichtung auf.

Bei unzureichender Abdichtung der Kabeldurchführung besteht die Gefahr eines Lecks zwischen Dropletkammer und Stützvakuum. In das Rohr des Düsenhalters wird die Glasdüse eingesetzt, welche im Gegensatz zum Piezoaktor bei Bedarf ausgetauscht werden kann. Der Raum zwischen Glasdüse und Kupferhalter wird mit Indium abgedichtet, das über eine Presshülse mit einer Überwurfmutter verdichtet wird.

Um ein Verstopfen der Düse durch Fremdkörper zu verhindern, ist im oberen Abschnitt der Düse ein Sinterfilter eingeschmolzen, welcher eine Porengröße von $1\text{ }\mu\text{m}$ besitzt. Bei einem Sinterfilter handelt es sich um einen Gas- bzw. Flüssigkeitsfilter, welcher durch das Verdichten von feinkörnigen metallischen Partikeln unter Wärmebehandlung hergestellt wird. Zum zusätzlichen Schutz der Glasdüse vor Verunreinigungen wird am Eingang des Düsenhalters oberhalb der Glasdüse ein Millipore-Filter zwischen zwei Metallsieben eingesetzt. Abgedichtet wird der Eingang dabei mit einem Teflonring.

3.4.2. Der Piezoaktor

Der am WASA Pelletttarget verwendete Piezoaktor wird hergestellt von der Firma Morgan Electro Ceramics und hat wie in Abschnitt 3.4.1 bereits beschrieben die Form eines Hohlzyinders. Seine gekrümmten Innen- und Außenseiten sind versilbert, so dass sie als Elektroden verwendet werden können.

Die Funktion des Piezoaktors besteht darin, den an der Düsenspitze entstehenden Wasserstoffstrahl in kontrollierten Abständen aufzubrechen und so die Entstehung eines gleichmäßigen Dropletstrahls mit definierter Frequenz zu ermöglichen. Dabei kommt es auch ohne Piezobetrieb zu einem natürlichen Aufbrechen des Flüssigkeitsstrahls. Es wurde bereits 1878 durch Lord Rayleigh der folgende Zusammenhang zwischen dem Strahldurchmesser d_{jet} und dem Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Droplets λ bestimmt [Nor04]:

$$\frac{\lambda}{d_{jet}} \approx 4,5. \quad (3.4.1)$$

Dieses natürliche Aufbrechen wird verursacht durch Störungen mit geringer Amplitude, welche in jedem physikalischen System vorkommen. Durch diese Störungen entstehen Bereiche mit größerem oder kleinerem Strahldurchmesser, welche bei ausreichend starker Verformung ein natürliches Aufbrechen des Strahles in Droplets bewirken. Mit Hilfe des Piezoaktors ist es nun möglich dem Strahl Störungen mit hohen Amplituden aufzuprägen, welche ein Aufbrechen des Strahls mit der Arbeitsfrequenz des Piezoaktors bewirken. Daraus ergibt sich die folgende Abhängigkeit

des Dropletabstandes von der Geschwindigkeit des Flüssigkeitsstrahls v_{jet} und der Arbeitsfrequenz des Piezoaktors f [Nor04]

$$\lambda = \frac{v_{jet}}{f}. \quad (3.4.2)$$

Messungen der Strahlgeschwindigkeit v_{jet} bei unterschiedlich großen Düsendurchmessern d_{jet} und Arbeitsfrequenzen des Piezoaktors zwischen 46 kHz und 67 kHz ergaben ein Verhältnis zwischen Dropletabstand und Düsendurchmesser von [Nor04]

$$\frac{\lambda}{d_{jet}} \approx 21 - 29. \quad (3.4.3)$$

Daraus ist zu erkennen, dass sich über den Piezoaktor dem Dropletstrahl nicht nur unterschiedliche Frequenzen aufprägen lassen, sondern auch der Abstand zwischen den aufeinander folgenden Droplets vergrößern lässt. Durch das Erhöhen der Frequenz lässt sich der Abstand zwischen den einzelnen Droplets wieder verringern und es können höhere Dropletraten erreicht werden. Bei zu hohen Raten kommt es allerdings aufgrund des geringen Abstandes zwischen den einzelnen Droplets verstärkt zu Turbulenzen in der Vakuuminjektionskapillare [Nor04]. Diese Turbulenzen erschweren eine erfolgreiche Vakuuminjektion.

Eine genauere Untersuchung des Schwingungsverhaltens verschiedener Düsenhalter-systeme ist in Abschnitt 4 beschrieben.

3.4.3. Die Glasdüse

Die Glasdüse wird aus einem 140 mm langen und 3 mm dicken Glasröhren angefertigt. In mehreren Arbeitsschritten wird zunächst der Sinterfilter eingesetzt, die Düsen spitze mit einem Durchmesser des Strömungskanals von etwa 13 μm geformt und abschließend die Düse auf eine Gesamtlänge von 42 mm abgelängt. Dabei wird die Düse zwischen den einzelnen Arbeitsschritten immer wieder gereinigt und mögliche Schäden untersucht. Zum Abschluss der Herstellung wird die Öffnung der Düse mit einem Invers-Mikroskop vermessen und ihr Durchmesser notiert. Aufgrund des geringen Innendurchmessers von etwa 13 μm an der Düsen spitze kann es schon bei geringen Verunreinigungen des verwendeten Gases zu einem Zusetzen der Düse kommen. Um dies zu verhindern, wurde wie oben beschrieben der Sinterfilter in die Düse eingebaut.

Trotzdem ist es in der Vergangenheit immer wieder zu Blockierungen der Düse gekommen. Ein mikroskopisch vergrößertes Foto einer zugesetzten Düsen spitze ist in Abbildung 3.14 zu sehen.

Eine mögliche Ursache für das Zusetzen der Düse könnte der Sinterfilter selbst



Abbildung 3.14.: Mikroskopisch vergrößerte Aufnahme des Strömungskanals einer blockierten Düse entnommen aus [Win11]

sein. Es ist möglich, dass sich aufgrund der mechanischen Belastungen während des Betriebs Bruchstücke des Filtes lösen und in die Düsenspitze gelangen. Durch den Einsatz eines neueren Sinterfilter, bei dem aufgrund seiner abgerundeten Ecken die Wahrscheinlichkeit für das Loslösen von Bruchstücken geringer ist (vgl. Abbildung 3.15), konnte die Quote der blockierten Düsen bereits verringert werden.

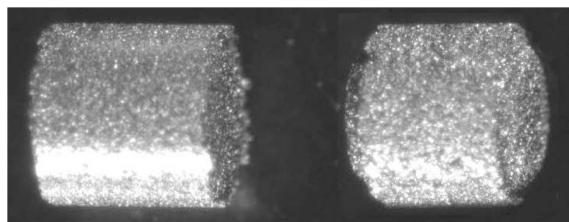


Abbildung 3.15.: Mikroskopisch vergrößerte Aufnahme zweier Sinterfilter entnommen aus [Win11].

Links: Der ursprünglich verwendete Sinterfilter mit eckigen Kanten

Rechts: Der neuere Sinterfilter mit abgerundeten Kanten

3.4.4. Störungen aufgrund des Düsenhaltersystems

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, ist bei einem Ausfall des Düsenhaltersystems ein aufwendiger Düsenhalterwechsel nötig, welcher den Strahlbetrieb verzögert. Über die Zeit hat sich herausgestellt, dass das Blockieren der Düsen, sowie das Fehlen einer geeigneten Arbeitsfrequenz die zwei Hauptgründe für den Ausfall der Düsenhaltersystems darstellen.

Daher wurde von C. Husmann, im Rahmen ihrer Diplomarbeit, eine Düsenteststation entwickelt. Diese „soll die Möglichkeit eröffnen, Düsen vor ihrem Einbau in das WASA-Pelletttarget auf ihre Qualität zu überprüfen, sodass die Ausfallrate neu eingebauter Düsen reduziert werden kann“[Hus12]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Teststation dazu verwendet mit Hilfe von Langzeitmessungen die Qualität

von drei Düsen vor ihrem Einbau in das WASA-Pelletttarget zu untersuchen.

Des weiteren hat C. Husmann die zwei Verfahren der Impedanz- und der Mikrophonmessung entwickelt. Diese sollen eine Untersuchung des Schwingungsverhaltens verschiedener Düsenhaltersysteme ermöglichen. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden beide Verfahren verwendet, um die von C. Husmann bereits begonnenen Untersuchungen fortzuführen. Zusätzlich wurde zum ersten Mal eine Scheinwiderstandsmessung direkt am WASA-Pelletttarget durchgeführt, wodurch ein direkter Vergleich zwischen Scheinwiderstandsmessung und beobachteter Pelletqualität möglich ist. Am Pelletttarget konnte außerdem das Scheinwiderstandsspektrum bei unterschiedlichen Temperaturen gemessen werden, wodurch ein temperaturabhängiger Verlauf der Resonanzfrequenzen aufgenommen werden konnte.

4. Untersuchungen zum Schwingungsverhalten des Düsenhaltersystems

Für einen erfolgreichen Betrieb am Pelletttarget ist eine gute Übertragung der Schwingungen des Piezoaktors auf den Dropletstrahl unerlässlich. Deshalb befasst sich das folgende Kapitel mit den von C. Husmann entwickelten Verfahren zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens des Piezoaktors. Dazu gehört das Verfahren der Scheinwiderstandsmessung, das mit Hilfe des Van-Dyke-Ersatzschaltbildes dazu verwendet werden kann Informationen über die Resonanzen eines Piezoaktors zu erheben. Als weiteres Verfahren wird die Mikrofonmessung vorgestellt, bei der die Schwingungen des Düsenhaltersystems mit Hilfe eines Mikrofons aufgenommen werden.

4.1. Der piezoelektrische Effekt

Der piezoelektrische Effekt wurde im Jahr 1880 von Jacques und Pierre Curie entdeckt [Mor]. Sie beobachteten, dass bestimmte Kristalle unter mechanischer Verformung eine elektrische Polarisierung ausbilden. Dabei stellten sie fest, dass der Grad der Polarisierung proportional zur Beanspruchung des Materials ist.

Den umgekehrten Effekt, dass piezoelektrische Kristalle sich verformen, sobald sie einer elektrischen Spannung ausgesetzt werden, entdeckten sie ein Jahr später. Dieser Effekt wird dementsprechend als inverser piezoelektrischer Effekt bezeichnet.

Damit ein Kristall piezoelektrische Eigenschaften besitzt, darf die Elementarzelle des Kristalls kein Symmetriezentrum besitzen. Erfährt ein piezoelektrischer Kristall eine Kraft von außen, die ihn verformt, so werden die positiven und negativen Ladungszentren in den Elementarzellen von einander getrennt und bilden kleine Dipolmomente aus. Die Summe dieser Dipolmomente generiert ein elektrisches Feld, welches sich über den Kristall erstreckt und mit Hilfe eines Voltmeters gemessen werden kann. Umgekehrt bewirkt das Anlegen einer Spannung an einen piezoelektrischen Kristall, dass die Elementarzellen innerhalb des Kristalls sich verformen und

elektrische Dipole ausbilden, um die angelegten Spannungen auszugleichen. Dadurch ändert sich die Längenausdehnung des gesamten Kristalls, was zum inversen piezoelektrischen Effekt führt.

Es gibt einige in der Natur vorkommende Kristalle, die piezoelektrische Eigenschaften besitzen. Der bekannteste Vertreter davon ist Quarz.

Die in der Industrie hergestellten Elemente mit piezoelektrischen Eigenschaften sind zum Großteil Keramiken. Zu diesen gehört der oft verwendeten Stoffverband Blei-Zirkonat-Titanat kurz PZT. Dies ist ein polykristallines Material, das zur Familie der Ferroelektrika gehört und zumeist eine Perowskit-Struktur (vgl. Abbildung 4.1) aufweist. Es besitzt die allgemeine Formel $A^2+ + B^4+ + O_3^{2-}$, wobei A für ein zweiwertiges Metallion wie Blei oder Barium und B für ein dreiwertiges Metallion wie Titan oder Zirconium steht.

Oberhalb einer bestimmten Temperatur, der sogenannten Curie-Temperatur, ist die Elementarzelle des PZT zentrosymmetrisch und besitzt kein Dipolmoment. Unterhalb der Curie-Temperatur allerdings verändert sich die Struktur innerhalb der Elementarzelle und das Titan- beziehungsweise Zirconiumatom bewegt sich aus seiner zentralen Lage heraus. Dadurch liegen der negative und positive Ladungsschwerpunkt der Zelle nicht länger im selben Punkt und bilden so einen Dipol. Die Curie-Temperatur der für das WASA-Pelletttarget verwendeten „PZT-5H“-Keramik liegt bei 200°C [Mor07].

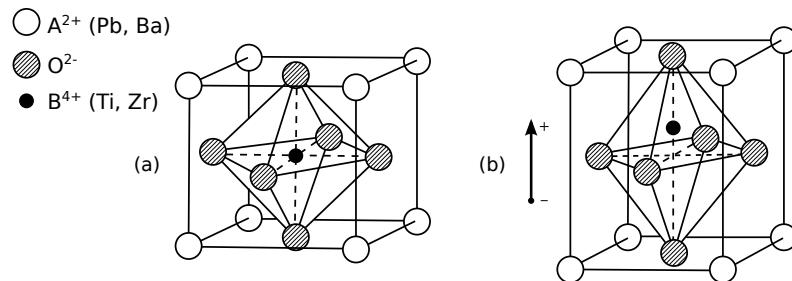


Abbildung 4.1.: Perowskit-Struktur der Elementarzelle einer PZT-Keramik a) oberhalb der Curie-Temperatur und b) unterhalb der Curie-Temperatur [Mor].

Benachbarte Dipole richten sich bevorzugt in gleiche Richtung aus und bilden auf diesem Weg Bereiche gleicher Orientierung, welche weissche Bezirke genannt werden. Innerhalb dieser Bezirke summiert sich das Dipolmoment der einzelnen Dipole zu einem Gesamtdipolmoment auf und verleiht dem weisschen Bezirk eine Gesamt-polarisation. Dabei kann sich innerhalb eines Kristalls die Polarisation von benach-

barten weisschen Bezirken um 90° oder 180° unterscheiden.

Nach der Fertigung der PZT-Keramik sind die Bezirke zunächst zufällig ausgerichtet und heben sich in der Summe gegenseitig auf, so dass die Keramik nach außen hin keine Polarisation besitzt (vgl. Abbildung 4.2 a).

Um ihr piezoelektrische Eigenschaften zu verleihen, muss die Keramik zunächst bis knapp unter die Curie-Temperatur erhitzt und einem starken elektrischen Feld ausgesetzt werden (vgl. Abbildung 4.2 b). Dadurch wachsen die weisschen Bezirke, deren Orientierung in Richtung des elektrischen Feldes liegt, an, während die Bezirke mit abweichender Orientierung schrumpfen. Gleichzeitig dehnt sich das Material in Richtung des angelegten Feldes aus. Wird die Keramik anschließend wieder abgekühlt und das elektromagnetische Feld entfernt, bleibt die aufgeprägte Orientierung in leicht abgeschwächter Form bestehen (vgl. Abbildung 4.2 c). Die Keramik besitzt nun piezoelektrische Eigenschaften, welche sie solange behält, bis sie erneut bis oberhalb der Curie-Temperatur erhitzt wird oder einer sehr hohen Spannung oder einem sehr starken Druck ausgesetzt wird.

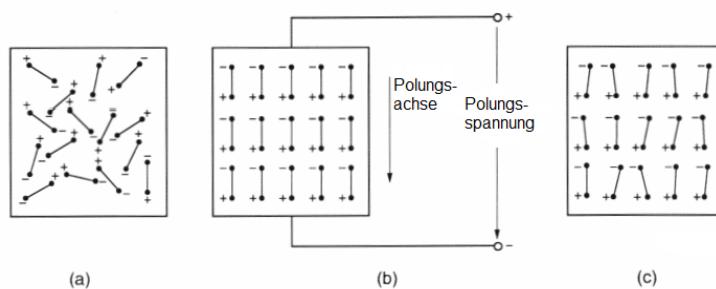


Abbildung 4.2.: Elektrische Dipolmomente der weissen Bezirke einer PZT-Keramik [Mor] a) vor der Polarisierung, b) während der Polarisierung und c) nach der Polarisierung.

4.2. Mechanische Schwingungsmoden

In einem Körper, der zur Schwingung angeregt wird, können sich unterschiedliche Schwingungsmoden ausbilden. Dabei werden die Schwingungsmoden allein durch die Form des Körpers und die Geschwindigkeit, mit der sich die Schallwellen durch das Material bewegen, bestimmt. Wird eine solche Schwingungsmodus angeregt, kommt es zur Resonanz und die Amplitude der Schwingung wird maximal.

Am WASA-Pelletttarget wird das Aufbrechen des Flüssigkeitsstrahls an der Düsen spitze durch die Schwingungen des Piezoaktors gesteuert. Je stärker die

Schwingung des Piezoaktors ist, desto stärker beeinflusst er das Aufbrechen des Flüssigkeitsstrahls. Um eine optimale Dropleterzeugung zu erreichen, ist es also wünschenswert den Piezoaktor bei einer seiner Resonanzfrequenzen zu betreiben. Um eine erste Abschätzung zu erhalten, wo die Resonanzfrequenzen des Düsenhaltersystems liegen könnten, sollen im Nachfolgenden die Resonanzfrequenzen des verwendeten Piezoaktors bei freier Schwingung, also ohne Verbindung mit dem Kupferhalter, bestimmt werden.

Der verwendete Piezoaktor besitzt die Form eines Hohlzylinders, dessen Abmessungen in Tabelle 4.1 angegeben sind.

äußerer Durchmesser (D_A)	$(12,7 \pm 0,15)$ mm
innerer Durchmesser (D_I)	$(6,3 \pm 0,15)$ mm
Länge (L)	$(25,4 \pm 0,15)$ mm
Wandstärke (D_W)	$(3,18 \pm 0,05)$ mm

Tabelle 4.1.: Abmessungen des am WASA Pellettarget eingesetzten Piezoaktors. Dabei wurden die Werte [Nor04] und die Unsicherheiten [Mor07] entnommen.

Für einen solchen hohlzylindrischen Piezoaktor können in drei verschiedenen Schwingungsrichtungen Moden auftreten [Mor07]:

- Die longitudinale Schwingung, bei der die Länge des Piezosaktors variiert.
- Die Breitenschwingung, bei der die Wandstärke des Piezosaktors variiert.
- Die radiale Schwingung, bei der der mittlere Umfang des Piezoaktors variiert.

Diese drei Schwingungsrichtungen sind in Abbildung 4.3 schematisch dargestellt. Um nun die Resonanzfrequenzen der Schwingungsmoden zu bestimmen, wird die Frequenzkonstante N benötigt. Diese entspricht der halben Schallgeschwindigkeit im Material in Ausbreitungsrichtung der Schwingung. Die Frequenzkonstanten N_l der longitudinalen Schwingung, N_t der Breitenschwingung und N_c der Schwingung des Umfangs sind in Tabelle 4.2 angegeben.

Mit den in Tabelle 4.1 angegebenen Abmessungen des hohlzylindrischen Piezoaktors und den in Tabelle 4.2 angegebenen Frequenzkonstanten lassen sich die Resonanzfrequenzen der drei Schwingungsmoden berechnen [Mor07]:

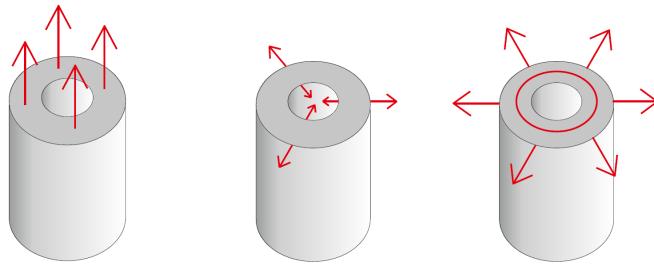


Abbildung 4.3.: Schematische Darstellung der drei Schwingungsrichtungen, die in einem hohlzylindrischen Piezoaktor auftreten entnommen aus [Hus12] nach [Mor07]. **Links:** longitudinale Schwingung, **Mitte:** Breitenschwingung und **Rechts:** radiale Schwingung.

Frequenzkonstante / (kHz mm)	
N_l	1375 ± 275
N_t	1895 ± 379
N_c	920 ± 184

Tabelle 4.2.: Frequenzkonstanten der longitudinalen Schwingung N_l , der Breitenschwingung N_t und der radialem Schwingung N_c [Mor07].

- Resonanzfrequenz zum Anregen der longitudinalen Schwingungsmodus:

$$f_l = \frac{N_l}{L} = \frac{(1375 \pm 275) \text{ kHz mm}}{(25,4 \pm 0,15) \text{ mm}} = (54 \pm 11) \text{ kHz} \quad (4.2.1)$$

- Resonanzfrequenz der Breitenschwingung:

$$f_t = \frac{2N_t}{D_A - D_I} = \frac{2 \cdot (1895 \pm 379) \text{ kHz mm}}{(12,7 \pm 0,15) \text{ mm} - (6,3 \pm 0,15) \text{ mm}} = (592 \pm 173) \text{ kHz} \quad (4.2.2)$$

- Resonanzfrequenz zum Anregen der Schwingung des Umfangs:

$$f_c = \frac{2N_c}{D_A + D_I} = \frac{2 \cdot (920 \pm 184) \text{ kHz mm}}{(12,7 \pm 0,15) \text{ mm} + (6,3 \pm 0,15) \text{ mm}} = (96 \pm 20) \text{ kHz} \quad (4.2.3)$$

Dabei ist anzumerken, dass die hier berechneten Resonanzfrequenzen für Schwingungen des Piezoaktors bei Raumtemperatur gelten. Im Pelletttargetbetrieb wird

das Düsenhaltersystem durch den angeschlossenen Kaltkopf auf Temperaturen von etwa 14 K herunter gekühlt, wodurch sich die Resonanzfrequenzen des Piezoaktors noch einmal verschieben können [Hus12]. Eine genauere Betrachtung des Resonanzspektrums in Abhängigkeit von der Temperatur findet in Abschnitt 4.3.5 statt. Des weiteren gelten, wie oben bereits erwähnt, diese Berechnungen für einen frei schwingenden Piezoaktor. Beim Betrieb im Pelletttarget ist der Piezoaktor jedoch fest mit dem Kupferhalter verbunden und versetzt das gesamte Düsenhaltersystem in Schwingung. Dies könnte zum Auftreten von neuen Resonanzen oder der Verschiebung von bereits vorhanden Resonanzen führen. So konnte von C. Husmann mit Hilfe der Scheinwiderstandsmessung bei mehreren Düsenhaltersystemen eine zusätzliche Resonanz im Bereich zwischen 25 kHz und 35 kHz nachgewiesen werden [Hus12]. Da bei einer zu hohen Frequenz des Piezoaktors die Droplets zu klein werden, wird das Pelletttarget üblicherweise in einem Frequenzbereich von 30 kHz bis 80 kHz betrieben. Von den oben berechneten Resonanzfrequenzen kommt daher nur die Resonanzfrequenz der longitudinalen Schwingungsmodus f_l für den Pelletttargetbetrieb in Frage.

In den beiden nachfolgenden Abschnitten 4.4 und 4.3 werden die von C. Husmann vorgeschlagenen Verfahren der Mikrofon- und der Impedanzmessung verwendet, um das Resonanzspektrum verschiedener Düsenhaltersysteme zu untersuchen.

4.3. Die Scheinwiderstandsmessung

Um das Schwingungsverhalten des Düsenhaltersystems zu untersuchen, wird in diesem Abschnitt das Verfahren der Scheinwiderstandsmessung und die Ergebnisse verschiedener Messungen vorgestellt. Dazu gehören einerseits die Scheinwiderstandsspektren unterschiedlicher Halter, die im Rahmen dieser Arbeit in Münster aufgenommen worden sind. Andererseits werden die direkt am Pelletttarget am Forschungszentrum Jülich gemessenen Spektren präsentiert. Im Rahmen der Messungen am Pelletttarget fand eine Aufnahme des temperaturabhängigen Verlaufes des Scheinwiderstandes statt. Das Scheinwiderstandsspektrum des Halters wurde dabei mit dem Verlauf der Pelletstrahlqualität verglichen. Ferner wurde eine Messbox zur Erleichterung zukünftiger Messungen am Pelletttarget entwickelt.

4.3.1. Das Van-Dyke-Ersatzschaltbild

Eine Möglichkeit zur Beschreibung eines Piezoaktors besteht in der Darstellung seiner mechanischen und elektrischen Eigenschaften in Form eines Ersatzschaltbildes. So können in erster Näherung die elektrischen Eigenschaften des Piezoaktors als

Kondensator mit einem Dielektrikum beschrieben werden [Kes]. Im Fall des Piezoaktors am WASA-Pelletttarget handelt es sich um einen Zylinderkondensator, dessen Kapazität C_1 durch die folgende Gleichung berechnet werden kann:

$$C_1 = 2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{L}{\ln\left(\frac{D_A}{D_I}\right)}. \quad (4.3.1)$$

Dabei ist ϵ_0 die elektrische Feldkonstante mit dem Wert $\epsilon_0 = 8,54 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ [B+12]. ϵ_r ist die relative Permittivität des Piezomaterials „PZT-5H“ und beträgt $\epsilon_r = 3400 \pm 680$. Zusammen mit den Werten für die Abmessungen D_A und D_I des Piezoaktors in Tabelle 4.1 lässt sich die Kapazität C_1 des am WASA-Pelletttarget verwendeten Piezoaktors mit Hilfe von Gleichung 4.3.1 zu $C_1 = (6,9 \pm 1,4) \cdot 10^{-9} \text{ F}$ berechnen.

Die Impedanz Z_1 des Ersatzschaltbildes für die elektrischen Eigenschaften des Piezoaktors ist über die folgende Gleichung gegeben:

$$Z_1 = \frac{1}{i\omega C_1}. \quad (4.3.2)$$

Um ein Ersatzschaltbild zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften des Piezoaktors zu finden, lässt sich die Mechanik von diesem zunächst als ein Feder-Masse-System mit Reibung modellieren. Eine Darstellung dieses Systems ist in Abbildung 4.4 gegeben.

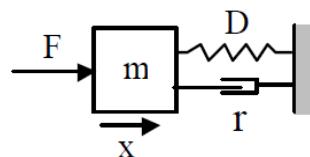


Abbildung 4.4.: Schema eines Feder-Masse-Systems mit Reibung [Kes]. Dabei steht F für die antreibende Kraft, m für die Masse, x für die Auslenkung, r für die Reibung und D für die Federkonstante.

Gemäß der Newtonschen Gesetze ergibt sich für die Auslenkung x der Masse m dieses System folgende Differentialgleichung zweiter Ordnung:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = F - D \cdot x - r \cdot \frac{dx}{dt}. \quad (4.3.3)$$

Für ein piezoelektrisches Element müssen sowohl der direkte als auch der inverse piezoelektrische Effekt berücksichtigt werden.

Beim direkten piezoelektrischen Effekt wird durch die Auslenkung x eine elektrische Ladung q erzeugt [Kes]:

$$q = k_g \cdot x. \quad (4.3.4)$$

Dabei wird der Proportionalitätsfaktor k_g als Generatorkonstante bezeichnet.

Der erzeugte Strom ist als zeitliche Änderung dieser Ladung definiert:

$$I = \frac{dq}{dt} = k_g \cdot v. \quad (4.3.5)$$

Im Fall des inversen piezoelektrischen Effekts wird durch die angelegte Spannung U_0 die mechanische Kraft F generiert [Kes]:

$$F = k_m \cdot U_0. \quad (4.3.6)$$

Die Proportionalitätskonstante k_m wird als Motorkonstante bezeichnet.

Durch Einsetzen von Gleichung 4.3.6 in Gleichung 4.3.3 ergibt sich die folgende Differentialgleichung:

$$k_m \cdot U_0 = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + D \cdot x + r \cdot \frac{dx}{dt}. \quad (4.3.7)$$

Diese kann durch den allgemeinen Ansatz [Kes]

$$x = x_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (4.3.8)$$

gelöst werden. Dabei ergibt sich für die Geschwindigkeit v , als zeitliche Ableitung des Ortes x , die Lösung

$$v = \frac{dx}{dt} = i\omega \cdot x_0 \cdot e^{i\omega t}. \quad (4.3.9)$$

Mit dieser Lösung für die Geschwindigkeit kann Gleichung 4.3.7 wie folgt geschrieben werden [Kes]:

$$k_m \cdot U_0 = i\omega \cdot m \cdot v + \frac{D \cdot v}{i\omega} + r \cdot v. \quad (4.3.10)$$

Mit Hilfe von Gleichung 4.3.5 lässt sich die mechanische Größe v in Gleichung 4.3.10 durch die elektrische Größe $\frac{I}{k_g}$ ersetzen. Durch Umformung kann dann die Impedanz Z_2 eines elektrischen Ersatzschalbildes bestimmen werden, welches die mechanischen Eigenschaften des Piezoaktorsystems beschreibt [Kes]:

$$Z_2 = \frac{U_0}{I} = i\omega \cdot \left(\frac{m}{k_m \cdot k_g} \right) + \frac{1}{i\omega \cdot \left(\frac{k_m \cdot k_g}{D} \right)} + \frac{r}{k_m \cdot k_g}. \quad (4.3.11)$$

Die Impedanz Z_2 entspricht der Impedanz einer Reihenschaltung aus einem Kondensator mit der Kapazität C_m , einem ohmschen Widerstand R_m und einer Spule mit der Induktivität L_m [Kes]:

$$Z_2 = i\omega \cdot L_m + \frac{1}{i\omega \cdot C_m} + R_m, \quad (4.3.12)$$

wobei

$$L_m = \frac{m}{k_m \cdot k_g}, \quad (4.3.13)$$

$$C_m = \frac{k_m \cdot k_g}{D} \quad (4.3.14)$$

$$\text{und } R_m = \frac{r}{k_m \cdot k_g}. \quad (4.3.15)$$

Dabei ist zu beachten, dass die Größen L_m , C_m und R_m frequenzabhängig sind. Da diese Werte in dem Ersatzschaltbild jedoch als konstant angenommen werden, kann es zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften des Piezoaktors nur in einem schmalen Bereich um eine Resonanz angewandt werden.

Parallel geschaltet ergeben der Kondensator C_1 und die oben hergeleitete Reihenschaltung ein Ersatzschaltbild, welches sowohl die elektrischen als auch die mechanischen Eigenschaften eines Piezoaktors in grober Näherung beschreibt. Wie bereits erwähnt, gilt dies allerdings nur in einem schmalen Bereich um eine Resonanzfrequenz.

Ein solches Ersatzschaltbild wird Van-Dyke-Ersatzschaltbild genannt und ist in Abbildung 4.5 dargestellt [Mor07].

Die Gesamtimpedanz Z_{ges} des Van-Dyke-Ersatzschaltbildes ergibt sich aus den Impedanzen Z_1 (Gleichung 4.3.2) und Z_2 (Gleichung 4.3.12) zu [Hus12]

$$Z_{ges}(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} = \frac{R_m + i \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} \right)}{1 - \omega C_1 \cdot \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} \right) + i \omega C_1 R_m}. \quad (4.3.16)$$

Der Betrag der Impedanz liefert schließlich den Scheinwiderstand des Van-Dyke-Ersatzschaltbildes [Hus12]:

$$|Z_{ges}(\omega)| = \sqrt{\frac{R_m^2 + \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} \right)^2}{\left(1 - \omega C_1 \cdot \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} \right) \right)^2 + (\omega C_1 R_m)^2}} \quad (4.3.17)$$

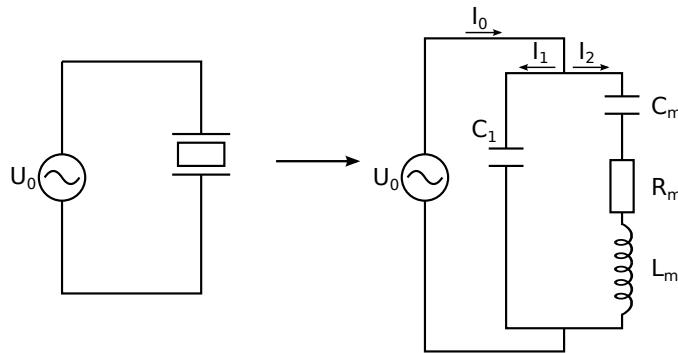


Abbildung 4.5.: Schematische Darstellung zum Van-Dyke-Ersatzschaltbild entnommen aus [Hus12] nach [Mor07].

Links: Skizze eines Schaltkreises bestehend aus einer Wechselspannungsquelle und einem Piezoelement.

Rechts: Darstellung des linken Schaltkreises, bei dem das Piezoelement durch das Van-Dyke-Ersatzschaltbild ersetzt wurde. C_1 steht für die rein elektrische Kapazität, während C_m , L_m und R_m die mechanischen Eigenschaften des Piezoelements widerspiegeln.

Durch Auftragen des Scheinwiderstandes des Piezoaktors gegen die Frequenz ergibt sich als Grundlinie ein für einen Kondensator typischer, zur Frequenz f antiproportionaler Abfall des Scheinwiderstands. Dieser wird hervorgerufen durch die elektrischen Eigenschaften des Piezoaktors und folglich beschrieben durch den elektrischen Zweig der Ersatzschaltung, welcher aus dem Kondensator C_1 besteht (vgl. Abbildung 4.6). Die Grundlinie wird überlagert von einem Resonanz-Antiresonanz-Paar, welches vom mechanischen Zweig der Schaltung, also der Reihenschaltung aus R_m , L_m und C_m herrührt. Im Nachfolgenden wird für Resonanz-Antiresonanz-Paar die Abkürzung R-A-Paar verwendet.

Die Frequenz der Serienresonanz f_R kann berechnet werden, indem der Zähler des Scheinwiderstandes (Gleichung 4.3.17) unter Vernachlässigung des ohmschen Widerstandes R_m , gleich Null gesetzt wird [Mor07]:

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_m \cdot C_m}}. \quad (4.3.18)$$

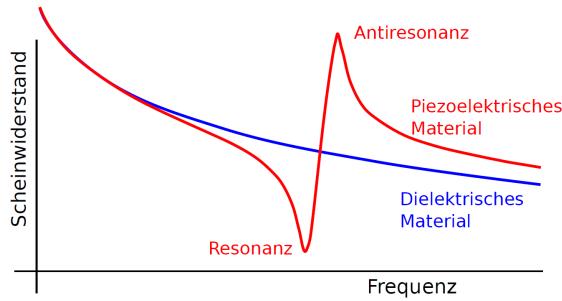


Abbildung 4.6.: Verlauf des Scheinwiderstandes eines Piezoelements (rot) und eines einfachen Kondensators mit Dielektrikum (blau) in Abhängigkeit von der Frequenz [efu].

Die Frequenz der Antiresonanz f_A lässt sich berechnen, indem der Nenner des Scheinwiderstandes (Gleichung 4.3.17) unter Vernachlässigung des ohmschen Widerstandes R_m , gleich Null gesetzt wird [Mor07]:

$$f_A = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_m} \cdot \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_m} \right)}. \quad (4.3.19)$$

4.3.2. Umsetzung der Scheinwiderstandsmessung

Um den Scheinwiderstand eines Piezoaktors zu messen, wird dieser zunächst zusammen mit einem ohmschen Messwiderstand in Reihe geschaltet (vgl. Abbildung 4.7). Dabei muss der Messwiderstand in der gleichen Größenordnung wie der Scheinwiderstand des Piezoaktors liegen [Hus12]. Da der Scheinwiderstand des Piezoaktors in einem Größenordnungsbereich von etwa $10^2 - 10^3 \Omega$ liegt, wurde ein Messwiderstand von $R_{mess} = (680,0 \pm 6,8) \Omega$ gewählt.

Um nun den Scheinwiderstand $|Z(f)|$ des Piezoaktors bei einer bestimmten Frequenz f zu bestimmen, wird zunächst eine Wechselspannung mit der Frequenz f an die Reihenschaltung angelegt. Durch Messen der Amplitude U_{mess} des Spannungsabfalls am Messwiderstand kann dann der Strom berechnet werden, welcher den Widerstand durchfließt:

$$I = \frac{U_{mess}}{R_{mess}}. \quad (4.3.20)$$

Da der Messwiderstand in Reihe mit dem Piezoaktor geschaltet ist, folgt nach der ersten Kirchhoff'schen Regel, dass der den Piezoaktor durchfließende Strom gleich dem Strom I am Messwiderstand ist.

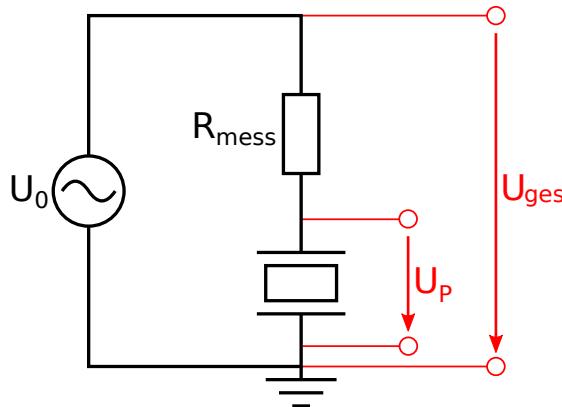


Abbildung 4.7.: Schaltkreis zur Umsetzung der Scheinwiderstandsmessung nach [Hus12]. Im Vergleich zur Arbeit von Husmann wird in der vorliegenden Arbeit der Spannungsabfall über dem Piezoaktor U_P und nicht über dem Widerstand U_R gemessen.

Durch Messen des Spannungsabfalls am Piezoaktor a_p kann somit der Schweinwiderstand des Piezoaktors berechnet werden:

$$|Z| = \frac{a_{\text{piezo}}}{I}. \quad (4.3.21)$$

Die Wechselspannung an der Reihenschaltung wird mit Hilfe eines Frequenzgenerators erzeugt. Am WASA-Pelletttarget wird der Piezoaktor mit einer Spannungsamplitude von $105 \text{ V}_{\text{pp}}$ betrieben. Dabei liegt die Betriebstemperatur des Piezoaktors am Pelletttarget bei etwa 14 K , während die hier vorgestellten Scheinwiderstandsmessungen, wenn nicht anders erwähnt, bei Raumtemperatur durchgeführt werden. Daher muss bei einer Messung bei Raumtemperatur zum Erzeugen einer vergleichbar starken Schwingungsamplitude des Piezoaktors wie beim Pelletttargetbetrieb eine Spannungsamplitude von $U_0 = 20 \text{ V}_{\text{pp}}$ verwendet werden [Hus12].

Mit einem Oszilloskop wird der zeitliche Verlauf der Spannungsabfälle über die gesamte Reihenschaltung (U_{ges}) und den Piezoaktor (U_P) gemessen. Der zeitliche Verlauf der über den Messwiderstand abfallenden Spannung U_R kann der zweiten Kirchhoffschen Regel zufolge mit Hilfe von U_{ges} und U_P berechnet werden:

$$U_R = U_{\text{ges}} - U_P. \quad (4.3.22)$$

Um das Spektrum des Scheinwiderstandes eines Piezoaktors aufnehmen zu können, wurde von C. Husmann ein LabView-Programm geschrieben, welches die Messung automatisiert. Das Benutzerinterface des Programms ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

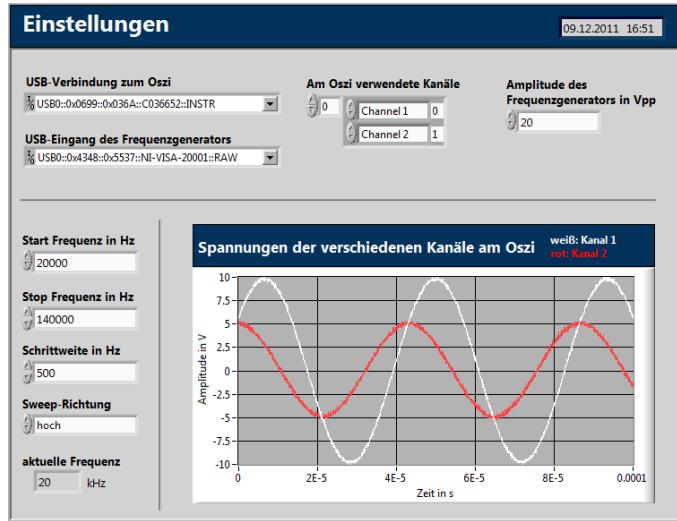


Abbildung 4.8.: LabView-Programm zur Automatisierung der Scheinwiderstandsmessung [Hus12]. Das Programm bietet die Möglichkeit einen Frequenzbereich, der vermessen wird, sowie die Schrittweite, in der gemessen wird, vorzugeben. Des Weiteren lässt sich die Peak-to-Peak Amplitude des vom Frequenzgenerator erzeugten sinusförmigen Wechselspannungssignals einstellen.

Dieses Programm steuert den Frequenzgenerator an und durchläuft schrittweise ein vom Benutzer vorgegebenes Frequenzintervall (üblicherweise 5 - 140 kHz). Die Schrittweite, mit der das Frequenzintervall durchfahren wird, kann ebenfalls vom Benutzer vorgegeben werden.

In jedem Frequenzschritt werden die vom Oszilloskop aufgenommenen Daten von dem LabView-Programm ausgelesen und abgespeichert.

Anschließend werden die gemessenen Spannungsverläufe U_P und U_R mit Hilfe eines Root-Programmes mit der allgemeinen Cosinusfunktion nach dem Prinzip der kleinsten Abstandsquadrate angefittet:

$$U(t) = a \cdot \cos(\omega \cdot t + c). \quad (4.3.23)$$

Über die Fitparameter können anschließend die Spannungsamplituden U_{mess} und U_{piezo} sowie die Frequenz $f = \frac{\omega}{2\pi}$ der Spannungsverläufe bestimmt werden. Zusammen mit diesen Parametern lässt sich über die Gleichungen 4.3.21 und 4.3.20 der Scheinwiderstand des Piezoaktors in Abhängigkeit von der Frequenz f berechnen. Durch Auftragen des Scheinwiderstandes gegen die Frequenz ergibt sich das Scheinwiderstandsspektrum des Piezoaktors.

Da die Wiederholbarkeiten für die mit dem Oszillograph aufgenommenen Messwerte

vom Hersteller für den verwendeten Betriebsmodus nicht genauer spezifiziert worden sind, werden im Nachfolgenden die von ROOT berechneten Unsicherheiten der Fit-Parameter verwendet. Werden für einen Graphen keine Unsicherheiten angegeben, so skaliert ROOT die Parameterunsicherheiten bei einem Fit mit der Wurzel aus dem reduzierten χ^2 .

4.3.3. Scheinwiderstandsmessung mehrerer Düsenhaltersysteme

Mit Hilfe des oben beschriebenen Verfahrens wird das Scheinwiderstandsspektrum von neun Düsenhaltersystemen bei Raumtemperatur gemessen. Die vermessenen Halter sind in Tabelle 4.3 aufgelistet. Mit angegeben ist, ob sich während der Messungen eine Düse in dem Halter befindet und, sofern sie dort schon einmal zum Einsatz gekommen sind, aus welchem Grund die Halter aus dem WASA-Pelletttarget ausgebaut wurden.

Halter Nummer	eingebaute Düse	Grund für den Ausbau
3N	ja	-
5N	ja	-
4	ja	Leck in der Piezodurchführung
6	ja	Leck in der Piezodurchführung
7	ja	keine Arbeitsfrequenz
13	nein	-
14	ja	Umbauarbeiten
15	ja	blockierte Düse
16	nein	-

Tabelle 4.3.: Liste der zur Scheinwiderstandsmessung verwendeten Halter. Dabei ist für jeden Halter mit angegeben, ob während der Messungen eine Düse in den Halter eingesetzt ist. Sofern die Halter zuvor bereits im WASA-Pelletttarget im Einsatz waren, ist der Grund mit angegeben, warum sie dort wieder ausgebaut worden sind.

Für jeden Halter wird der Frequenzbereich von 5 kHz bis 140 kHz in 100 Hz Schritten vermessen. Die Amplitude der angelegten Spannung beträgt bei allen Messungen

$$U_0 = 20 \text{ V}_{\text{pp}}.$$

Als Beispiel für die gemessenen Scheinwiderstandsspektren ist in Abbildung 4.9 das Spektrum von Halter 15 gegeben. Die gemessenen Spektren der anderen Halter sind im Anhang enthalten.

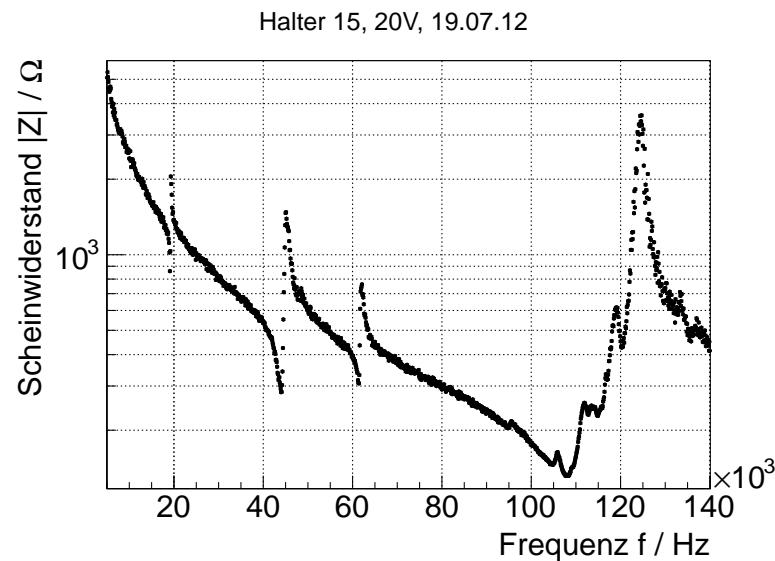


Abbildung 4.9.: Messergebnis für das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 15, gemessen im Frequenzbereich 5 kHz bis 140 kHz in Schritten von 100 Hz.

Bestimmen der Resonanzfrequenz

Um die Resonanzfrequenzen eines auftretenden R-A-Paars zu bestimmen, wird dieses noch einmal mit geringerer Schrittweite (10 Hz) vermessen, was eine detailliertere Darstellung des R-A-Paars erlaubt. Mit Hilfe von ROOT kann das R-A-Paar mit der in Gleichung 4.3.17 gegebenen Funktion für den Scheinwiderstand angefittet werden. Über die Fit-Parameter L_m und C_m kann dann mit Hilfe von Gleichung 4.3.18 die Resonanzfrequenz des R-A-Paares berechnet werden.

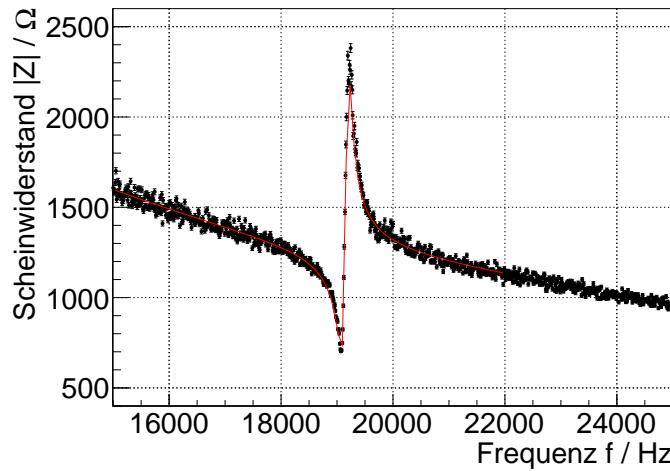


Abbildung 4.10.: Messergebnis für das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 15, gemessen im Frequenzbereich 15 kHz bis 25 kHz in Schritten von 10 Hz. Die rote, durchgezogene Linie stellt den Verlauf der Fit-Funktion (vgl. Gleichung 4.3.17) dar, die zur Bestimmung der Größen R_m , L_m , C_m und C_1 verwendet wird.

Für das in Abbildung 4.10 als Beispiel dargestellte R-A-Paar ergeben sich folgende Werte für die Fit-Parameter, die Resonanzfrequenz f_R und die Antiresonanzfrequenz f_A :

$$\begin{aligned} R_m &= (1037,4 \pm 6,3)\Omega \\ L_m &= (1,4883 \pm 0,0026)\text{H} \\ C_m &= (0,04661 \pm 0,00008)\text{nF} \\ C_1 &= (6,5156 \pm 0,0025)\text{nF} \\ f_R &= (19,109 \pm 0,024)\text{kHz} \\ f_A &= (19,177 \pm 0,024)\text{kHz} \end{aligned}$$

Um einen direkten Vergleich mit den Mikrofonmessungen zu ermöglichen, werden die Fit-Parameter in Abschnitt 4.6.1 dazu benutzt, um die Wirkleistungsspektren der Piezoaktoren anhand ihrer Scheinwiderstandsspektren zu berechnen.

Des Weiteren werden diese Ausschnitte aus den Scheinwiderstandspektronen bei den folgenden Untersuchungen verwendet, um den näheren Bereich um die Resonanzfrequenz genauer betrachten und eventuelle zusätzlich auftretende Unterstrukturen entdecken zu können.

Kategorisierung der Messergebnisse

Die gemessenen Scheinwiderstände liegen in einem Größenordnungsbereich von $10^2 \Omega$ bis $10^4 \Omega$. Dabei sind die bei Halter 7 gemessenen Scheinwiderstände um einen Faktor drei größer als bei den anderen Haltern.

In allen gemessenen Spektren treten sowohl ausgeprägte R-A-Paare als auch schwächere R-A-Paare auf. Sofern sich keine bemerkenswerten Regelmäßigkeiten feststellen lassen, werden Letztere in der nachfolgenden Beschreibung der Messergebnisse nicht berücksichtigt.

Bei jedem der neun Spektren tritt im Bereich von 100 kHz bis 140 kHz ein sehr stark ausgeprägtes R-A-Paar auf. Die Resonanz dieses Paars liegt bei fast allen Haltern im Bereich von 110 kHz. Ausgenommen ist wieder Halter 7, bei dem die Resonanz bei etwa 120 kHz liegt.

Zur weiteren Charakterisierung lassen sich die neun Halter in drei unterschiedliche Kategorien einteilen.

Kategorie I

Die Spektren von sechs der neun vermessenen Düsenhaltersysteme weisen große Ähnlichkeit auf und werden daher in der Kategorie I zusammengefasst. Zur Kategorie I gehören die Halter 4, 6, 14, 15, 3N und 5N. Als Beispiel für diese Kategorie ist in Abbildung 4.11 das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 14 zu sehen. Die Spektren der andern Halter sind im Anhang enthalten.

Neben dem großen R-A-Paar im Bereich von 100 kHz bis 140 kHz treten bei diesen Haltern noch drei weitere, gut zu erkennende R-A-Paare unterhalb von 100 kHz auf. Die Resonanzen dieser Paare liegen bei allen sechs Haltern bei ungefähr denselben Frequenzen

$$f_{I,R1} \approx 19 \text{ kHz},$$

$$f_{I,R2} \approx 45 \text{ kHz}$$

$$\text{und } f_{I,R3} \approx 64 \text{ kHz}.$$

Dabei stehen $f_{I,R1}$, $f_{I,R2}$ und $f_{I,R3}$ für die Resonanzfrequenzen des ersten, zweiten und dritten R-A-Paares. Die Resonanzfrequenzen der einzelnen Messungen weichen um maximal 2 kHz von diesen Werten ab.

Die Stärke der Resonanzausprägungen im Spektrum unterscheidet sich von Halter zu Halter. Das Verhältnis zwischen den Resonanzen ist allerdings bei allen sechs Haltern in etwa gleich. So besitzt die Resonanz bei $f_{I,R2}$ die stärkste Ausprägung. Die Resonanzen bei $f_{I,R1}$ und $f_{I,R3}$ sind ungefähr von gleicher Größe.

Anhand der detaillierten Messungen mit 10 Hz-Schritten können die R-A-Paare im Nachfolgenden einer näheren Betrachtung unterzogen werden. Dabei werden exemplarisch für alle Halter die Messungen der R-A-Paare von Halter 14 gezeigt.

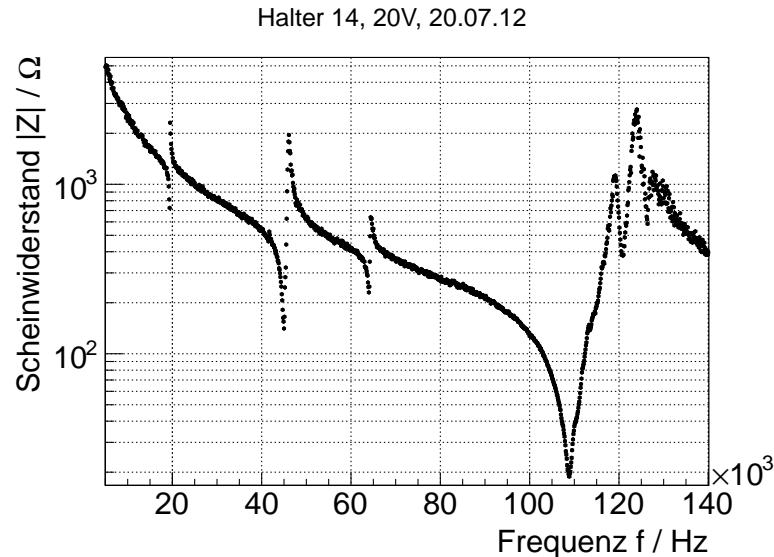


Abbildung 4.11.: Messergebnis für das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 14, gemessen im Frequenzbereich 5 kHz bis 140 kHz in Schritten von 100 Hz.

- Resonanz bei $f_{I,R1}$

Die typische Struktur des R-A-Paars (vgl. Abbildung 4.6) ist bei allen Haltern der Kategorie I deutlich zu erkennen. Dies ist exemplarisch an dem in Abbildung 4.13 zwischen 15 kHz und 25 kHz dargestellten Scheinwiderstandsspektrum von Halter 14 zu sehen. Bei dem Halter 3N tritt zusätzlich noch eine kleine Struktur kurz unterhalb der Resonanzfrequenz auf (vgl. Anhang A: Abbildung A.2 (mitte)), welche bei den anderen Haltern nicht zu sehen ist.

- Resonanz bei $f_{I,R2}$

Bei fast allen Haltern ist die R-A-Struktur klar zu erkennen. So auch bei dem von Halter 14 exemplarisch dargestellten Scheinwiderstandsverlauf des R-A-Paars um 45 kHz (vgl. Abbildung 4.14). Die einzige Ausnahme bildet Halter 3N, bei dem die zu erwartende R-A-Paarstruktur von einem weiteren R-A-Paar überlagert ist (vgl. Abbildung 4.15). Des Weiteren ist bei den vier Haltern 04, 14, 3N und 5N knapp unterhalb der Resonanzfrequenz in Ansätzen die Struktur eines zusätzlichen, wesentlich kleineren R-A-Paars zu erkennen.

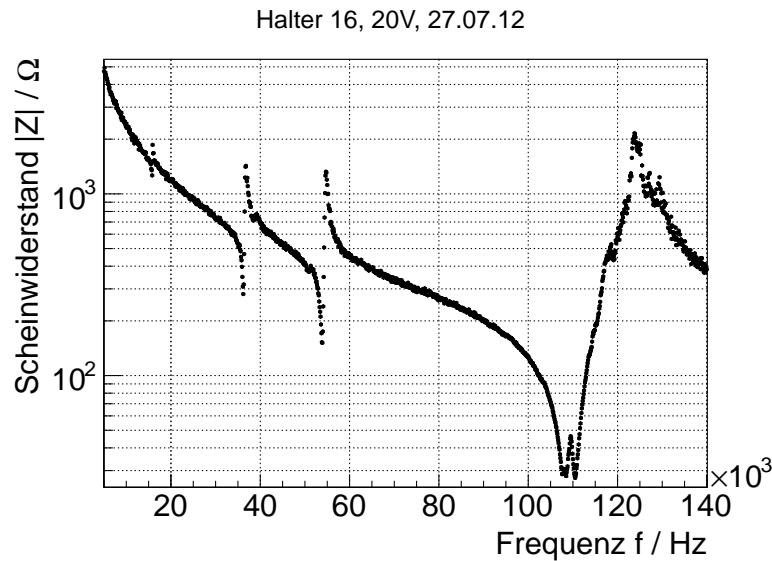


Abbildung 4.12.: Messergebnis für das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 16, gemessen im Frequenzbereich 5 kHz bis 140 kHz in Schritten von 100 Hz.

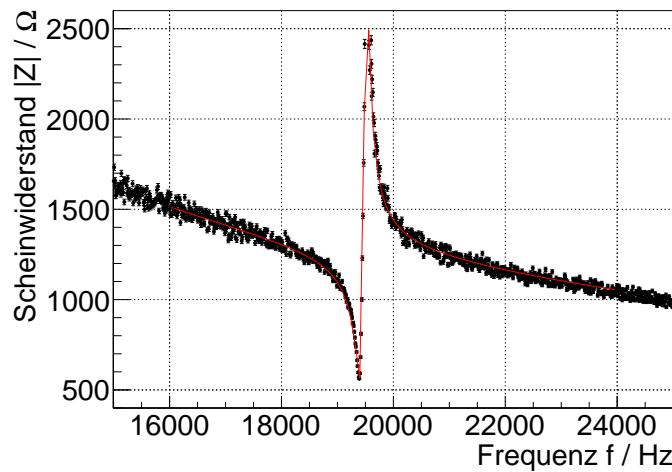


Abbildung 4.13.: Messergebnis für das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 14, gemessen im Frequenzbereich 15 kHz bis 25 kHz in Schritten von 10 Hz. Die rote, durchgezogene Linie stellt den Verlauf der Fit-Funktion (vgl. Gleichung 4.3.17) dar, die zur Bestimmung der Größen R_m , L_m , C_m und C_1 verwendet wird.

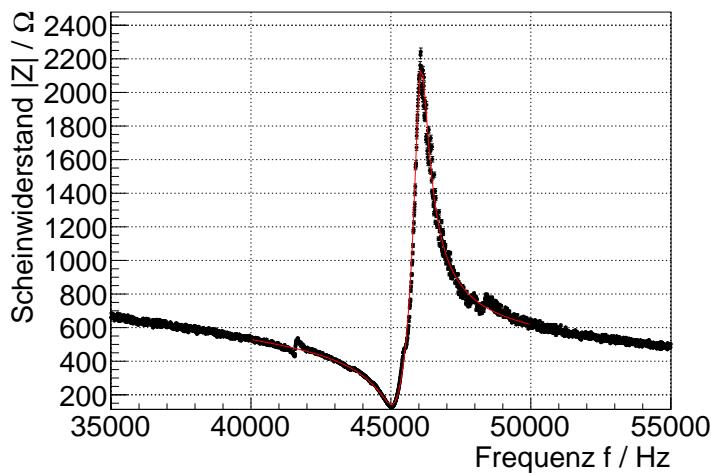


Abbildung 4.14.: Messergebnis für das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 14, gemessen im Frequenzbereich 35 kHz bis 55 kHz in Schritten von 10 Hz. Die rote, durchgezogene Linie stellt den Verlauf der Fit-Funktion (vgl. Gleichung 4.3.17) dar, die zur Bestimmung der Größen R_m , L_m , C_m und C_1 verwendet wird.

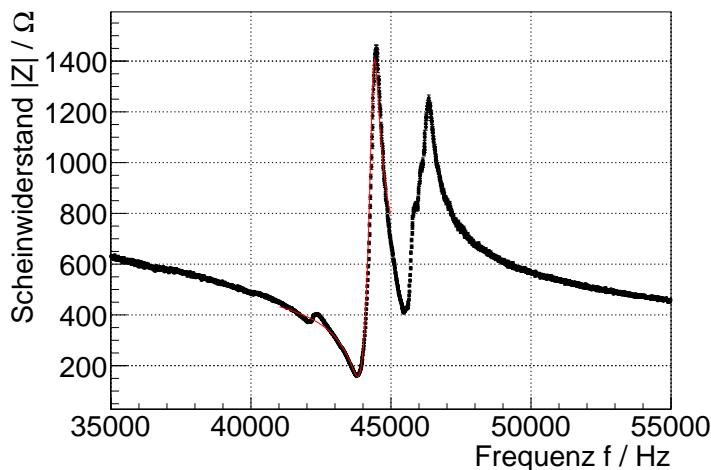


Abbildung 4.15.: Messergebnis für das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 3N, gemessen im Frequenzbereich 35 kHz bis 55 kHz in Schritten von 10 Hz. Die rote, durchgezogene Linie stellt den Verlauf der Fit-Funktion (vgl. Gleichung 4.3.17) dar, die zur Bestimmung der Größen R_m , L_m , C_m und C_1 verwendet wird.

- Resonanz bei $f_{I,R3}$

Die R-A-Struktur ist bei allen Halter einwandfrei zu erkennen. Als Beispiel dafür ist in Abbildung 4.16 das R-A-Paar von Halter 14 im Bereich zwischen 55 kHz bis 75 kHz zu sehen.

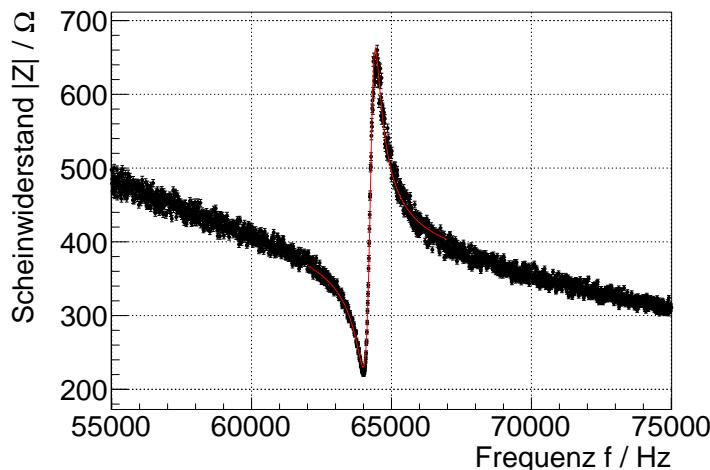


Abbildung 4.16.: Messergebnis für das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 14, gemessen im Frequenzbereich 55 kHz bis 75 kHz in Schritten von 10 Hz. Die rote, durchgezogene Linie stellt den Verlauf der Fit-Funktion (vgl. Gleichung 4.3.17) dar, die zur Bestimmung der Größen R_m , L_m , C_m und C_1 verwendet wird.

Kategorie II

Die Spektren der Halter 13 und 16 passen nicht in das Schema von Kategorie I und ähneln einander. Daher werden sie in Kategorie II zusammengefasst. In Abbildung 4.12 ist als Beispiel für diese Kategorie das Spektrum von Halter 16 gegeben.

Bei beiden Haltern tritt zusätzlich zu dem großen R-A-Paar zwischen 100 und 140 kHz ein weiteres R-A-Paar mit einer Resonanzfrequenz $f_{II,R3}$ von etwa 53 kHz auf. Diese Resonanzfrequenz stimmt sehr gut mit der in Abschnitt 4.2 bestimmten Resonanzfrequenz für die longitudinal Schwingungsmodus überein. Ferner besitzen beide Spektren ein R-A-Paar mit einer Frequenz $f_{II,R2}$ in einem Bereich von 30 bis 40 kHz (Halter 13: $f_{II,R2} \approx 31$ kHz; Halter 16: $f_{II,R2} \approx 36$ kHz). Bei Halter 16 tritt bei der Frequenz $f_{II,R1}$ von etwa 16 kHz noch ein weiteres R-A-Paar auf, welches im Spektrum von Halter 13 nicht zu sehen ist.

Beim Betrachten der detaillierten Messungen der Resonanzen ist zu erkennen, dass bei allen Resonanzen die erwartete R-A-Paarstruktur auftritt. So zum Beispiel auch

bei dem in Abbildung 4.17 dargestellten R-A-Paar von Halter 16 um 54 kHz.

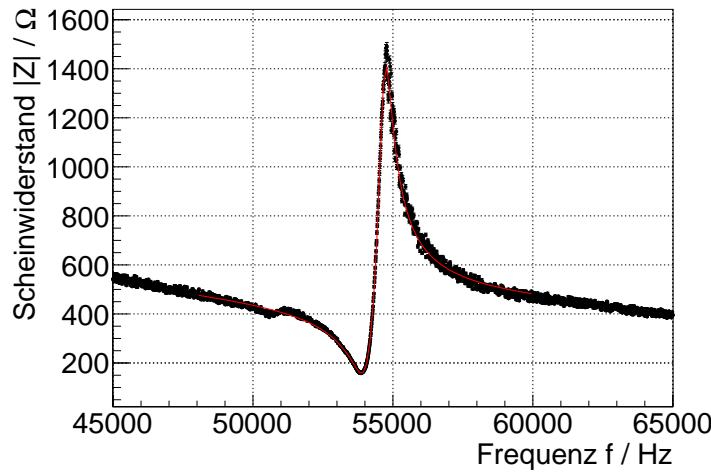


Abbildung 4.17.: Messergebnis für das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 16, gemessen im Frequenzbereich 45 kHz bis 65 kHz in Schritten von 10 Hz. Das im Spektrum auftretende R-A-Paar wurde zur Bestimmung der Größen R_m , L_m , C_m und C_1 mit der Funktion 4.3.17 angefittet.

Kategorie III

Halter 7 wurde einer eigenen Kategorie zugeordnet, da die gemessenen Scheinwiderstände um einen Faktor drei größer sind als bei den anderen Haltern. Neben dem R-A-Paar zwischen 100 und 140 kHz sind schwache R-A-Paare im Bereich um die Frequenzen $f_{III,R1} \approx 18$ kHz, $f_{III,R2} \approx 36$ kHz und $f_{III,R3} \approx 60$ kHz zu erkennen (vgl. Abbildung 4.18).

Diese sind wesentlich schwächer ausgeprägt als die R-A-Paare bei den anderen Haltern. In Abbildung 4.19 ist beispielhaft das R-A-Paar im Bereich von $f_{III,R3} \approx 60$ kHz dargestellt.

4.3.4. Folgerungen zu den Scheinwiderstandsmessungen an unterschiedlichen Düsenhaltersystemen

Für den Frequenzbereich zwischen 5 kHz und 140 kHz werden aufgrund der Rechnungen in Abschnitt 4.2 insgesamt zwei Resonanzen bei den Frequenzen $f_l = (54 \pm 11)$ kHz und $f_c = (96 \pm 20)$ kHz erwartet. Die Messergebnisse zeigen jedoch ein Auftreten von mehr als zwei Resonanzen in diesem Bereich. So treten bei den

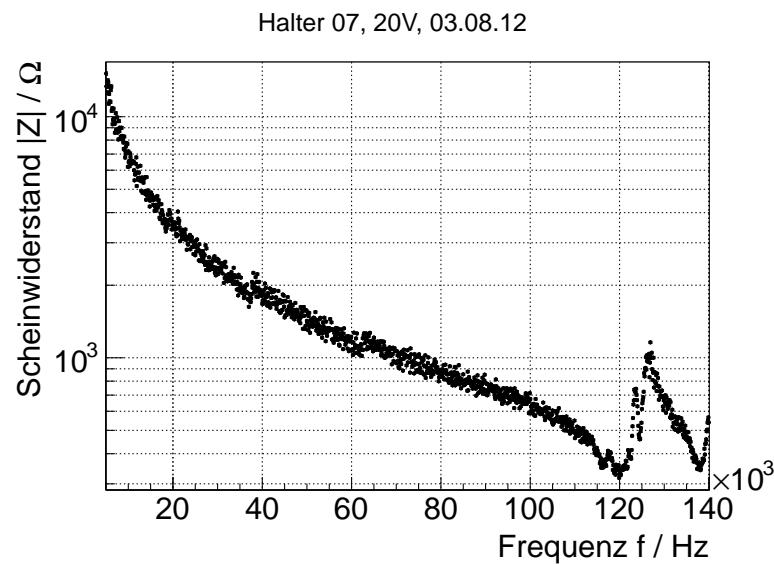


Abbildung 4.18.: Messergebnis für das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 7, gemessen im Frequenzbereich 5 kHz bis 140 kHz in Schritten von 100 Hz.

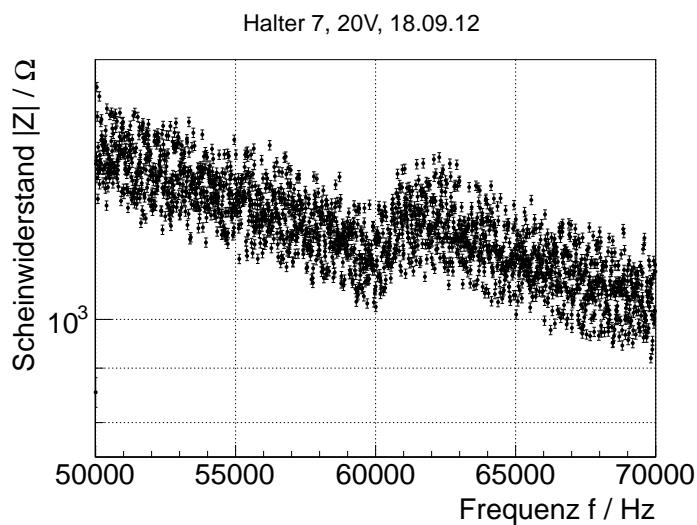


Abbildung 4.19.: Messergebnis für das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 7, gemessen im Frequenzbereich 50 kHz bis 70 kHz in 10 Hz Schritten.

Haltern der Kategorie I zum Beispiel durchgängig vier ausgeprägte Resonanzen auf. Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten könnte es sich bei der Resonanz um 110 kHz um die Resonanz der Breitenschwingung (f_c) handeln. Bei einer der zwei Resonanzen um $f_{I,R3} = 64$ kHz und $f_{I,R2} = 45$ kHz könnte es sich um die Resonanz der longitudinalen Schwingungsmodus handeln. Allerdings sind die Abweichungen der Resonanzfrequenzen $f_{I,R3}$ und $f_{I,R2}$ von f_l mit je etwa 10 kHz wesentlich größer, als die Abweichungen der Resonanzfrequenz $f_{II,R3} = 53$ kHz, die bei den Haltern der Kategorie II auftritt.

Beim Vergleich der Kategorien mit den Angaben in Tabelle 4.3 ist zu sehen, dass bei allen Haltern aus Kategorie I Düsen eingebaut sind, während bei den Haltern der Kategorie II keine Düsen eingebaut sind. Dies ist ein starkes Indiz dafür, dass die eingesetzte Düse der Grund für die unterschiedlichen Spektren der Halter aus Kategorie I und Kategorie II ist. Durch den Einbau der Düsen wird das System aus Piezoaktor und Kupferhalter um die Düse erweitert, was zu einer Veränderung der Resonanzfrequenzen führen kann.

Das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 7, der aufgrund einer fehlenden Arbeitsfrequenz aus dem Pelletttarget ausgebaut wurde (vgl. Tabelle 4.3), weicht stark von den Spektren der anderen Halter ab und weist nur sehr schwache Resonanzen im Bereich unterhalb von 100 kHz auf. Der stark erhöhte Verlauf der Grundlinie von Halter 7 weist darauf hin, dass die elektrische Kapazität C_1 des Piezoaktors abgenommen hat. Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass der Piezoaktor einen Teil seiner piezoelektrischen Eigenschaften verloren hat.

4.3.5. Scheinwiderstandsmessungen am WASA-Pelletttarget

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konnte die Scheinwiderstandsmessung direkt an dem im WASA-Pelletttarget eingebauten Halter 2N durchgeführt werden. Da das Düsenhaltersystem für den Betrieb am Pelletttarget auf Temperaturen von etwa 14 K gekühlt werden kann, konnte so das Scheinwiderstandsspektrum bei unterschiedlichen Temperaturen zwischen Betriebs- und Raumtemperatur gemessen werden. Diese Messungen erlauben eine Untersuchung der Verschiebungen der Resonanzfrequenzen in Abhängigkeit von der Temperatur.

Des Weiteren konnte zum ersten Mal während der Scheinwiderstandsmessung eines Piezoaktors dessen Auswirkungen auf den Dropletstrahl beobachtet werden. Durch den Vergleich zwischen dem gemessenen Scheinwiderstandsspektrum und der Dropletqualität lässt sich beurteilen, wie stark die in den Scheinwiderstandsmessungen auftretenden Resonanzen mit der Entstehung von Droplets korreliert sind, die für den Betrieb des Pelletttargets geeignet sind.

Am WASA-Pelletttarget in Jülich wird die vom Frequenzgenerator erzeugte Wechselspannung verstärkt bevor sie den Piezoaktor erreicht. Für die Scheinwiderstandsmessung wird in die Zuleitung zum Piezoaktor hinter dem Verstärker ein 680Ω Widerstand eingebaut, so dass die in Abbildung 4.7 dargestellte Schaltung vorliegt. Nun können, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, die Spannungsabfälle über die Reihenschaltung und den Piezoaktor gemessen werden. Anhand dieser Werte lässt sich mit Hilfe der Gleichungen 4.3.21 und 4.3.20 der Scheinwiderstand berechnen.

Messungen bei Raumtemperatur

Zunächst wird das Scheinwiderstandsspektrum von dem im Pelletttarget eingebauten Halter 2N bei Raumtemperatur gemessen. Während der Messung strömt kein Gas durch den Halter und die Spannungsamplitude am Frequenzgenerator beträgt 6 V_{pp} . Das Scheinwiderstandsspektrum dieser Messung ist in Abbildung 4.20 zu sehen.

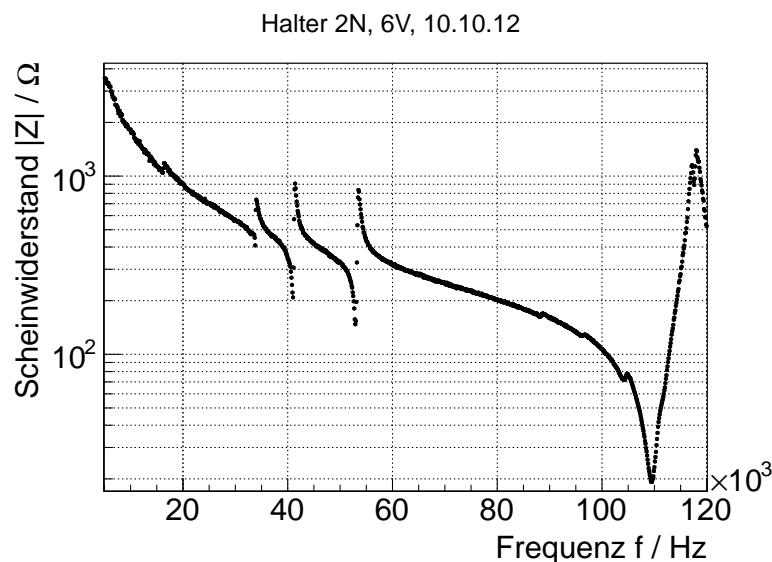


Abbildung 4.20.: Messergebnis für das Scheinwiderstandsspektrum von dem im WASA-Pelletttarget eingebauten Halter 2N, gemessen im Frequenzbereich 5 kHz bis 120 kHz in 100 Hz Schritten, bei einer Temperatur von 300 K.

Wie bei den anderen Haltern tritt im Spektrum von Halter 2N im Bereich knapp über 100 kHz ein sehr stark ausgeprägtes R-A-Paar auf. Des Weiteren sind im Bereich

von 80 kHz bis 107 kHz drei kleine R-A-Paaransätze zu beobachten. Unterhalb von 80 kHz sind vier R-A-Paare mit den folgenden Resonanzfrequenzen zu erkennen

$$\begin{aligned}f_{PT,R1} &= (16,21 \pm 0,50) \text{ kHz} \\f_{PT,R2} &= (33,69 \pm 0,19) \text{ kHz} \\f_{PT,R3} &= (41,03 \pm 0,16) \text{ kHz} \\f_{PT,R4} &= (52,93 \pm 0,16) \text{ kHz.}\end{aligned}$$

Damit lässt sich das Spektrum weder Kategorie I noch Kategorie II eindeutig zuordnen. Allerdings fällt beim direkten Vergleich von Halter 2N mit den Haltern der Kategorie II auf, dass bei allen drei Haltern eine Resonanz bei etwa 53 kHz auftritt. Dies ist von besonderem Interesse, da diese Frequenz sehr nahe bei der in Abschnitt 4.2 bestimmten Resonanzfrequenz der longitudinalen Schwingungsmoden liegt.

Ferner besitzen sowohl Halter 2N als auch Halter 16 aus Kategorie II eine Resonanz bei etwa 16 kHz.

Verlauf der Resonanzfrequenzen beim Herunterkühlen des Düsenhalter-systems

Die bisherigen Scheinwiderstandsmessungen sind alle bei Raumtemperatur durchgeführt worden. Da das Pelletttarget allerdings bei Temperaturen von 14 K bis 17 K betrieben wird, besitzen diese nur eine bedingte Aussagekraft über das Verhalten der Piezoaktoren im Pelletttargetbetrieb. So hat C. Husmann in ihrer Arbeit festgestellt, dass sich die Resonanzfrequenzen in Abhängigkeit von der Temperatur verschieben können [Hus12]. Bei einer Vergleichsmessung des Scheinwiderstandes zwischen etwa 300 K und 85 K konnte sie für die Resonanz der longitudinalen Schwingungsmoden eine Frequenzverschiebung von 12 kHz beobachten. Um die Auswirkungen des Herunterkühlens auf den Piezoaktor zu untersuchen, wird am WASA-Pelletttarget das Scheinwiderstandsspektrum des Piezoaktors bei unterschiedlichen Temperaturen gemessen.

Dazu wird das Düsenhaltersystem mit Hilfe des Kaltkopfes schrittweise heruntergekühlt und bei den Temperaturen 300 K, 250 K, 100 K, 50 K, 25 K, 16 K, 15,5 K und 15 K das Scheinwiderstandsspektrum des Halters aufgenommen. Während der Messungen wird Wasserstoff mit einem Druck von 600 mbar bis 800 mbar durch die Düse gepresst. Bei den Messungen oberhalb von 16 K ist der Wasserstoff gasförmig. Während der Messungen bei 16 K, 15,5 K und 15 K ist er flüssig. Das 15,5 K-Spektrum

wurde in 10 Hz-Schritten aufgenommen, alle anderen Spektren in 100 Hz-Schritten. Um die Scheinwiderstandspektren bei den unterschiedlichen Temperaturen besser miteinander vergleichen zu können, wurden sie in Abbildung 4.21, Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23 einander gegenübergestellt. Dabei wurden die Spektren zunächst von 5 kHz bis 120 kHz aufgenommen (vlg. Spektren bei 300 K und 150 K). Da sich das R-A-Paar bei ungefähr 110 kHz mit sinkender Temperatur jedoch zu höheren Frequenzen verschiebt, wurden anschließend über den Bereich von 5 kHz bis 160 kHz gemessen. Die Messung bei 15 K wurde anschließend in dem für den Targetbetrieb relevanten Bereich von 20 kHz bis 90 kHz durchgeführt.

Anhand dieser Spektren sind mehrere Veränderungen auszumachen, die beim Herunterkühlen des Piezoaktors auftreten. Bei sinkender Temperatur steigt die durch den elektrischen Zweig des Van-Dyke-Ersatzschaltbildes hervorgerufene Grundlinie des Scheinwiderstands an. Der Grund dafür liegt darin, dass die Kapazität des Piezoaktors mit fallender Temperatur abnimmt (vgl. Gleichung 4.3.1) [Mor07]. So beträgt die durch Fitten der R-A-Paare bestimmte Kapazität C_1 des Piezoaktors bei Raumtemperatur etwa 9 nF und bei 15 K ungefähr 4 nF.

Des Weiteren fällt auf, dass das ausgeprägte R-A-Paar oberhalb von 100 kHz sich mit abnehmender Temperatur zu höheren Frequenzen verschiebt. So beträgt seine Resonanzfrequenz bei Raumtemperatur ungefähr 109 kHz und steigt mit sinkender Temperatur auf etwa 141 kHz bei 15,5 K.

Bei tieferen Temperaturen tritt um 81 kHz ein R-A-Paar auf, welches bei Raumtemperatur nicht zu erkennen war. Die Resonanzfrequenz dieses Paares beträgt bei 150 K $f_{PT,R5} = (80,64 \pm 0,14)$ kHz und verschiebt sich mit weiter sinkender Temperatur geringfügig zu höheren Frequenzen.

Um die Verschiebungen der Resonanzfrequenzen besser erkennen zu können, sind in Abbildung 4.24 die Resonanzfrequenzen der verschiedenen R-A-Paare gegen die Temperatur aufgetragen.

Dabei lässt sich feststellen, dass das R-A-Paar, mit einer Resonanzfrequenz von $f_{PT,R4} = (52,93 \pm 0,16)$ kHz bei Raumtemperatur, sich bei sinkender Temperatur zu höheren Frequenzen verschiebt. Im Gegensatz dazu wird die Resonanzfrequenz $f_{PT,R2} = (33,69 \pm 0,19)$ kHz des zweiten R-A-Paares bei tieferen Temperaturen kleiner. Die in dem 300 K-Spektrum auftretende Resonanz bei $f_{PT,R1} = (16,21 \pm 0,50)$ kHz ist im tieferen Temperaturbereich nicht mehr zu sehen.

Das R-A-Paar, dessen Resonanzfrequenz bei Raumtemperatur bei $f_{R3} = (41,03 \pm 0,16)$ kHz liegt, ist das einzige Paar, bei dem keine Verschiebung aufgrund der sinkenden Temperatur beobachtet werden kann.

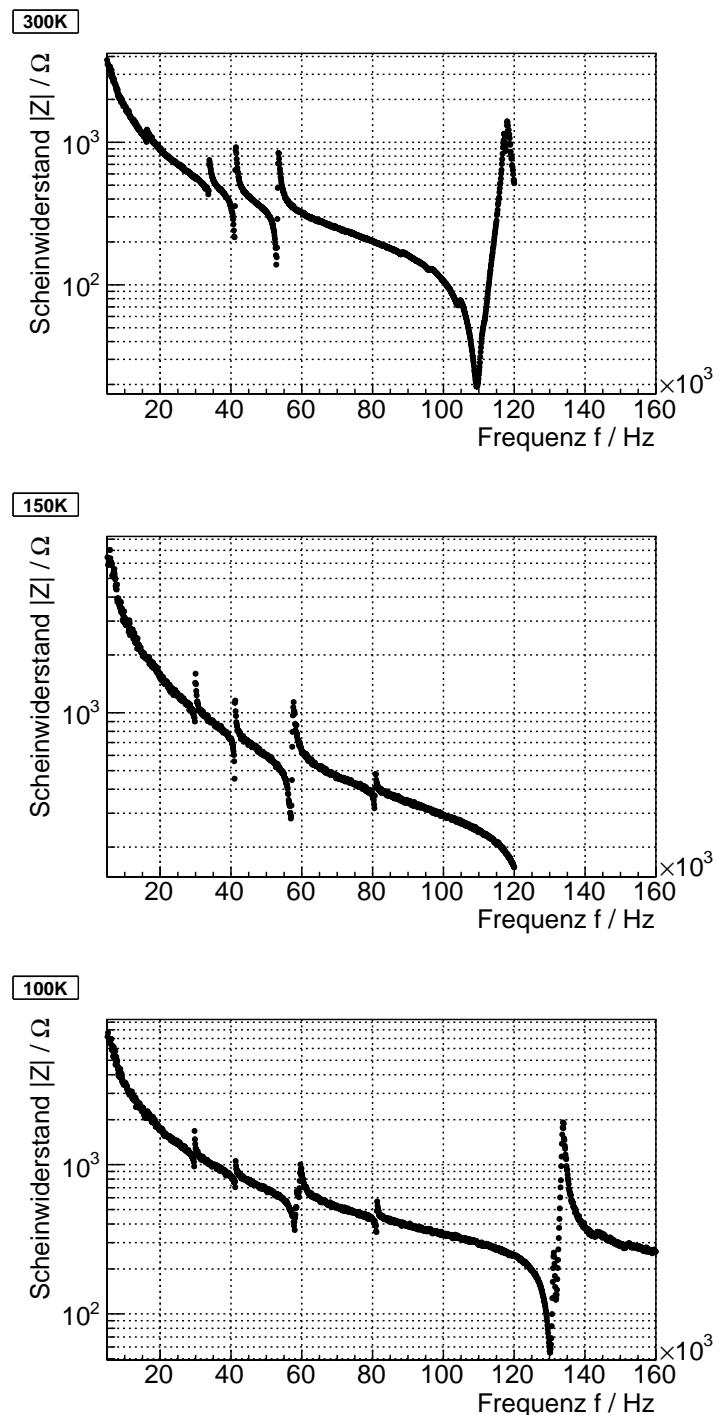


Abbildung 4.21.: Messung für das Scheinwiderstandsspektrum des im WASA-Pelletttarget eingebauten Düsenhalters 2N bei den Temperaturen 300 K (oben), 150 K (mitte) und 100 K (unten).

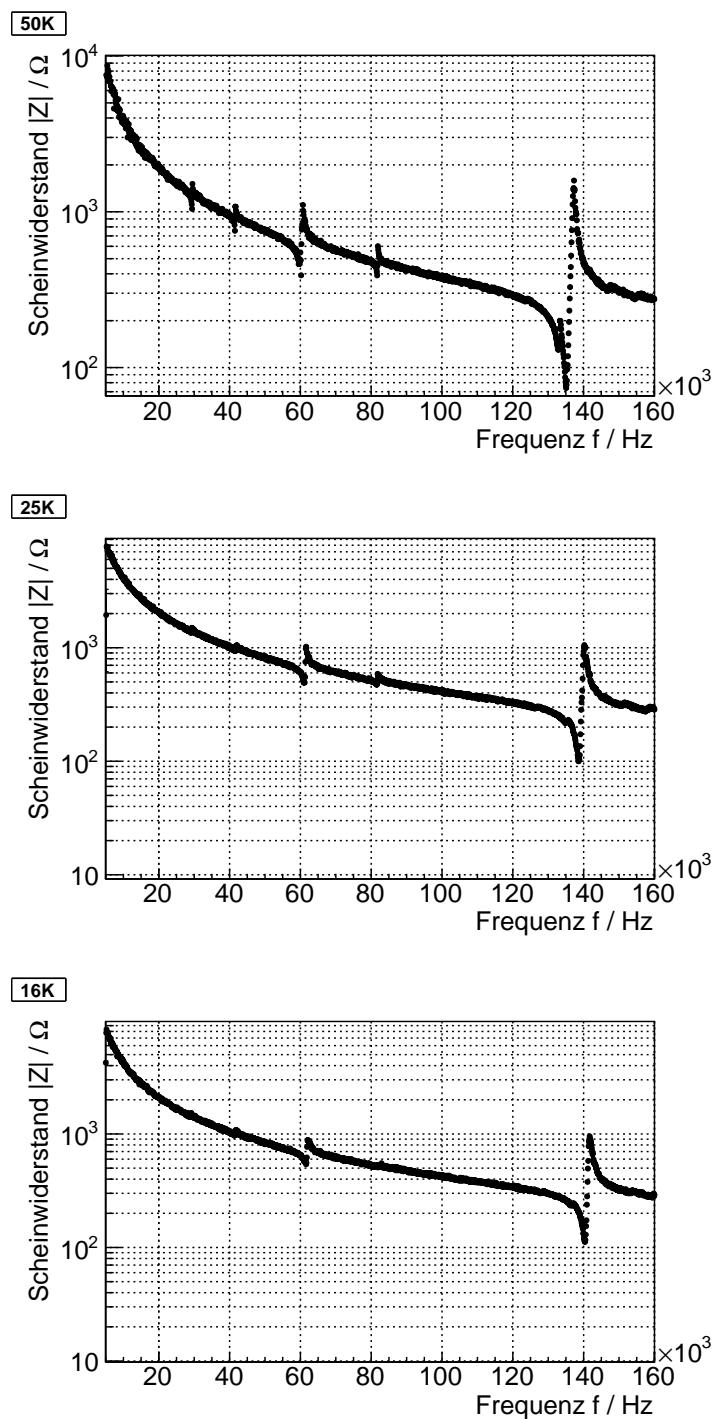


Abbildung 4.22.: Messung für das Scheinwiderstandsspektrum des im WASA-Pelletttarget eingebauten Düsenhalters 2N bei den Temperaturen 50 K (oben), 25 K (mitte) und 16 K (unten).

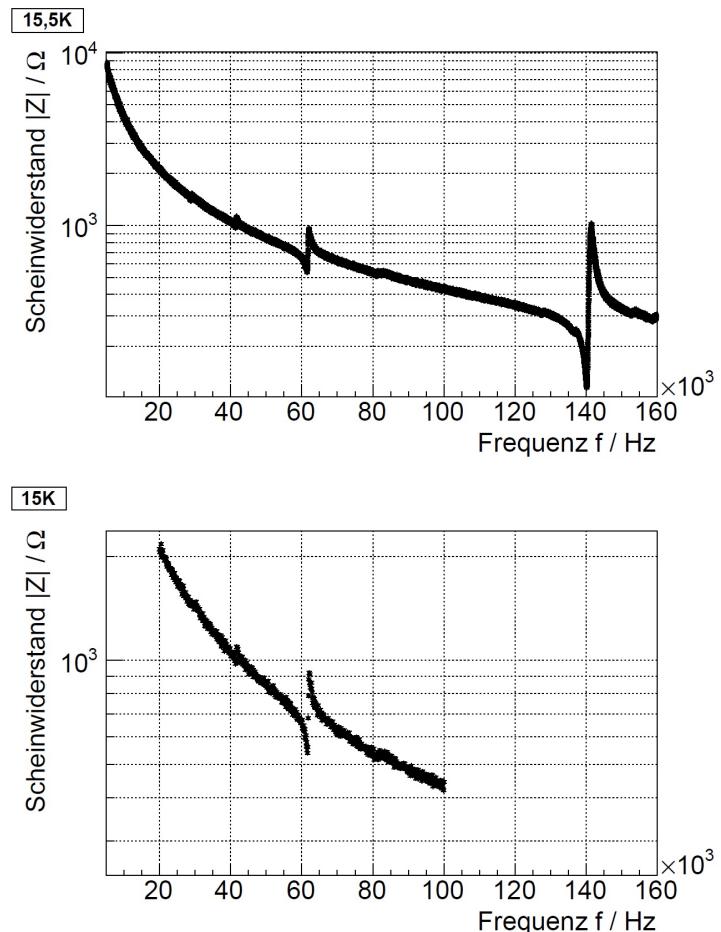


Abbildung 4.23.: Messung für das Scheinwiderstandsspektrum des im WASA-Pelletttarget eingebauten Düsenhalters 2N bei den Temperaturen 15,5 K (oben) und 15 K (unten).

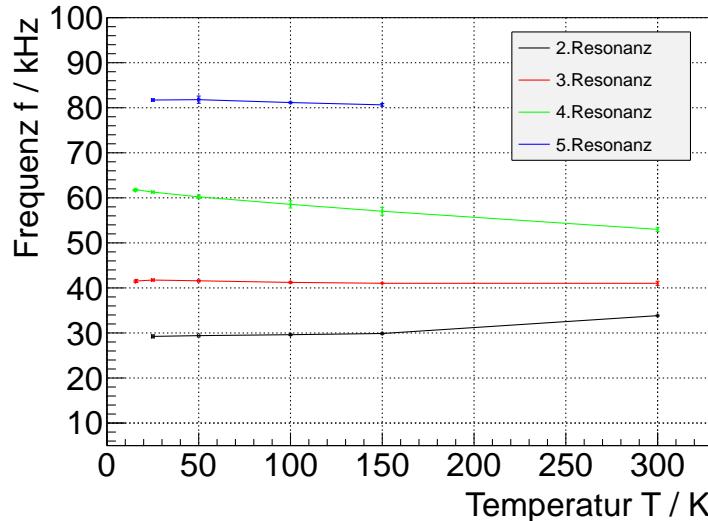


Abbildung 4.24.: Verlauf der Resonanzfrequenzen in Abhängigkeit von der Temperatur. Bei den Temperaturen unterhalb von 25 K war es aufgrund ihrer geringen Ausprägung nicht mehr möglich alle R-A-Paare anzufitten.

Die Verschiebungen Δf der Resonanzen, bei der jeweils maximal bestimmbaren Temperaturdifferenz ΔT_{max} , sowie ihre durchschnittliche Frequenzverschiebung pro Kelvin sind in Tabelle 4.4 aufgelistet. Anhand der Werte in Tabelle 4.4 kann festgestellt werden, dass die durchschnittliche Frequenzverschiebung pro Kelvin für die vierte Resonanz mit $(31,0 \pm 1,6)$ kHz am größten ist. Des Weiteren ist zu sehen, dass die Verschiebung der dritten Resonanz kleiner ist, als der zunehmende Fehler. Daher kann davon ausgegangen werden, dass für diese Resonanz keine Verschiebung stattfindet. Der negative Wert für die Verschiebung der dritten Resonanz zeigt, dass sie sich mit sinkender Temperatur in die entgegengesetzte Richtung von den anderen Resonanzen bewegt.

Vergleich zwischen Scheinwiderstandsspektrum und Dropletstrahl

Während der Scheinwiderstandsmessungen bei 15 K und 16 K wird der Verlauf des Dropletstrahls über den in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Aufbau aus Kamera und Stroboskoplampe beobachtet. Dies ermöglicht es die Frequenzbereiche zu bestimmen, in denen sich für den Betrieb geeignete Droplets bilden.

Während der Messung bei 15 K können in den Frequenzbereichen von 41 kHz bis 42,2 kHz, von 60,4 kHz bis 68,5 kHz und von 80 kHz bis 89,6 kHz geeignete Droplets beobachtet werden.

Resonanz	Temperaturverschiebung $T_h - T_t / \text{K}$	Frequenzverschiebung $\Delta f / \text{kHz}$	Durchschnittliche Frequenzverschiebung pro Kelvin $\frac{\Delta f}{\Delta T} / (\text{Hz}/\text{K})$
2	300 - 25	$-4,46 \pm 0,72$	$-16,2 \pm 2,6$
3	300 - 15,5	$0,44 \pm 0,49$	$1,5 \pm 1,7$
4	300 - 15	$8,82 \pm 0,45$	$31,0 \pm 1,6$
5	300 - 25	$1,1 \pm 0,4$	$4,0 \pm 1,5$

Tabelle 4.4.: Die Frequenzverschiebung Δf der Resonanzen bei einer Temperaturverschiebung von einer hohen Temperatur T_h zu einer tiefen Temperatur T_t . Sowie die Durchschnittliche Frequenzverschriebung pro Kelvin $\frac{\Delta f}{\Delta T}$, wobei $\Delta T = T_h - T_t$ ist.

Die Resonanzfrequenzen der gleichzeitig durchgeföhrten Scheinwiderstandsmessung (vgl. Abbildung 4.23) betragen:

$$\begin{aligned} f_{PT,R2} &\approx 30 \text{ kHz} \\ f_{PT,R3} &\approx 42 \text{ kHz} \\ f_{PT,R4} &= (61,75 \pm 0,13) \text{ kHz} \\ f_{PT,R5} &\approx 82 \text{ kHz}, \end{aligned}$$

Dabei ist anzumerken, dass die R-A-Paare mit den Resonanzfrequenzen $f_{PT,R2}$, $f_{PT,R3}$ und $f_{PT,R5}$ im Verhältnis zur Grundlinie so klein werden, dass es nicht mehr möglich ist sie anzufitten. Daher wurden ihre Resonanzfrequenzen direkt aus dem Graphen abgelesen.

Durch einen Vergleich der Resonanzfrequenzen der Scheinwiderstandsmessung mit den Bereichen, in denen geeignete Droplets auftreten, fällt auf, dass sich die Dropletbereiche in der Umgebung der Resonanzfrequenz gebildet haben. Die Ausnahme bildet der Bereich um die Resonanzfrequenz $f_{PT,R2}$, in dem keine Droplets auftreten.

Für die Messung bei 16 K wurde die Entstehung geeigneter Droplets in den Frequenzbereichen von 41,3 kHz bis 42,2 kHz, von 60,9 kHz bis 67,5 kHz, von 81,7 kHz bis 87,9 kHz, von 127,5 kHz bis 130 kHz und von 136 kHz bis 160 kHz festgestellt.

Aus der gleichzeitig durchgeführten Scheinwiderstandsmessung (vgl. Abbildung 4.22) ergeben sich die folgenden Resonanzfrequenzen:

$$\begin{aligned} f_{PT,R2} &\approx 28 \text{ kHz} \\ f_{PT,R3} &= (41,53 \pm 0,35) \text{ kHz} \\ f_{PT,R4} &= (61,801 \pm 0,072) \text{ kHz} \\ f_{PT,R5} &\approx 82 \text{ kHz} \\ f_{PT,R6} &\approx 141 \text{ kHz} \end{aligned}$$

Dabei mussten auch hier die Resonanzfrequenzen $f_{PT,R2}$ und $f_{PT,R5}$ vom Graphen abgelesen werden.

Beim Vergleich der Resonanzfrequenzen mit den Frequenzbereichen ist wie bereits bei der Messung um 15 K zu erkennen, dass sich die Droplets in Bereichen um die Resonanzfrequenzen gebildet haben. Eine Ausnahme bildet der Bereich von 127,5 kHz bis 130 kHz, in dem bei der Scheinwiderstandsmessung keine Resonanz aufgetreten ist, sich aber dennoch Droplets gebildet haben. Außerdem haben sich, wie bereits bei der 15 K Messung, keine Droplets im Bereich der Resonanzfrequenz $f_{PT,R2}$ gebildet. Bei beiden Messungen fällt auf, dass sich bei den Resonanzfrequenzen $f_{PT,R4}$ und $f_{PT,R5}$ die Droplets nicht nur in deren unmittelbaren Bereich bilden, sondern auch weiter oberhalb von diesen. Gleiches gilt für den Bereich um die Resonanzfrequenz $f_{PT,R6}$.

Messbox

Um die Scheinwiderstandsmessung direkt am Pelletttarget in Jülich zu erleichtern, wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit eine Messbox entwickelt, die zukünftig dauerhaft zwischen Verstärker und Piezoaktor geschaltet werden kann. Eine Skizze des Schaltplans der Messbox ist in Abbildung 4.25 gegeben.

Mit dieser Box kann für Messungen ein 680Ω -Widerstand vor den Piezoaktor geschaltet werden. Über zwei BNC Anschlüsse kann dann der Spannungsabfall über den Piezoaktor und der Spannungsabfall über die Reihenschaltung aus Piezoaktor und ohmschen Widerstand gemessen werden (Vgl. Abbildung 4.7). So lässt sich, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, das Scheinwiderstandsspektrum des im Pelletttarget eingebauten Halters messen. Zum regulären Betrieb des Pelletttargets kann dann der ohmsche Widerstand vor dem Piezoaktor mit Hilfe eines Kippschalters weggeschaltet werden, so dass an diesem keine Leistung verloren geht.

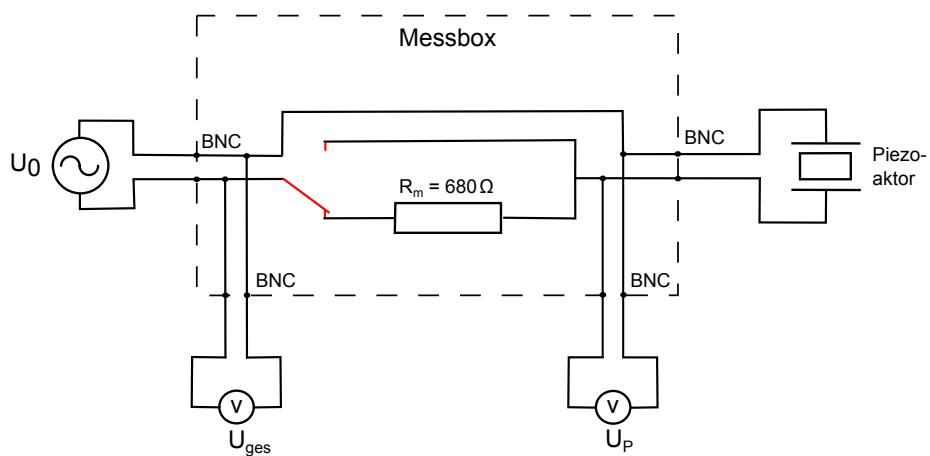


Abbildung 4.25.: Schaltplan der Messbox für die Scheinwiderstandsmessungen am WASA-Pelletttarget. Der gestrichelte Rahmen markiert den Bereich der sich in der Messbox befindet. Rot dargestellt ist der Schalter mit dem der 680Ω -Widerstand in den Stromkreis geschaltet werden kann. Bei den Anschlüssen der Messbox handelt es sich um BNC-Stecker. Sie sind dementsprechend im Schaltplan mit „BNC“ gekennzeichnet.

4.3.6. Folgerungen aus den Scheinwiderstandsmessungen am WASA-Pelletttarget

Wie bereits bei den in Abschnitt 4.3.3 präsentierten Spektren der Halter aus Kategorie I und II, treten auch bei dem in WASA-Pellettart eingebauten Halter 2N mehr als die zwei in Abschnitt 4.2 postulierten Resonanzen auf. Dabei stimmt die bei Raumtemperatur gemessene Resonanz $f_{PT,R4} = (52,93 \pm 0,16)$ kHz des Halters 2N sehr gut mit der berechneten Frequenz $f_l = (54 \pm 11)$ kHz für die Resonanz der longitudinalen Schwingungsmodus überein. Dies lässt den Schluss zu, dass es sich bei der Resonanz $f_{PT,R4}$ um die Resonanz f_l der longitudinalen Schwingungsmodus handelt.

C. Husmann hat für die temperaturbedingte Verschiebung der Resonanzfrequenz f_l eines freischwingenden Piezoaktors beim Abkühlen auf 85 K eine Verschiebung von 12 kHz zu höheren Frequenzen beobachtet [Hus12]. Für das Abkühlen auf 14 K postuliert sie eine Verschiebung um 18 kHz nach oben. Während des Herunterkühlens des Düsenhaltersystems am WASA-Aufbau konnte allerdings bei einer Temperatur von 15 K nur eine Verschiebung der Resonanzfrequenz $f_{PT,R4}$ um maximal $(8,82 \pm 0,45)$ kHz im Vergleich zur Raumtemperatur beobachtet werden. Ein möglicher Grund für diese relativ geringe Verschiebung der Resonanzfrequenz könnte die Kopplung des Piezoaktors mit dem Kupferdüsenhalter sein. Das System, bestehend aus Halter und Piezoaktor, weist möglicherweise ein von einem freischwingenden Piezoaktor unterschiedliches Verhalten bei Temperaturänderung auf.

Eine weitere Besonderheit ist das Auftreten der Resonanz um 81 kHz beim Abkühlen des Düsenhaltersystems. Eine mögliche Erklärung dafür könnte in der temperaturbedingten Verformung des Kupferhalters und des Piezoaktors liegen. Diese könnten dazu führen, dass die Verbindung zwischen Halter und Piezoaktor bei unterschiedlichen Temperaturen unterschiedlich fest ist und so bewirken, dass Schwingungsmoden neu auftreten oder verschwinden.

Des Weiteren lässt sich anhand der Messungen beobachten, dass sich die Verschiebungen der auftretenden Resonanzen bei sinkender Temperatur sehr stark unterscheiden. Während die Resonanzfrequenzen $f_{PT,R4}$ und $f_{PT,R5}$ mit sinkender Temperatur steigen, bleibt die Resonanzfrequenz $f_{PT,R3}$ konstant und die Resonanzfrequenz $f_{PT,R2}$ nimmt ab. So verschiebt sich die Resonanzfrequenz $f_{PT,R2}$, die bei Raumtemperatur $(33,69 \pm 0,19)$ kHz beträgt, beim Abkühlen auf 25 K um $(4,46 \pm 0,72)$ kHz zu kleineren Frequenzen. Es besteht folglich kein einheitliches Verhalten der Resonanzen bei Veränderung der Temperatur.

Bei dem direkten Vergleich des Scheinwiderstandsspektrums mit der Dropletqualität hat sich gezeigt, dass das Scheinwiderstandsspektrum sich sehr gut dafür eignet die Frequenzbereiche zu bestimmen, bei denen es im Betrieb zu einer guten Dropletbildung kommt. Dass im Bereich der Resonanzfrequenz $f_{PT,R2}$ um 29 kHz keine Droplets aufgetreten sind, liegt vermutlich daran, dass die Resonanz nur noch sehr schwach vorhanden war und ihre Schwingungen nicht mehr auf den Flüssigkeitstrahl übertragen worden sind. Allgemein fällt auf, dass die Bereiche, bei denen sich Droplets bilden, nicht eng um die Resonanzfrequenz begrenzt sind. Sie erstrecken sich in den meisten Fällen noch ein ganzes Stück über die Resonanzfrequenz hinaus zu höheren Frequenzen.

4.4. Die Mikrofonmessungen

Bei den vorangegangenen Scheinwiderstandsmessungen wurde das Schwingungsverhalten des Düsenhaltersystems nur anhand intrinsischer Eigenschaften des Piezoaktors betrachtet. Für eine erfolgreiche Dropletproduktion ist allerdings die Übertragung der Piezoaktorschwingungen auf den Flüssigkeitsstrahl der entscheidende Faktor. Um das Schwingungsverhalten des Düsenhaltersystems an unterschiedlichen Stellen und insbesondere das Schwingungsverhalten einzelner Komponenten zu betrachten, wird im Nachfolgenden das von C. Husmann entwickelte Verfahren der Mikrofonmessung verwendet.

4.4.1. Aufbau zur Mikrofonmessung

Zur Umsetzung der Mikrofonmessung hat C. Husmann den in Abbildung 4.26 dargestellten Aufbau entwickelt [Hus12].

Bei diesem Aufbau wird das Düsenhalterystem mit dem tellerförmigen Teil des Halters an einen Flansch angebracht. Dieser befindet sich kopfüber, also mit der Düsen spitze nach unten zeigend, in einer speziell für die Mikrofonmessung angefertigten Halterung. Zum Betrieb des Piezoaktors wird ein Frequenzgenerator verwendet, der über einen BNC Anschluss am Flansch mit dem Piezoaktor verbunden werden kann. Um die Schwingungen des Düsenhalterystems aufnehmen zu können, wird ein Mikrofon verwendet. Dieses befindet sich in einer speziellen Halterung, die es erlaubt, das Mikrofon in alle Richtungen zu bewegen und zu fixieren. So ist es möglich, das Schallintensitätsspektrum des Düsenhalterystems aus verschiedenen Mikrofonpositionen aufzunehmen.

Bei dem verwendeten Mikrofon handelt es sich um ein Elektretmikrofon, welches,

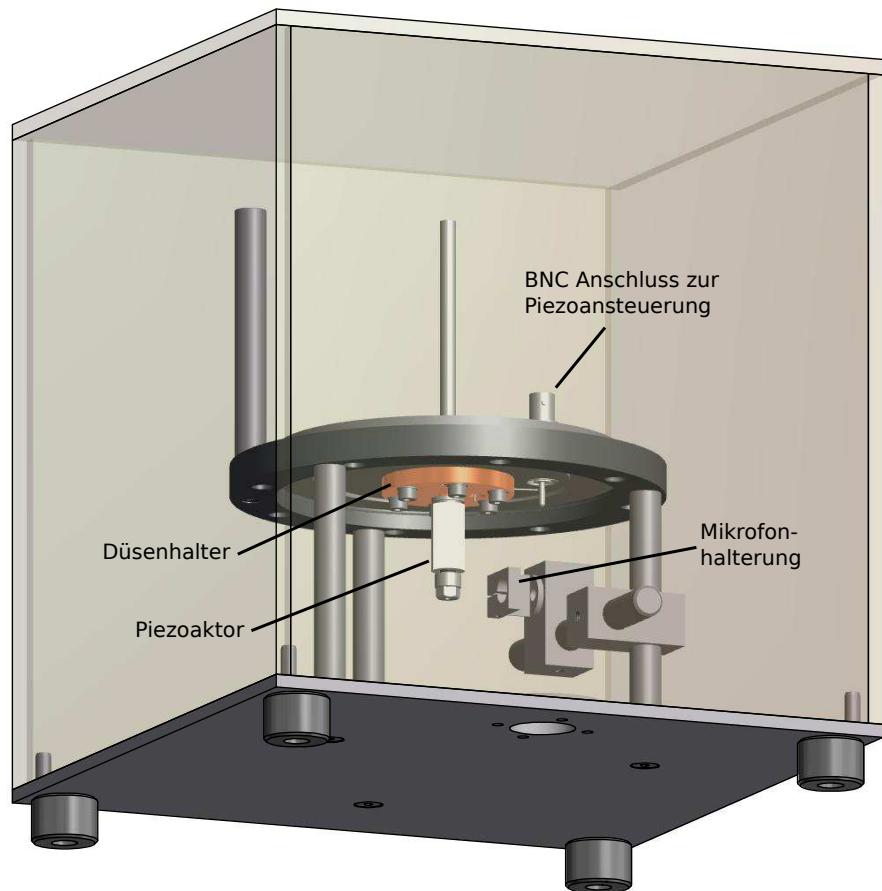


Abbildung 4.26.: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Mikrofonmessung [Hus12]. Zum Schutz der Glasdüse vor Verunreinigungen ist der Aufbau mit einer Plexiglashaube abgedeckt.

vereinfacht dargestellt, aus einer leitfähigen Membran und einer knapp dahinter befestigten Metallplatte besteht. Zusammen bilden diese einen Kondensator, in dem über Anlegen einer Spannung die Ladungen getrennt werden können. Wird die Membran nun durch äußere Einflüsse, wie zum Beispiel einer Schallwelle oder einen direkten mechanischen Einfluss, in Schwingung versetzt, so verändert sich die vom Abstand zwischen Membran und Metallplatte abhängige Kapazität des Kondensators. Die daraus resultierende Schwankung der Spannung lässt sich messen und als elektrisches Signal auswerten.

Das Elektretmikrofon ist für Frequenzen im hörbaren Bereich ($< 20 \text{ kHz}$) ausgelegt. Da der zu untersuchende Frequenzbereich des Piezoaktors von 20 kHz bis 140 kHz reicht, muss das Wechselspannungssignal des Piezoaktors verstärkt werden. Neben dem Verstärker wird außerdem ein Hochpassfilter verwendet, um die Signale mit einer Frequenz unterhalb von 20 kHz herauszufiltern. Dadurch sollen eventuelle Störungen durch Umgebungsgeräusche vermieden werden. Das verstärkte Signal wird schließlich von einem Oszilloskop dargestellt.

Um die Messung zu automatisieren, wurde von C. Husmann ein LabView-Programm (vgl. Abbildung 4.27) entwickelt, welches den Frequenzgenerator ansteuert und schrittweise einen vorgegebenen Frequenzbereich durchläuft.

Dabei liest es gleichzeitig über das Oszilloskop die verstärkte Peak-to-Peak Spannung des Mikrofons aus und speichert diese zusammen mit der Frequenz in einer Datei ab. Durch Auftragen der gemessenen Spannungen gegen die Frequenz ergibt sich das Schallintensitätsspektrum der Messung.

Das LabView-Programm bietet ebenfalls die Möglichkeit bei konstanter Frequenz die Amplitude der vom Frequenzgenerator erzeugten Spannung schrittweise zu durchlaufen. Diese Option wird im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht verwendet.

Durch die Untersuchung der Schallintensitätsspektren lässt sich schließlich bestimmen, bei welchen Frequenzen es zu starken Schwingungen innerhalb des Düsenhaltersystems gekommen ist.

4.5. Berechnung der mechanischen Leistung

Um die gemessenen Intensitäten der Mikrofonmessungen besser mit den Intensitäten der Resonanzen der Scheinwiderstandsmessungen vergleichen zu können, soll im Nachfolgenden das Wirkleistungsspektrum der Piezoaktoren anhand der gemessenen Resonanzen berechnet werden. Die Wirkleistung der Piezoaktoren entspricht dem Anteil der elektrischen Leistung, die der Piezoaktor in mechanische Schwingung, Reibung und Wärmeentwicklung umwandelt.

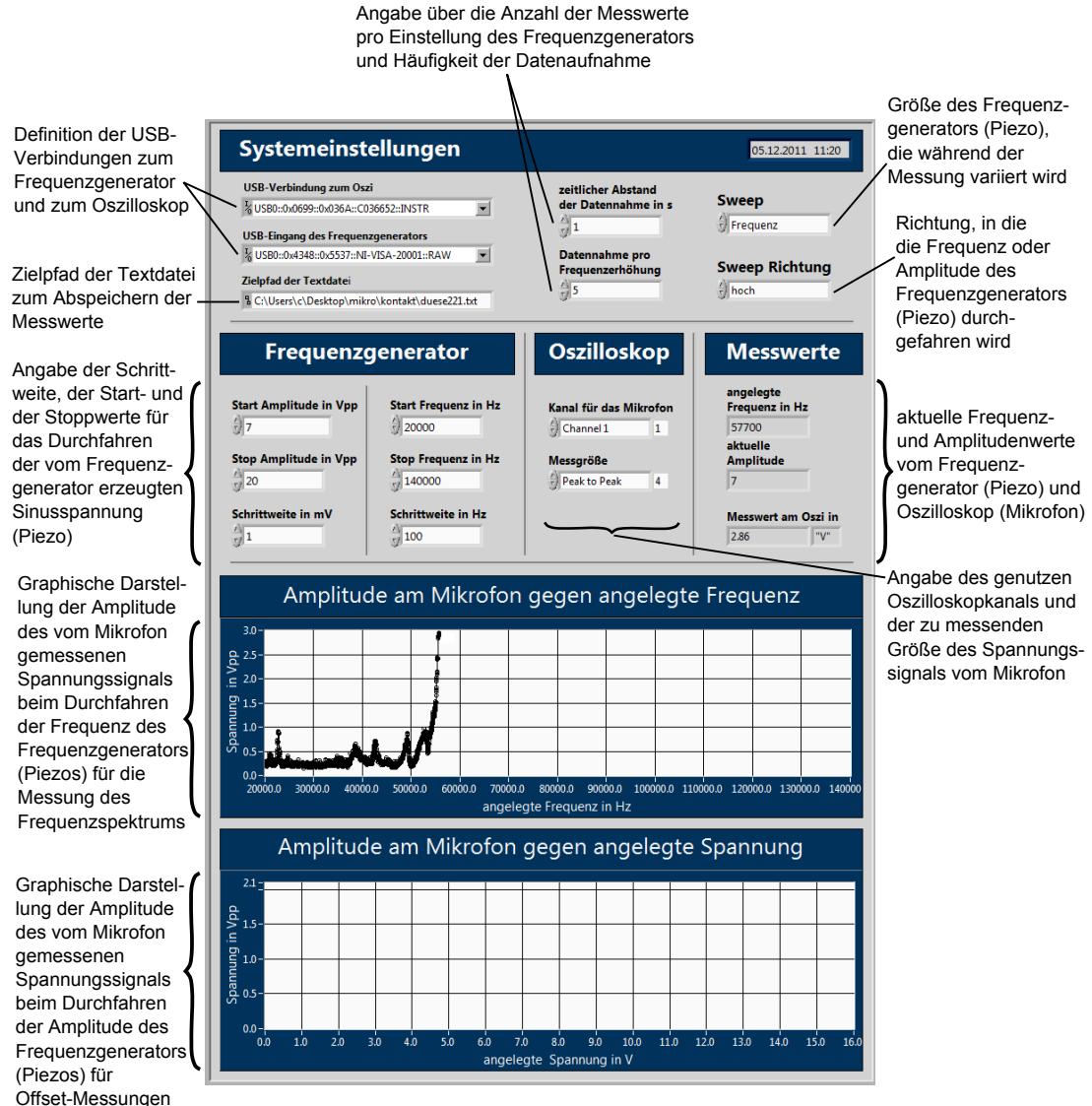


Abbildung 4.27.: LabView zur automatisierten Durchführung der Mikrofonmessung [Hus12].

In dem oberen Teil des Programmes können die Parameter für die Messung vorgegeben werden. Im unteren Bereich wird während der Messung, je nach gewähltem Messungstyp das aufgenommene Intensitätsspektrum in dem entsprechenden Fenster dargestellt.

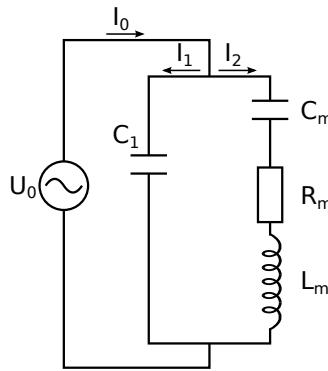


Abbildung 4.28.: Schematische Darstellung zum Van-Dyke-Ersatzschaltbild entnommen aus [Hus12] nach [Mor07].

Dieser Anteil entspricht der im Ersatzschaltbild (vgl. Abbildung 4.5) am Widerstand R_m umgesetzten Leistung, welche durch die folgende Gleichung gegeben ist:

$$P = R_m \cdot \text{Re}(I_2)^2. \quad (4.5.1)$$

Über die Knotenregel ergibt sich das folgende Verhältnis zwischen den Strömen I_0 , I_1 und I_2 der in Abbildung 4.28 dargestellten Schaltung:

$$I_2 = I_0 - I_1. \quad (4.5.2)$$

Der Strom I_0 lässt sich mit Hilfe der Spannung U_{ges} , die über die gesamte Schaltung abfällt, und dem Gesamtscheinwiderstand des Ersatzschaltbildes Z_{ges} berechnen:

$$I_0 = \frac{U_{ges}}{Z_{ges}}. \quad (4.5.3)$$

Dabei kann Z_{ges} über die Scheinwiderstände Z_1 und Z_2 des elektrischen und des mechanischen Zweiges der Schaltung dargestellt werden:

$$Z_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}}. \quad (4.5.4)$$

Über die Maschenregel ergibt sich der folgende Zusammenhang zwischen I_0 und I_2 :

$$I_1 = I_2 \frac{Z_2}{Z_1}. \quad (4.5.5)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 4.5.5 und 4.5.3 in Gleichung 4.5.2 unter Berücksichtigung von Gleichung 4.5.4 ergibt sich:

$$I_2 = U_{ges} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) - I_2 \frac{Z_2}{Z_1}. \quad (4.5.6)$$

Diese Gleichung lässt sich nach I_2 auflösen:

$$I_2 = U_{ges} \cdot \frac{1}{Z_2}. \quad (4.5.7)$$

Dabei ist Z_2 gegeben durch (vgl. Abschnitt 4.3.1)

$$Z_2 = i\omega \cdot L_m + \frac{1}{i\omega \cdot C_m} + R_m. \quad ((4.3.12))$$

Zur Berechnung der Wirkleistung wird der Realteil von I_2 benötigt, für den sich nach Einsetzen von Z_2 die folgende Gleichung ergibt:

$$\operatorname{Re}(I_2) = U_{ges} \cdot \frac{R_m}{R_m^2 + \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)^2}. \quad (4.5.8)$$

Durch Einsetzen von $\operatorname{Re}(I_2)$ in Gleichung 4.5.1 lässt sich schließlich die Wirkleistung des Piezoaktors berechnen:

$$P(\omega) = U_{ges}^2 \cdot \frac{R_m^3}{\left(R_m^2 + \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)^2\right)^2}. \quad (4.5.9)$$

Die Werte für den ohmschen Widerstand R_m , die Induktivität L_m und die Kapazität C_m können für die einzelnen Resonanzen wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben als Fit-Parameter bestimmt werden. Das Wirkleistungsspektrum eines Halters ergibt sich schließlich als Summe der Wirkleistungsspektren aller auftretenden Resonanzen. Dabei wird die in Abschnitt 4.3.3 bei allen Haltern beobachtete Resonanz oberhalb von 100 kHz in den nachfolgenden Wirkleistungsspektren, die zum Vergleich mit den Mikrofonmessungen verwendet werden, nicht dargestellt. Dafür gibt es zwei Gründe: Zum einen liegt diese Resonanz nicht mehr in dem am WASA-Pelletttarget verwendeten Frequenzbereich. Zum anderen wären in einer gemeinsamen Darstellung die Wirkleistungen im Bereich der kleineren Resonanzen unterhalb von 100 kHz gegenüber dieser ausgeprägten Resonanz nicht mehr deutlich zu erkennen.

4.6. Aufnahme der Intensitätsspektren

Es werden die Schallintensitätsspektren der sechs Halter 4, 7, 13, 14, 15, 16 aufgenommen. Bei jedem Halter werden die Spektren mit den folgenden vier Mikrofonstellungen aufgenommen:

- **Kontaktmessung an der Überwurfmutter:** Das Mikrofon befindet sich im direkten Kontakt mit der Überwurfmutter an der Düsen spitze. Mit dieser Einstellung sollen die auf die Glasdüse übertragenen Schwingungen gemessen werden.

- **Kontaktmessung unten am Piezoaktor:** Das Mikrofon befindet sich in direktem Kontakt mit dem unteren Teil des Piezoaktors, also dem Teil der sich in keinem direkten Kontakt mit dem Düsenhalter befindet. Mit dieser Einstellungen sollen die Schwingungen gemessen werden, die sich im freischwingenden Teil des Piezoaktors ausbilden können.
- **Kontaktmessung oben am Piezoaktor:** Das Mikrofon befindet sich in direktem Kontakt mit dem oberen Teil des Piezoaktors, also auf der Höhe in der sich der Piezoaktor und der Kupferhalter berühren. Mit dieser Einstellung sollen die Schwingungen gemessen werden, die von dem Piezoaktor auf den Kupferhalter übertragen werden.
- **Abstandsmessung:** Das Mikrofon befindet sich in einem gewissen Abstand (c.a. 3 cm) von dem Piezoaktor und ist ungefähr auf der Höhe dessen unterer Kante. Diese Einstellung soll es ermöglichen, die Überlagerung der Schwingungen von Pizoaktor und Düse aufzunehmen.

Der Verstärker ist in der Lage die Mikrofonsignale bis maximal etwa 3 V zu verstärken. Damit ist das aufgenommene Intensitätsspektrum nach oben hin beschränkt und alle gemessenen Signale, die über diesem Maximum liegen, werden bei 3 V begrenzt.

Für die Kontaktmessungen hat sich 3 V_{pp} als geeignete Spannungsamplitude für die am Piezoaktor angelegte Spannung herausgestellt. Bei höheren Spannungen werden die Spitzen einiger Peaks unterdrückt und bei einer geringeren Spannung sind die im Spektrum auftretenden Strukturen nicht mehr deutlich zu erkennen. Für die Abstandsmessung hat sich 20 V_{pp} als geeignete Spannung herausgestellt.

4.6.1. Vergleich zwischen Mikrofonmessung und Scheinwiderstandsmessung

In den Abbildung 4.29 und 4.30 sind, exemplarisch für die sechs Halter, das aus der Scheinwiderstandsmessung mit Gleichung 4.5.9 berechnete Wirkleistungsspektrum sowie die in den verschiedenen Mikrofonstellungen gemessenen Intensitätsspektren von Halter 14 dargestellt. Die Messergebnisse für die anderen Halter sind im Anhang enthalten.

Eine Ausnahme bildet, wie auch in der Scheinwiderstandsmessung, das Spektrum von Halter 7. Bei allen vier Mikrofoneinstellungen sind in den Spektren nur sehr geringe Intensitäten gemessen worden, was darauf hinweist, dass es während der Messungen kaum zu Schwingungen innerhalb des Düsenhaltersystems gekommen

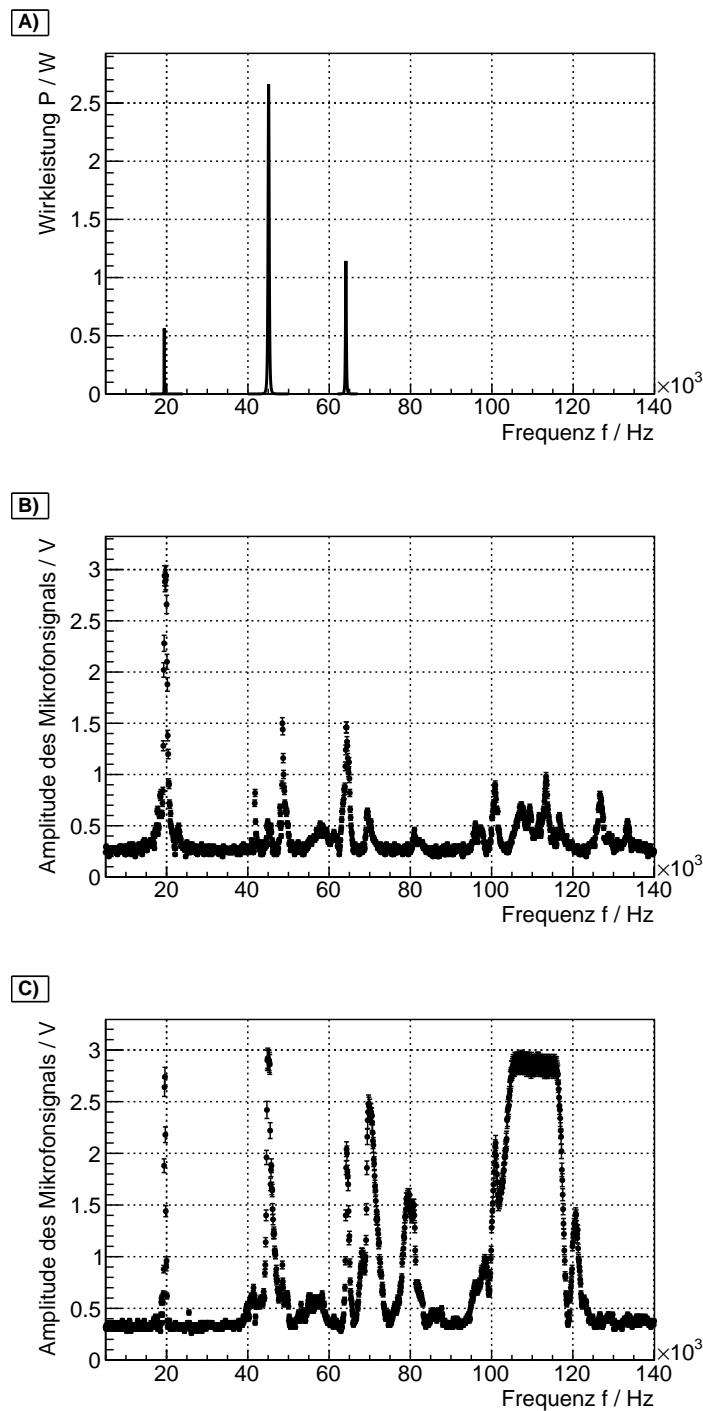


Abbildung 4.29.: A) Das anhand des Scheinwiderstandsspektrum berechnete Wirkleistungsspektrum. Das Frequenzspektrum des Düsenhalter 14 aufgenommen B) an der Überwurfmutter C) oben am Piezoaktor.

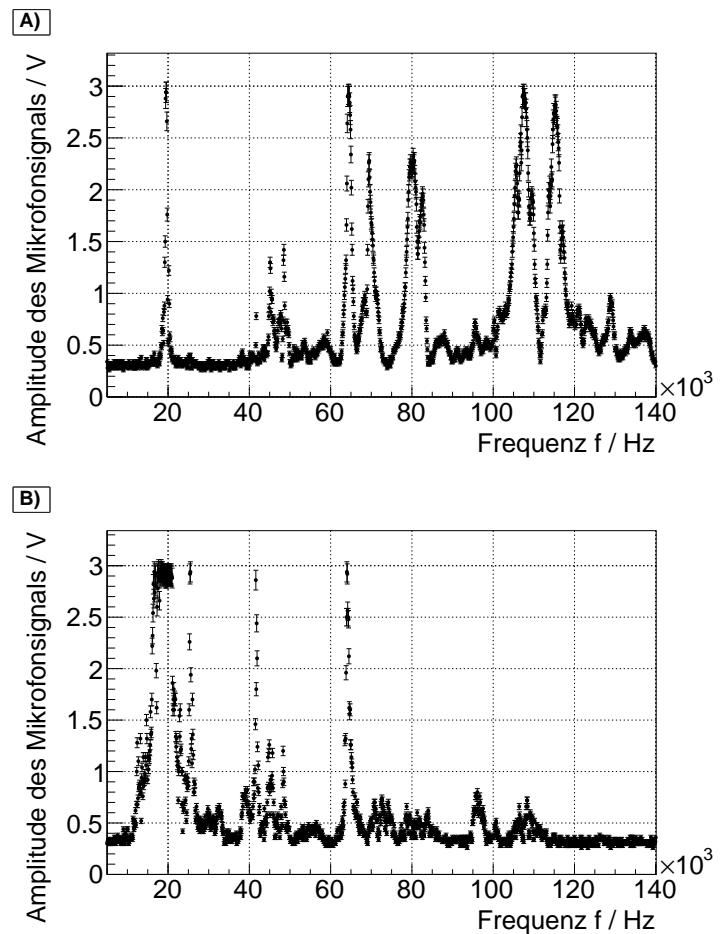


Abbildung 4.30.: Das Frequenzspektrum des Düsenhalter 14 aufgenommen A) unten am Piezoaktor B) auf Abstand.

ist. Exemplarisch für die Mikrofonmessung an Halter 7 ist in Abbildung 4.31 das oben am Piezoaktor gemessene Frequenzspektrum abgebildet.

Halter 07, Messung oben am Piezo(neu), 3V

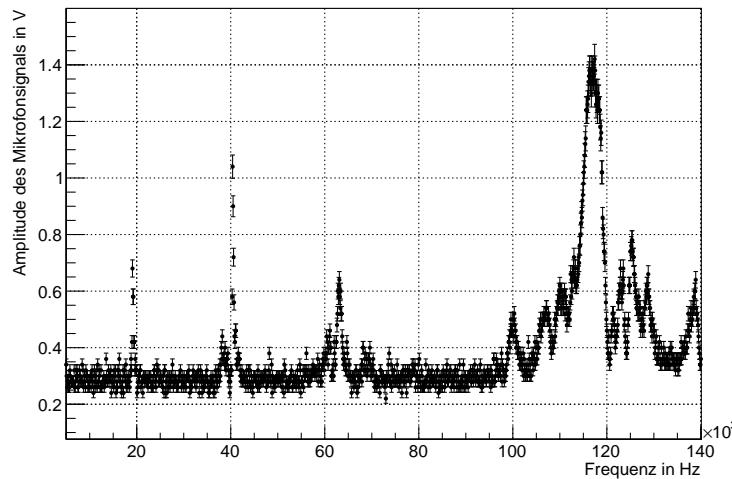


Abbildung 4.31.: Das oben am Piezoaktor gemessene Frequenzspektrum des Düsenhalters 7.

Unterhalb von 100 kHz sind ein paar kleinere Intensitätspeaks ungefähr bei den Frequenzen 19 kHz, 40 kHz und 60 kHz aufgetreten. Diese liegen mit geringfügigen Abweichungen im selben Bereich wie die in Abschnitt 4.3.3 beobachteten R-A-Paaransätze. Ein weiterer etwas größerer Intensitätspeak, umgeben von mehreren kleinen Peaks, ist bei 120 kHz aufgetreten. In dem Frequenzbereich oberhalb von 100 kHz, in dem bei der Scheinwiderstandsmessung ein ausgeprägtes R-A-Paar lag, sind auch im Spektrum der Mikrofonmessung mehrere kleine Peaks, sowie ein etwas ausgeprägterer Peak um 120 kHz zu erkennen. Wie oben bereits erwähnt, sind die in den Intensitätsspektren von Halter 7 auftretenden Peaks im Verhältnis zu den Intensitätspeaks der anderen Halter klein. Halter 7 wird in der nachfolgenden Auswertung der Messergebnisse, sofern nicht explizit erwähnt, nicht weiter berücksichtigt.

Für alle Halter (inklusive Halter 7) fällt auf, dass in den Intensitätsspektren ein Spannungsoffset von ungefähr 0,3 V auftritt. C. Husmann konnte zeigen, dass es sich bei dem Offset um elektrisches Rauschen des Verstärkers handelt [Hus12].

Im Nachfolgenden sollen die Intensitätsspektren der verschiedenen Halter in den unterschiedlichen Mikrofonstellungen miteinander verglichen werden. Ferner soll überprüft werden, ob die in der Mikrofonmessung auftretenden Peaks mit den in der Scheinwiderstandsmessung gemessenen Resonanzfrequenzen übereinstimmen. Dazu wurden in den Tabellen 4.5 und 4.6 für die einzelnen Halter die Frequenzen aufgelistet, bei denen Peaks im Wirkleistungs- oder Intensitätsspektrum auftreten. Für

die einzelnen Frequenzen ist angegeben, bei welchen der vier Mikrofoneinstellungen Peaks aufgetreten sind und ob bei dieser Frequenz ein Peak im Wirkleistungsspektrum zu beobachten ist. Dabei werden die Peaks ihrer Intensität entsprechend in drei Kategorien unterteilt, die wie folgt gekennzeichnet wird (Dabei gelten die ersten Werte für die Mikrofonmessung und die Werte in Klammern für das Wirkleistungsspektrum):

- „+“ steht für einen Peak der größer als 1 V (0,1 W) und kleiner als 1,5 V (1 W) ist
- „++“ steht für einen Peak der größer als 1,5 V (1 W) und kleiner als 2,5 V (2 W) ist
- „+++“ steht für einen Peaks der größer als 2,5 V (2 W) ist.

Zur besseren Übersicht wird in den Tabellen nur der Frequenzbereich von 5 kHz bis 100 kHz berücksichtigt. Der Bereich oberhalb von 100 kHz wird später in diesem Abschnitt noch einmal separat betrachtet.

Im Nachfolgenden Abschnitt sind mit Resonanzfrequenzen stets die anhand der Scheinwiderstandsmessungen berechneten Resonanzfrequenzen gemeint.

Anhand der Tabellen 4.5 und 4.6 ist zu sehen, dass in vielen fällen Peaks an den Resonanzfrequenzen der Halter auftreten. Dabei ist zu beobachten, dass bei den Haltern der Kategorie I im Frequenzbereich um 20 kHz bei allen Mikrofoneinstellungen ein vergleichsweise starker Intensitätspeak gemessen wird. Die für diese Resonanzfrequenz berechneten Wirkleistungen sind hingegen bei allen Haltern relativ gering. Es treten nicht bei jeder Mikrofonmessungen Peaks im Bereich der Resonanzfrequenzen auf. So ist bei Halter 13 zum Beispiel nur bei der Abstandsmessung ein Peak im Bereich der Resonanzfrequenz um 31 kHz zu sehen.

Am häufigsten treten bei der Kontaktmessung oben am Piezoaktor Peaks im Bereich der Resonanzfrequenzen auf. Die geringsten Übereinstimmung der Resonanzfrequenzen mit der Mikrofonmessung sind bei der Kontaktmessung an der Überwurfmutter zu beobachten.

Für alle Halter sind in den Mikrofonmessungen, neben den Resonanzfrequenzen, noch weitere Intensitätspeaks zu beobachten. Im Spektrum von Halter 15 ist zum Beispiel bei allen vier Mikrofonmessungen ein Intensitätspeak um 62 kHz zu sehen. Dies tritt während der Kontaktmessung oben am Piezoaktor am deutlichsten hervor. Die meisten dieser zusätzlichen Intensitätspeaks sind bei der Kontaktmessung unten

Halter	Frequenz f / kHz	Wirkl. $P(\omega)$	Überwurf- mutter	Oben am Piezoaktor	Unten am Piezoaktor	Auf Abstand
4	19	+	++	++	++	+++
	39					+++
	44	+		++	++	
	58		++	++	+	+
	66	+		+		
	72				++	+
	79				+	
	96				+	
14	19	+	+++	+++	+++	+++
	26					+++
	45	+++		+++	+	+++
	49		++		+	+
	64	++	++	++	+++	+++
	70			+++	++	
	79			++	++	
15	19	+	+++	+++	+++	+++
	26					+++
	44	++		++		++
	48	+	+	+		+
	62		++	+++	+	+
	69			+++	++	
	79			+	+	
	97			+	+	

Tabelle 4.5.: In der Tabelle sind jeweils für Halter 15, 14 und 4 der Kategorie I die Frequenzen aufgelistet, bei denen Peaks im Wirkleistungsspektrum oder in mindestens einem der Intensitätsspektren aufgetreten sind. Zu jeder Frequenz ist angegeben, in welcher der unterschiedlichen Messungen ein Peak sichtbar war. Die in den Scheinwiderstandsspektren aufgetretenen Resonanzfrequenzen sind grau unterlegt.

Halter	Frequenz	Wirkl. $P(\omega)$	Überwurf- mutter	Oben am Piezoaktor	Unten am Piezoaktor	Auf Abstand
13	20		++			
	25					+++
	31	++				+++
	52	+++		+++	+++	+
	58				+	
	70				+	
	80		+		+	
	98				++	+
16	16	+	+++	+++	+++	+++
	36	++	+	++		+++
	54	+++	+	++	+++	+++
	79		+		++	
	83					+
	95					+

Tabelle 4.6.: In der Tabelle sind jeweils für Halter 16 und 13 der Kategorie II die Frequenzen aufgelistet, bei denen Peaks im Wirkleistungsspektrum oder in mindestens einem der Intensitätsspektren aufgetreten sind. Zu jeder Frequenz ist angegeben, in welcher der unterschiedlichen Messungen ein Peak sichtbar war. Die in den Scheinwiderstandsspektren aufgetretenen Resonanzfrequenzen sind grau unterlegt.

am Piezoaktor zu sehen. Des Weiteren fällt auf, dass während der Messung unten am Piezoaktor bei allen Haltern ein kleiner Intensitätpeak um 80 kHz erscheint. Dies ist teilweise auch für die Kontaktmessungen oben am Piezoaktor und an der Überwurfmutter der Fall.

Zu Halter 4 ist anzumerken, dass sowohl die im Wirkleistungsspektrum berechneten Resonanzpeaks, als auch die Intensitätspeaks bei den Mikrofonmessungen zum Großteil kleiner sind als bei den anderen Haltern.

Durch einen Vergleich der Halter der Kategorie I und II miteinander ist zu erkennen, dass bei den Haltern der Kategorie I häufiger starke Schwingungsamplituden jenseits der Resonanzfrequenz auftreten als bei den Haltern der Kategorie II.

Oberhalb von 100 kHz sind bei den Kontaktmessungen am Piezoaktor mehrere Peaks mit hohen Intensitäten zu beobachten. Bei der Kontaktmessung an der Spitze sind die Peaks relativ schwach, während sie bei der Abstandsmessung gar nicht auftreten.

4.6.2. Folgerungen aus dem Vergleich zwischen Mikrofon- und Scheinwiderstandsmessungen

Wie oben beschrieben, fällt bei vielen Messungen auf, dass die im Bereich von 20 kHz auftretenden Peaks sehr ausgeprägt sind, obwohl die berechneten Wirkleistungen für diese Frequenzen nur sehr gering sind. Dabei wäre eigentlich zu erwarten, dass die in diesem Bereich auftretenden Signale durch den Hochpassfilter unterdrückt werden. Der Grund dafür liegt vermutlich in dem verwendeten Mikrofon. Dieses ist ursprünglich für die Verwendung im akustischen Bereich, also unterhalb von 20 kHz, konzipiert worden. Die Kennlinie solcher Mikrofone fällt meist bei hohen Frequenzen ab. Daher werden die Schwingungsamplituden in höheren Frequenzbereichen schwächer wiedergegeben, als in tiefen.

Anhand der Messergebnisse der Mikrofonmessungen ist zu erkennen, dass die in den Scheinwiderstandsspektren auftretenden Resonanzen auch in den Mikrofonmessungen wiedergegeben werden. Darüber hinaus tritt eine Großzahl weiterer Frequenzen auf, bei denen das System zu intensiven Schwingungen angeregt wird.

Bei allen Haltern, abgesehen von Halter 7, ist bei der Messung unten am Piezoaktor ein Intensitätspeak um 80 kHz zu beobachten, obwohl im Scheinwiderstandsspektrum bei dieser Frequenz keine Resonanz auftritt. Dies ist von besonderem Interesse, da sich diese Beobachtung sehr gut mit dem in Abschnitt 4.3.5 beschriebenen Phänomen deckt, dass beim Herunterkühlen des Piezoaktors am Pelletttarget eine zusätzliche Frequenz um 80 kHz auftritt. Ferner konnte beobachtet werden, dass

die einzelnen Komponenten des Düsenhaltersystems bei gleichen Frequenzen unterschiedlich stark schwingen können. Dass dabei ein Großteil der Aktivitäten bei den Piezoaktoren registriert werden, ist damit zu erklären, dass hier die mechanischen Schwingungen angeregt werden.

Die Beobachtung von nur sehr schwachen Intensitätspeaks in den Intensitätsspektren von Halter 7 ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Scheinwiderstandsmessungen und erklärt, warum beim Betrieb im Pelletttarget keine Arbeitsfrequenz mit diesem Halter gefunden werden konnte. Grund dafür könnte ein über die Zeit auftretender teilweiser Verlust der piezoelektrischen Eigenschaften des Piezoaktors sein, da Halter 7 bereits über 200 Betriebstage im WASA-Pelletttarget im Einsatz war.

Dies könnte auch auf Halter 4 zutreffen, der bereits über eine Zeit von 84 Tagen im Pelletttarget im Einsatz war. So deckt sich bei Halter 4 das relativ schwache Wirkleistungsspektrum mit den geringen Intensitäten bei der Mikrofonmessung.

5. Durchflussmessungen am Düsenteststand

Es hat sich herausgestellt, dass Blockierungen von Düsen, die neu in das WASA-Pelletttarget eingebaut wurden, häufig in den ersten Betriebstagen (innerhalb der ersten sieben Tage) auftreten. Die Düsen, die sich in diesem Anfangszeitraum nicht zugesetzt haben, waren anschließend meist über 40 Tage im Einsatz ohne zu blockieren [Hus12]. Dieses Phänomen liefert einen Anhaltspunkt, um Düsen, die dazu neigen frühzeitig zu blockieren, bereits vor ihrem Einsatz im Pelletttarget zu identifizieren und auszusortieren.

So können mit Hilfe eines Belastungstests neue Düsen auf ihre Funktionalität überprüft werden. Um gleichzeitig mögliche Ursachen für das Blockieren der Düse einzengrenzen zu können, wurde von Prof. Dr. A. Khoukaz ein vier Stufen Plan für einen solchen Belastungstest entwickelt. In diesem werden schrittweise die Bedingungen, welchen die Düse am WASA-Pelletttarget ausgesetzt ist, nachgestellt [Hus12].

1. Stufe: Durchflusstest (N_2)

Die erste Stufe besteht aus einem Teststand, in dem die Düse mit der Spitze nach unten in eine Vakuumkammer eingebaut wird. Anschließend wird Stickstoff bei Raumtemperatur mit einem Druck von 1 bar durch die Düse gepresst. Dabei wird aus Sicherheitsgründen Stickstoff verwendet, welches im Gegensatz zu dem im Pelletttarget eingesetzten Wasserstoff nicht brennbar ist. In einer Langzeitmessung von ungefähr einer Woche soll schließlich überprüft werden, ob bereits der Einfluss eines Gasstroms dafür sorgt, dass die Düse blockiert.

2. Stufe: Durchflusstest (N_2) mit Piezobetrieb

In der zweiten Stufe wird zu dem in Stufe 1 beschriebenen Aufbau der am Düsenhalter befestigte Piezoaktor eingeschaltet. Dabei wird der Piezoaktor mit einer für den Pelletttargetbetrieb üblichen Frequenz und Amplitude betrieben. Auf diese Weise soll überprüft werden, ob die mechanischen Belastungen der Piezoaktorschwingung dafür verantwortlich sind, dass sich die Düse zusetzt. Die Messung läuft wie in der

ersten Stufe über etwa eine Woche.

3. Stufe: Durchflusstest (N_2 oder H_2)

Um zu untersuchen, ob der Einfluss von Temperaturunterschieden zum Blockieren der Düse führt, wird in der dritten Stufe das verwendete Gas mit Hilfe eines Kaltkopfes heruntergekühlt. Allerdings wird es auf Temperaturen gekühlt, bei denen es nach wie vor gasförmig ist. Es können dabei Messungen mit und ohne Piezobetrieb durchgeführt werden. Neben den Temperatureinflüssen könnten hierbei auch die Vibrationen des Kaltkopfes Auslöser für das Zusetzen der Glasdüse sein.

4. Stufe: Dropleterzeugung (N_2 oder H_2)

In der vierten und letzten Stufe wird der Stickstoff bzw. Wasserstoff auf Temperaturen abgekühlt, bei denen es flüssig wird. Bei der Verwendung von Helium als Hintergrundgas können so die gleichen Bedingungen wie am Pelletttarget hergestellt werden und Droplets erzeugt werden. Da in dieser Stufe die Umgebungsbedingungen für die Düse die gleichen sind wie am WASA-Pelletttarget, sollten spätestens hier eventuelle Blockierungen auftreten. Dies würde darauf hinweisen, dass der Flüssigkeitsstrom für das Zusetzen der Düse verantwortlich ist.

Zur Umsetzung der ersten beiden Stufen wurde von C. Husmann eine Düsenteststation entwickelt und in Betrieb genommen, deren Aufbau in dem nachfolgenden Abschnitt beschrieben wird.

5.1. Aufbau des Düsenteststandes

Eine schematische Darstellung der zur Qualitätsüberprüfung von Düsen verwendeten Düsenteststation ist in Abbildung 5.1 gegeben [Hus12].

Der zentrale Bestandteil der Teststation ist eine Vakuumkammer, in der das an einem Flansch befestigte Düsenhaltersystem mit der Düsen spitze nach unten zeigend eingesetzt wird. Mit Hilfe einer Drehschieberpumpe wird zunächst ein Vorvakuum mit einem Druck von etwa 1×10^{-2} mbar erzeugt, welches anschließend durch den Einsatz einer Turbomolekularpumpe auf einen Druck von ungefähr 1×10^{-4} mbar gesenkt wird. Die Stickstoffversorgung wird von einer Gasflasche gewährleistet, die über einen Druckminderer mit der Gaszuleitung zur Glasdüse verbunden ist. Während des Belastungstests wird über die Leitung Stickstoff mit einem Druck von etwa 1000 mbar durch die Glasdüse gepresst. Um beurteilen zu können, ob die Düse sich zugesetzt hat, werden gleichzeitig der Durchfluss q_{pV} , der Düsendruck p_D und der

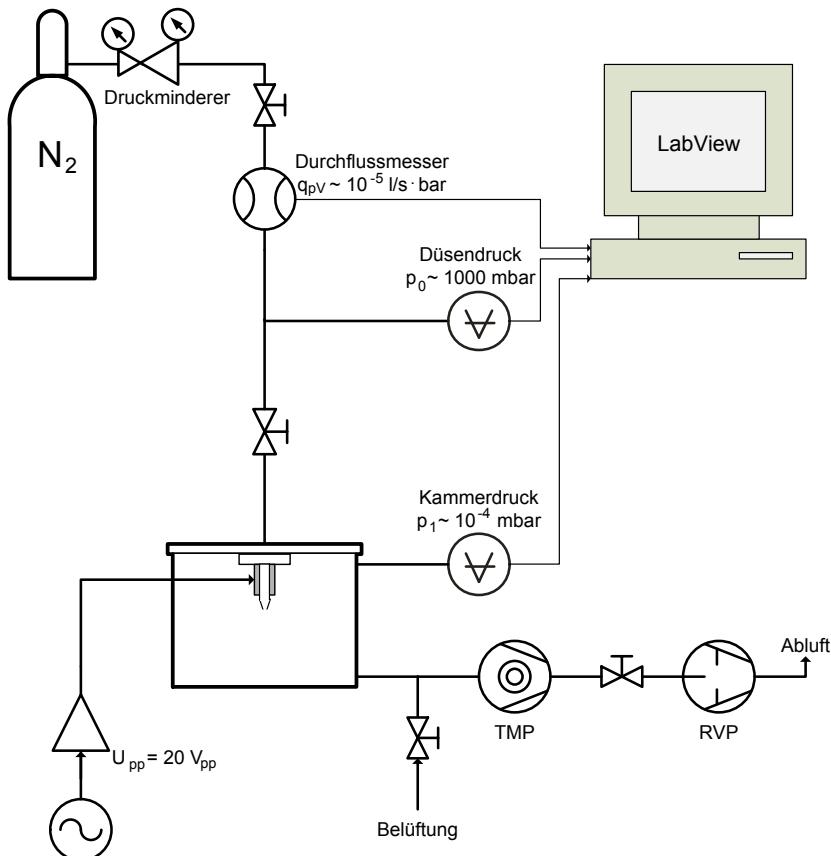


Abbildung 5.1.: Aufbauskizze der von C. Husmann entwickelten Düsenteststation [Hus12]. Der Piezoaktor wird während der zweiten Stufe des Belastungstests im Frequenzbereich einer Resonanzfrequenz betrieben, die zuvor mit Hilfe der Scheinwiderstandsmessung bestimmt wird.

Kammerdruck p_K gemessen.

Dabei wird der Durchfluss mit Hilfe eines thermischen Durchflusszählers von Brooks Instruments gemessen. Da dieser für die Verwendung mit Wasserstoff kalibriert ist, muss der gemessene Wert beim Gebrauch mit Stickstoff um den Faktor 0,992 korrigiert werden. Als Messunsicherheiten werden vom Hersteller die folgenden Werte angegeben:

- Messungenauigkeit: 0,7% des Messwertes + 0,2% des maximalen Anzeigewertes
- Wiederholbarkeit: 0,25% des Messwertes.

Der Düsendruck wird über ein Baratron bestimmt, für das vom Hersteller eine Ungenauigkeit von 0,5% des Ablesewertes angegeben worden ist. Für das im Düsenteststand eingebaute Baratron wurde von C. Husmann zur Kalibrierung die folgende Korrekturfunktion aufgestellt:

$$p_D = (1,051 \pm 0,005) \times p_{Anzeige} - (20,0 \pm 1,0) \text{ mbar.} \quad (5.1.1)$$

Dabei steht p_D für den tatsächlich gemessenen Druck und $p_{Anzeige}$ für den vom Messgerät angegebenen Druck.

Zur Messung des Kammerdrucks wird ein Ionivac (ITR200) verwendet, dessen Unsicherheiten vom Hersteller wie folgt angegeben werden:

- Messungenauigkeit: 15% des Messwertes,
- Wiederholbarkeit: 5% des Messwertes.

Zusätzlich wird während der Messung mit einem PT100 der Temperaturverlauf aufgenommen.

5.1.1. Berechnung des Düsendurchmessers

Die Durchflussformel liefert den folgenden Zusammenhang zwischen Düsendruck p_D und Durchfluss q_{pV} [WAW82]:

$$q_{pV} = A_{min} \cdot p_D \left(\frac{1}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} \cdot \frac{R \cdot T}{M_{mol}}}. \quad (5.1.2)$$

Dabei steht $A_{min} = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$ für den minimalen Querschnitt des Strömungskanals der Düse, T für die Temperatur des Gases, $R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$ für die allgemeine Gaskonstante, κ für den Adiabatenkoeffizienten und M_{mol} für die molare Masse des verwendeten Gases. In der Düsenteststation wird Stickstoff bei Raumtemperatur ($T = 300 \text{ K}$) eingesetzt, welches eine Molare Masse von $M_{mol} = 0,028 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$ besitzt. Der Adiabatenkoeffizient für Stickstoff beträgt bei Raumtemperatur $\kappa = 1,404$.

Anhand von Gleichung 5.1.2 ist zu erkennen, dass der Durchfluss q_{pV} proportional zum Düsendruck p_D ist. Dies bedeutet, dass eventuelle Schwankungen des Drucks (z.B. durch Temperaturänderungen) sich direkt auf den Durchfluss auswirken.

Um eine Größe zur Beurteilung der Gasdurchlässigkeit der Düse zu erhalten, die im Idealfall konstant ist, lässt sich Gleichung 5.1.2 nach dem Durchmesser d_1 auflösen:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{q_{pV}}{p_D \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} \cdot \frac{R \cdot T}{M_{mol}}}}}. \quad (5.1.3)$$

Für den Düsendurchmesser werden eventuelle Schwankungen des Durchflusses durch die Relation zum Düsendruck kompensiert.

Alternativ zum Durchfluss kann auch der Kammerdruck zur Berechnung des Düsen-durchmessers verwendet werden

$$d_2 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S \cdot p_K}{p_0 \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} \cdot \frac{R \cdot T}{M_{mol}}}}}. \quad (5.1.4)$$

Dazu wird das Saugvermögen S der verwendeten Pumpe benötigt [WAW82]:

$$S = \frac{q_{pV}}{p_K}. \quad (5.1.5)$$

Dies wurde von C. Husmann für die an der Teststation eingesetzte Turbomolekularpumpe zu $S = (69 \pm 3) \frac{1}{\text{s}}$ bestimmt.

In den beiden Gleichungen 5.1.3 und 5.1.4 für den Düsendurchmesser wird die genaue Form der Düse nicht berücksichtigt. So können um Beispiel Strömungsverluste an den Innenwänden der Glasdüse auftreten. Dies kann dazu führen, dass die für den Düsendurchmesser berechneten Werte d_1 und d_2 geringer ausfallen, als der Wert der mit dem Lichtmikroskop bestimmt wurden.

5.1.2. Ansteuerung des Piezoaktors

Die Piezoansteuerung wird mit einem Frequenzgenerator durchgeführt, der über einem BNC-Stecker am Flansch mit dem Piezoaktor verbunden ist. Um die Lage von

Resonanzfrequenzen zu bestimmen, wird zu Beginn der Messung mit Piezoaktorbetrieb das Scheinwiderstandsspektrum des Halters im Bereich der am Pellettar get typischen Betriebsfrequenzen (30 kHz bis 80 kHz) aufgenommen. Anschließend wird, wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben, eine der auftretenden Resonanzfrequenzen bestimmt. In der Langzeitmessung wird der Piezoaktor dann auf dieser Resonanzfrequenz betrieben. Dies soll gewährleisten, dass die Glasdüse über die gesamte Messdauer der maximal möglichen mechanischen Schwingungsbelastung durch den Piezoaktor ausgesetzt ist. Da C. Husmann die Verschiebung der Resonanzfrequenzen aufgrund von betriebsbedingten Erwärmungen beobachtet hat, wird während der Langzeitmessung einmal pro Tag das Scheinwiderstandsspektrum des Halters aufgenommen, um die Position der Resonanzfrequenz zu überprüfen [Hus12]. Als Spannungsamplitude für die angelegte sinusförmige Wechselspannung wurden 20 V_{pp} gewählt, die bei Raumtemperatur eine ähnlich starke Schwingungsamplitude erzeugen wie eine Spannungsamplitude von $105 \text{ V}_{\text{pp}}$ bei einer Betriebstemperatur von etwa 14 K.

5.1.3. Die Datenaufnahme

Zur Aufnahme der Messdaten während der Langzeitmessungen wird ein LabView-Programm verwendet. Dieses liest alle drei Sekunden die an dem Durchflusszähler, dem Baratron und dem Ionivac gemessenen Werte für den Durchfluss q_{pV} und die beiden Drücke p_D und p_K aus, führt die in Abschnitt 5.1 angegebenen Korrekturen durch und speichert die korrigierten Werte ab. Dazu müssen die Messwerte des Durchflusszählers und des Baratron mit Hilfe eines Analog-Digital-Wandlers (ADC) digitalisiert werden, während die Messwerte des Ionivacs über eine serielle Schnittstelle am PC direkt ausgelesen werden können.

Durch die Digitalisierung tritt für den Düsendruck eine Unsicherheit von 24 mbar und für den Durchfluss eine Unsicherheit von $1,5 \times 10^{-3} \frac{\text{ml}}{\text{min}} \cdot \text{bar}$ auf. Des Weiteren konnte von C. Husmann an den Eingängen der Messkarte ein Spannungsräuschen beobachtet werden, das für den Düsendruck eine zusätzliche Unsicherheit von 50 mbar und für den Durchfluss eine zusätzliche Unsicherheit von 0,2% des Messwertes bewirkt. Zur Kontrolle während der Messung gibt das LabView-Programm auf der Benutzeroberfläche die derzeitigen Messwerte, sowie die zeitlichen Verläufe aller Messgrößen und der beiden über die Gleichungen 5.1.3 und 5.1.4 berechneten Düsendurchmesser aus.

Für die weitere Auswertung wird jeweils der Mittelwert von zehn aufeinander folgenden Messwerten gebildet, so dass sich ein Messwert für 30 Sekunden ergibt. Dies ermöglicht es, den Quantisierungseffekten der Digitalisierung entgegen zu wirken.

5.2. Langzeitmessungen am Düsenteststand

Im Rahmen dieser Arbeit werden die drei Düsen 225, 257 und 220 mit Hilfe der Düsenteststation einem im Idealfall zweiwöchigen Belastungstest unterzogen. Dabei ist mit Idealfall gemeint, dass die Düse während des Belastungstests nicht blockiert. Die hier getesteten Düsen waren zuvor noch nicht im WASA-Pelletttarget im Einsatz.

Zur Umsetzung der ersten Stufe wird die Glasdüse in der ersten Woche dem Einfluss des Gassstroms ausgesetzt. Blockiert sie in dieser Zeit nicht, so wird in der zweiten Woche mit Stufe zwei des Tests begonnen und der Piezoaktor wird eingeschaltet. Dabei wird der Piezoaktor, wie in Abschnitt 5.1.2 bereits erwähnt, auf einer Resonanzfrequenz betrieben, die täglich mit Hilfe einer Scheinwiderstandsmessung überprüft wird.

5.2.1. Langzeitmessung der Düse 225

Als erstes wurde die in dem Halter 3N eingesetzte Düse 225 getestet, deren Düsendurchmesser mit $13,06 \mu\text{m}$ angegeben ist. Während der zweiten Stufe des Belastungstests wird der Piezoaktor im Bereich der Resonanzfrequenz um 44 kHz betrieben. Zwischen den Kontrollmessungen mussten nur leichte Korrekturen der Betriebsfrequenz vorgenommen werden. Die über die Messdauer aufgenommenen Verläufe des Düsendrucks, des Durchflusses und des Kammerdrucks sind zusammen mit dem Verlauf der Temperatur in Abbildung 5.2 aufgetragen.

Dabei fällt eine große Ähnlichkeit der zeitlichen Verläufe des Düsendrucks, des Durchflusses und des Kammerdrucks auf. Der Grund für diese Ähnlichkeit ist, dass die drei Werte mit einander korreliert sind. Dies ist, unter der Annahme, dass der Düsendurchmesser einer nicht blockierenden Düse konstant ist, anhand der Gleichungen 5.1.5, 5.1.3 und 5.1.4 zu erkennen.

Beim Vergleich dieser drei Messgrößen mit der Temperatur zeigt sich, dass sich der Düsendruck, der Durchfluss und der Kammerdruck über weite Zeiten gegenläufig zur Temperatur verhalten. Ihre Werte sinken in den Bereichen, in denen die Temperatur steigt und umgekehrt. Dies gilt allerdings nicht immer. So bleiben die drei korrelierten Messgrößen zum Beispiel in der Zeit nach 260 Stunden weitestgehend

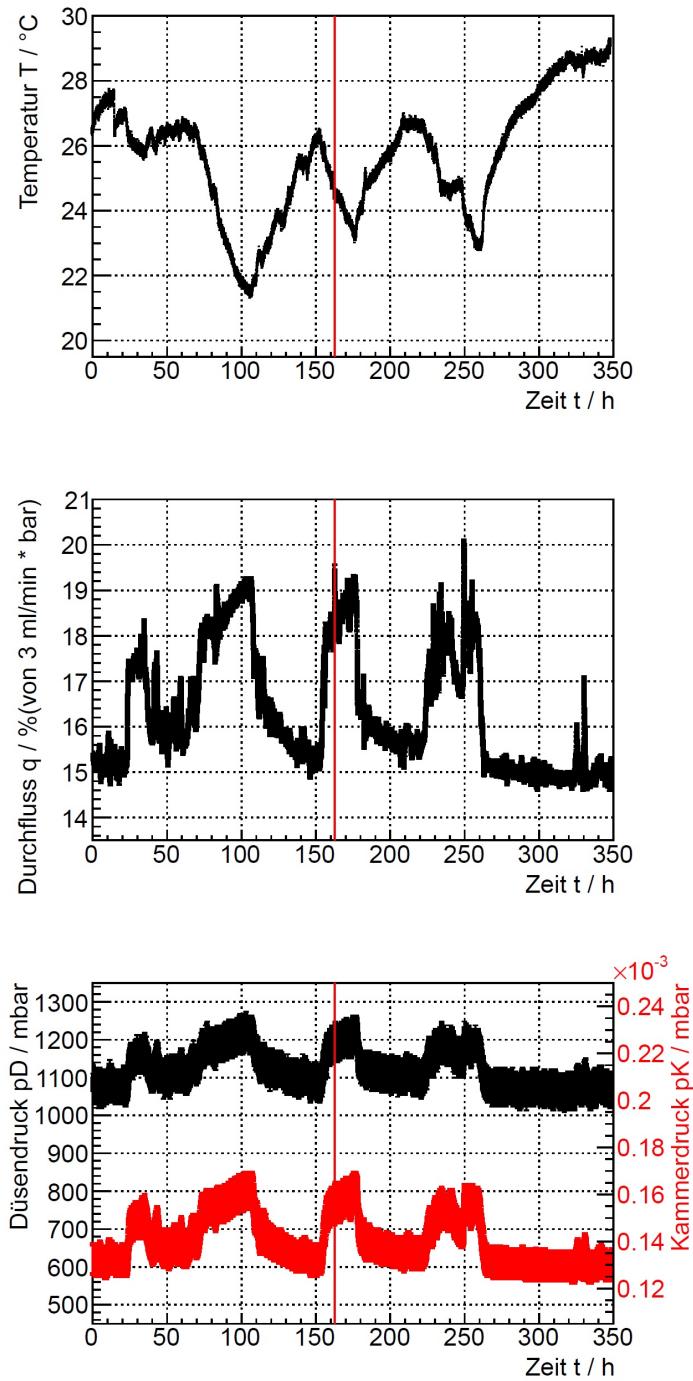


Abbildung 5.2.: Die über den Verlauf des Belastungstest der Düse 225 gemessenen Werte für die Temperatur T (oben), den Durchfluss q_{pV} (mitte), den Düsendruck d_D (unten, schwarz) und den Kammerdruck p_K (unten, rot). Die senkrechte rote Linie markiert den Zeitpunkt zu dem der Piezoaktor eingeschaltet und mit der zweiten Stufe des Belastungstests begonnen wurde.

konstant, während die Temperatur ansteigt.

Der zeitliche Verlauf der über die Gleichungen 5.1.3 und 5.1.4 berechneten Düsen-durchmesser d_1 und d_2 sind einander in Abbildung 5.3 gegenübergestellt.

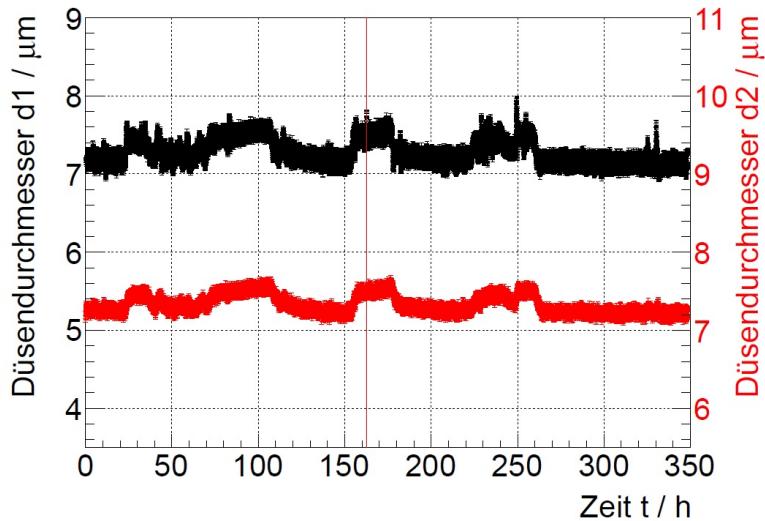


Abbildung 5.3.: Die während der Langzeitmessung der Düse 225 berechneten Düsen-durchmesser d_1 und d_2 : In schwarz der anhand des Durchflusses und des Düsendrucks berechnete Düsendurchmesser d_1 . In rot der über den Kammerdruck, das Saugvermögen und den Durchfluss berech-nete Düsendurchmesser d_2 . Die senkrechte rote Linie markiert den Zeitpunkt zu dem der Piezoaktor eingeschaltet und mit der zweiten Stufe des Belastungstests begonnen wurde.

Die zwei über unterschiedliche Gleichungen berechneten Verläufe für den Düsen-durchmesser liegen beide relativ konstant um etwa $7,3 \mu\text{m}$ und sind damit wie erwartet kleiner als der mit dem Mikroskop bestimmte Durchmesser von $13,06 \mu\text{m}$. Die relativen Schwankungen der Düsendurchmesser d_1 und d_2 sind im Vergleich zu den Schwankungen des Durchflusses wesentlich geringer. Daher werden im Nachfolgenden die Durchmesser zur Beurteilung, ob eine Düse blockiert ist, verwendet.

Während der gesamten Messzeit von 349 Stunden hat sich der Düsendurchmesser sowohl beim Betrieb ohne als auch mit Piezoaktor, abgesehen von leichten Schwan-kungen, nicht verändert. Die Düse ist folglich nicht blockiert und hat den Belas-tungstest bestanden.

5.2.2. Langzeitmessung der Düse 257

Als zweite Düse wird die Düse 257 dem Belastungstest unterzogen. Sie ist eingebaut in den Halter 5N und ihr Düsendurchmesser beträgt $12,74 \mu\text{m}$. Die zeitlichen Verläufe der berechneten Düsendurchmesser sind in Abbildung 5.4 zu sehen.

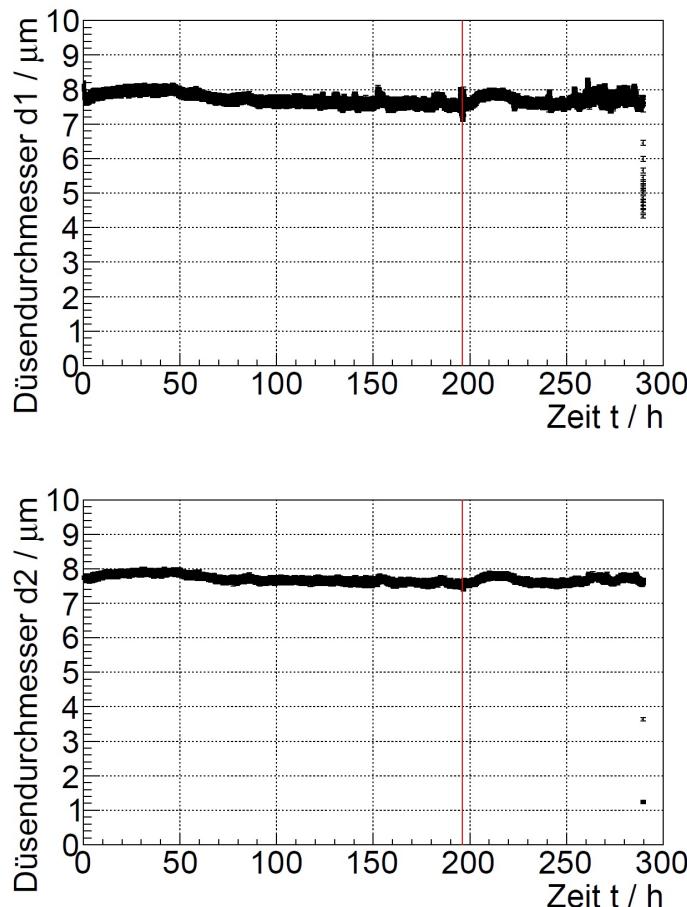


Abbildung 5.4.: Die während der Langzeitmessung der Düse 257 berechneten Düsendurchmesser d_1 und d_2 : In schwarz der anhand des Durchflusses und des Düsendrucks berechnete Düsendurchmesser d_1 . In rot der über den Kammerdruck, das Saugvermögen und den Durchfluss berechnete Düsendurchmesser d_2 . Die senkrechte rote Linie markiert den Zeitpunkt zu dem der Piezoaktor eingeschaltet und mit der Zweiten Stufe des Belastungstests begonnen wurde.

Während der ersten Stufe des Belastungstests, in der der Piezoaktor ausgeschaltet ist, bleiben die beiden berechneten Durchmesser, abgesehen von leichten Schwankungen, konstant bei einem Wert von $7,7 \mu\text{m}$. Nach etwa 196 Stunden wird dann mit

Stufe 2 des Belastungstests begonnen und der Piezoaktor wird hinzu geschaltet. Dabei liegt die Betriebsfrequenz durchgängig bei 43,85 kHz und muss während der Langzeitmessung nicht korrigiert werden. In den ersten 93 Stunden nach Einschalten des Piezoaktors bleiben die Durchmesser weiterhin im Bereich von $7,7 \mu\text{m}$. Nach einer Gesamtmeessdauer von etwa 289 Stunden fallen die Werte der berechneten Düsendurchmesser innerhalb kurzer Zeit ab. In Abbildung 5.5 sind von den Verläufen der Durchmesser d_1 und d_2 die zeitlichen Ausschnitte dargestellt, in denen der Abfall der Durchmesser zu beobachten ist.

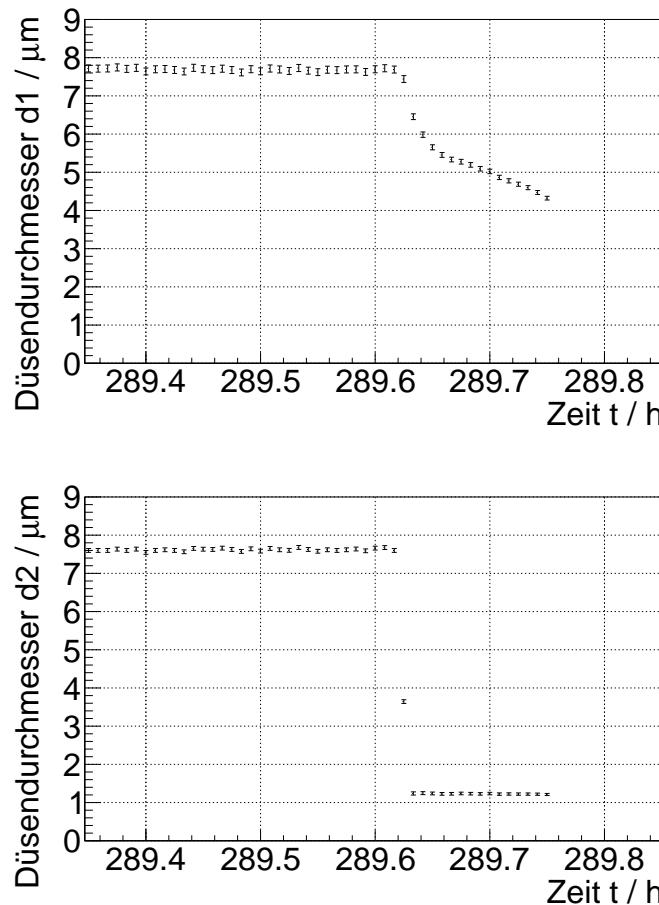


Abbildung 5.5.: Zeitlicher Ausschnitt der, während der Lanzeitmessung der Düse 257 berechneten, Düsendurchmesser d_1 (oben) und d_2 (unten), in denen eine Blockierung der Düse aufgetreten ist.

Während der Durchmesser d_2 innerhalb von etwa einer Minute auf $1,2 \mu\text{m}$ fällt und anschließend diesen Wert hält, sinkt der Wert von d_2 langsamer ab. Dennoch ist auch bei d_2 ein klarer Abwärtstrend zu beobachten.

Aufgrund eines technischen Ausfalls wird die Datenaufnahme nach 289,75 Stunden automatisch gestoppt, so dass der Verlauf des Durchmessers d_2 nicht mehr verfolgt werden kann, bis er sich bei einem konstanten Wert eingependelt hat.

Am Durchflusszähler kann allerdings beobachtet werden, dass der Durchfluss schließlich auf 0 % von $3 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \cdot \text{bar}$ absinkt. Die Düse ist folglich blockiert.

5.2.3. Langzeitmessung der Düse 220

Die dritte getestete Düse ist die in Halter 15 eingebaute Düse 220. Ihr Düsendurchmesser wurde per Mikroskop zu $12,61 \mu\text{m}$ bestimmt. In Abbildung 5.6 sind die zeitlichen Verläufe der Düsendurchmesser d_1 und d_2 dargestellt.

Zu Beginn der Langzeitmessung, bei abgeschaltetem Piezoaktor, steigen die Werte der berechneten Düsendurchmesser zunächst stetig von $6,5 \mu\text{m}$ auf $6,9 \mu\text{m}$. Nach ungefähr 160 Stunden Messzeit sinkt er dann innerhalb von etwa fünf Stunden wieder auf $6,5 \mu\text{m}$. Nach ungefähr 87 Stunden tritt im Verlauf des Düsendurchmessers d_1 ein Peak auf, der größer ist als die gewöhnlichen Schwankungen. Zu diesem Zeitpunkt wurden handwerkliche Maßnahmen in dem Raum durchgeführt, indem die Düsenteststation aufgebaut ist.

Mit Stufe zwei des Belastungstests wird nach etwa 170 Stunden begonnen. Der Piezoaktor wird während der Messung durchgängig mit einer Frequenz von $43,8 \text{ kHz}$ betrieben. Zu Beginn der Messung mit Piezoaktor ist im Verlauf beider Düsendurchmesser ein Knick zu beobachten. Anschließend bleiben die Durchmesser für etwa 26 weitere Stunden konstant bei $6,3 \mu\text{m}$, bevor sie schlagartig abfallen.

Für die Durchmesser d_1 und d_2 ist in Abbildung 5.7 der zeitliche Ausschnitt dargestellt, in dem die berechneten Durchmesser stark sinken.

Der Düsendurchmesser d_1 fällt zunächst über einen Zeitraum von etwa einer Stunde und 15 Minuten auf einen Wert von $2,9 \mu\text{m}$ bevor er anschließend wieder etwas ansteigt und sich schließlich bei einem Wert von etwa $3,1 \mu\text{m}$ eingependelt. Der anhand des Kammerdrucks bestimmte Düsendurchmesser d_2 fällt innerhalb einer Minute auf einen Wert von $3,8 \mu\text{m}$. Danach sinkt er wesentlich langsamer weiter bis er sich auf einen Wert von ungefähr $3,6 \mu\text{m}$ eingependelt.

Die Düse ist folglich teilweise blockiert und für den Pellettargetbetrieb nicht mehr einsatzfähig.

5.3. Folgerungen aus den Durchflussmessungen

Alle drei getesteten Düsen haben den Belastungstest in der ersten Stufe, also unter Gasfluss aber ohne Piezoaktorbetrieb, über einen Zeitraum von einer Woche bestan-

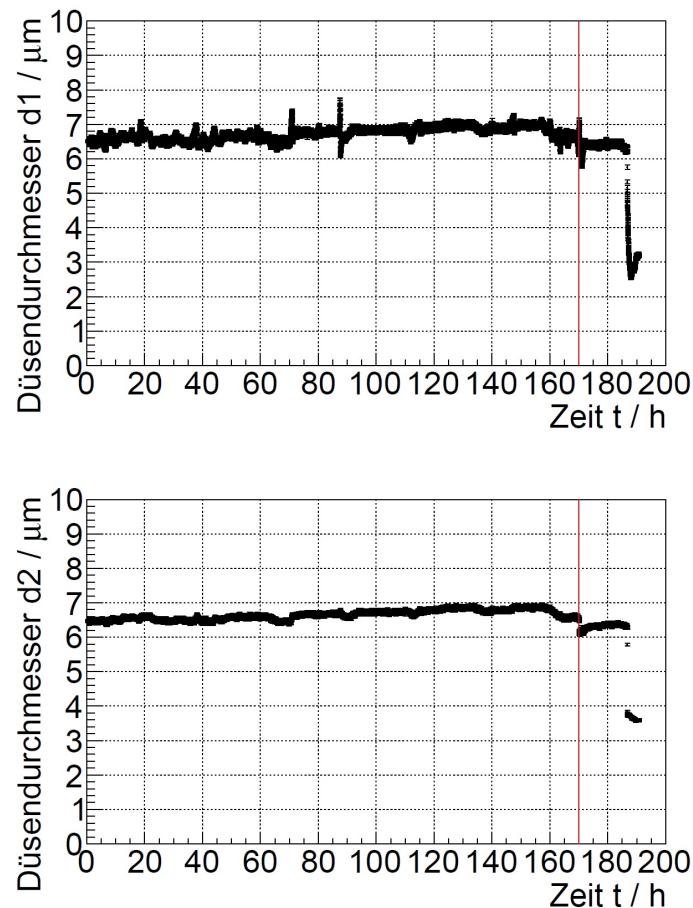


Abbildung 5.6.: Die während der Langzeitmessung der Düse 220 berechneten Düsen durchmesser d_1 und d_2 : In schwarz der anhand des Durchflusses und des Düsindrucks berechnete Düsendurchmesser d_1 . In rot der über den Kammerdruck, das Saugvermögen und den Durchfluss berechnete Düsendurchmesser d_2 . Die senkrechte rote Linie markiert den Zeitpunkt zu dem der Piezoaktor eingeschaltet und mit der Zweiten Stufe des Belastungstests begonnen wurde.

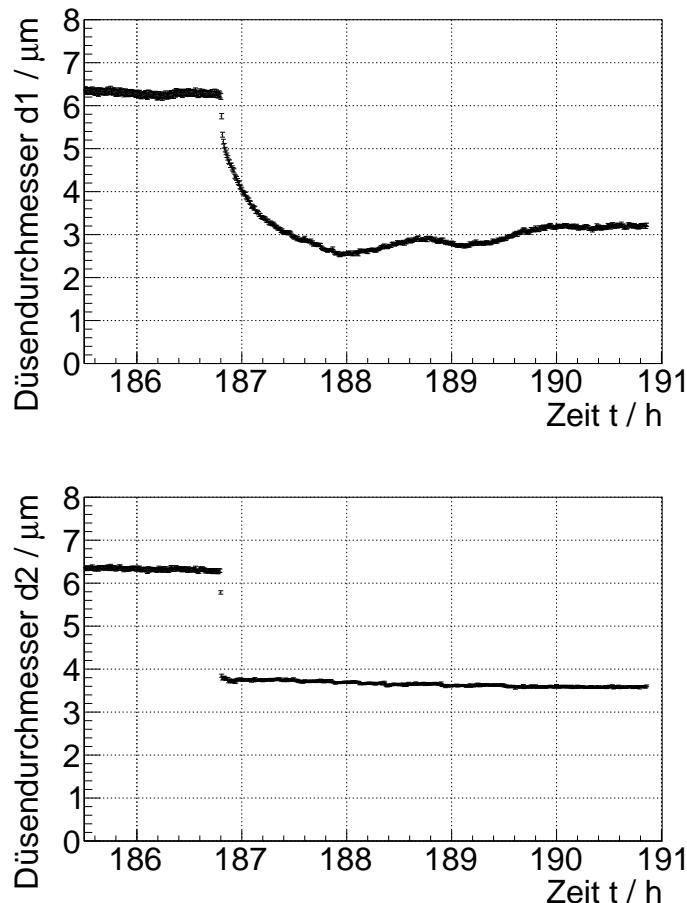


Abbildung 5.7.: Zeitlicher Ausschnitt der, während der Langzeitmessung der Düse 220 berechneten, Düsendurchmesser d_1 (oben) und d_2 (unten), in denen eine Blockierung der Düse aufgetreten ist.

den.

Die zweite Stufe Messung, also bei Gasfluss und Piezoaktorbetrieb, hat nur eine der drei Glasdüsen (225) über einen Zeitraum von einer Woche bestanden. Die Düse 257 blockierte etwa 93 Stunden nach Einschalten des Piezoaktors vollständig, während sich die Düse 220 26 Stunden nach Einschalten teilweise zusetzte.

Der Vorgang des Zusetzens kann anhand des zeitlichen Verlaufs der berechneten Düsendurchmesser d_1 und d_2 nachverfolgt werden. Dabei fällt auf, dass der Düsendurchmesser d_1 , der anhand des Kammerdrucks berechnet wird, innerhalb kurzer Zeit (etwa eine Minute) abfällt und so eine Blockade in der Düse anzeigt. Der Düsendurchmesser d_2 hingegen reagiert nur träge auf das Zusetzen der Düse, was sich durch einen langsamen Abfall des Durchmessers zeigt. Dies liegt daran, dass zur Berechnung des Düsendurchmessers d_1 der Durchfluss q_{PV} verwendet wird, der nur langsam auf Veränderungen in der Düse reagiert. Als Indikator für eine Blockade innerhalb der Düse ist dementsprechend Durchmesser d_2 besser geeignet, da dieser präzise und unmittelbar den Zeitpunkt des Zusetzens anzeigt.

Ausgehend vom zeitlichen Verlauf der Werte für d_2 kann von einem schlagartigen Blockieren ausgegangen werden. Wahrscheinlich ist, dass ein Bruchstück des Filters oder Ähnliches die Spitze auf einen Schlag blockiert hat. Dass sich über eine längere Zeit Verunreinigungen in der Spitze sammelten und sich so die Düse langsam zusetzte, kann als Ursache ausgeschlossen werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das am Forschungszentrum Jülich aufgebaute Experiment WASA-at-COSY wird zur Untersuchung der Produktions- und Zerfallsmechanismen von leichten Mesonen verwendet. Einen wesentlichen Bestandteil des WASA-Aufbaus stellt das Pelletttarget dar, welches für den Betrieb einen Strahl aus gefrorenen Wasserstoff- beziehungsweise Deuteriumtropfen (Pellets) zur Verfügung stellt. Bei der Erzeugung dieses Pelletstrahls spielt ein System bestehend aus Glasdüse, Düsenhalter und Piezoaktor die zentrale Rolle. Um einen reibunglosen Betrieb des Pelletttargets zu gewährleisten, ist das einwandfreie Funktionieren dieses Düsenhaltersystems unerlässlich. Zwei Ursachen, die zum Ausfall des Düsenhaltersystems führen können, sind zum Einen das Blockieren der Glasdüse, zum Anderen das Fehlen einer geeigneten Betriebsfrequenz. Um für den zukünftigen Betrieb die Zuverlässigkeit des Pelletttargets weiter zu optimieren, wird im Rahmen dieser Arbeit das Schwingungsverhalten des Düsenhaltersystems untersucht. Ein weiteres Augenmerk wird auf die Durchflussmessung mit Hilfe einer Düsenteststation gelegt. Damit schließt diese Arbeit an die vorangegangenen Untersuchungen von C. Husmann an.

6.1. Schlussfolgerungen für das Schwingungsverhalten des Düsenhaltersystems

Das Schwingungsverhalten verschiedener Düsenhaltersysteme wurde mittels der Verfahren der Scheinwiderstandsmessung und der Mikrofonmessung untersucht. In den gemessenen Scheinwiderstandsspektren zeigen sich Abweichungen von den aus der Theorie abgeleiteten Erwartungen für einen freischwingenden Piezoaktor. So treten in den Spektren zum Einen mehr Resonanzen auf als erwartet. Zum Anderen weichen diese teilweise stark von den berechneten Resonanzfrequenzen ab. Der Grund für diese Abweichungen von der Theorie liegt vermutlich in der mechanischen Kopplung

von Halter, Düse und Piezoaktor. Dadurch, dass die drei Komponenten ein gemeinsames System bilden, verändern sich Schwingungseigenschaften des Piezoaktors. Dies kann die Entstehung neuer Resonanzen bewirken und zu einer Verschiebung bereits vorhandener Resonanzen führen.

Die im Rahmen dieser Arbeit in Münster vermessenen Halter können anhand ihrer Scheinwiderstandsspektren in drei verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Kategorien ist dabei die Lage der Resonanzfrequenzen in den Spektren. Dabei werden der Kategorie I sechs Halter zugeordnet, zwei Halter gehören zur Kategorie II und ein Halter befindet sich in Kategorie III. Ein entscheidender Unterschied zwischen den Haltern der Kategorie I und II liegt darin, dass in den Haltern der Kategorie I Düsen eingebaut sind. Bei den Haltern der Kategorie II ist dies nicht der Fall. Die Düse stellt eine zusätzliche Komponente des Düsenhaltersystems dar, die dessen Schwingungseigenschaften beeinflusst. Naheliegend ist daher, dass die Unterschiede in den Scheinwiderstandsspektren auf den Einbau der Düsen zurückzuführen sind.

Für den Halter der Kategorie III wurde ein Scheinwiderstandsspektrum gemessen, das stark von den Spektren der Halter anderer Kategorien abweicht. Die Messergebnisse legen die Vermutung nahe, dass der Piezoaktor dieses Halters bereits einen Teil seiner piezoelektrischen Eigenschaften verloren hat. Diese Vermutung wird zum Einen durch die Ergebnisse der Mikrofonmessungen, zum Anderen durch das Fehlen einer Arbeitsfrequenz beim Betrieb im Pelletttarget gestützt.

Am WASA-Pelletttarget in Jülich wurden Scheinwiderstandsmessungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Anhand des bei Raumtemperatur aufgenommenen Scheinwiderstandsspektrum kann der eingebaute Halter keiner der drei Kategorien eindeutig zugeordnet werden. Ein Grund für das abweichende Spektrum könnte eine Veränderung der Schwingungseigenschaften des Halters durch seinen Einbau in das Target sein.

Beim Herunterkühlen der Temperatur war keine einheitliche Verschiebung der Resonanzfrequenzen zu beobachten. So verschoben sich einige Resonanzen zu höheren Frequenzen, während andere sich zu tieferen Frequenzen bewegten. Bei weiteren Resonanzen trat keine Verschiebung auf. Die in den Spektren auftretenden unterschiedlichen Resonanzfrequenzen werden durch unterschiedliche Schwingungsmoden hervorgerufen und lassen sich anhand der jeweiligen Frequenzkonstanten berechnen [Mor07]. Bei einer Veränderung der Temperatur ändern sich die verschiedenen Frequenzkonstanten in unterschiedlich großem Ausmaß. Dies bewirkt die große Variation bei den Verschiebungen der Resonanzfrequenzen.

Während einiger Scheinwiderstandsmessungen, bei denen es zur Dropletbildung kam,

wurde die Qualität der entstehenden Droplets beurteilt. Der Vergleich zwischen den Scheinwiderstandsspektren und der Dropletqualität zeigt, eine klare Übereinstimmung der Resonanzfrequenzen mit den Frequenzbereichen in denen Droplets entstehen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Scheinwiderstandsspektren gut zur qualitativen Beurteilung der Düsenhaltersysteme geeignet sind. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass ein Düsenhaltersystem, dessen Scheinwiderstandsspektrum viele und stark ausgeprägte Resonanzen aufweist, mit großer Wahrscheinlichkeit verlässlich im Pelletbetrieb eingesetzt werden kann.

Mittels der Mikrofonmessungen in unterschiedlichen Mikrofonstellungen wurden die Intensitätsspektren verschiedener Düsenhaltersysteme gemessen. Dabei traten auch bei Frequenzen, die von den Resonanzfrequenzen abweichen, Intensitätsmaxima auf. Besonders auffällig ist das häufige Auftreten eines Peaks im Bereich um 80 kHz. In diesem Frequenzbereich war bei den Messungen unterhalb der Raumtemperatur in Jülich ebenfalls eine Resonanz zu beobachten. Dies lässt die Vermutung zu, dass auch für die anderen Halter beim Herunterkühlen eine Resonanz um 80 kHz im Scheinwiderstandsspektrum auftritt.

Des Weiteren wurden unterschiedlich starke Schwingungen einzelner Komponenten des Düsenhaltersystems bei gleichen Frequenzen registriert. Hierbei konnte jedoch keine Regelmäßigkeit festgestellt werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Scheinwiderstandsmessung gut geeignet ist, um das Schwingungsverhalten eines Düsenhaltersystems zu beschreiben. So spiegeln sich Veränderungen am Düsenhalter system, wie das Einsetzen einer Glasdüse, im Scheinwiderstandsspektrum wider. Überdies konnte gezeigt werden, dass die im Scheinwiderstandsspektrum beobachteten Resonanzfrequenzen als Indikatoren dienen, die Hinweise darauf liefern, in welchen Frequenzbereichen geeignete Droplets entstehen. Folglich ist die Bewertung eines Düsenhaltersystems anhand seines Scheinwiderstandsspektrums sinnvoll und für weitere Untersuchungen empfehlenswert.

Weil eventuelle Ermüdungserscheinungen des Piezoaktors anhand der Scheinwiderstandsmessung bemerkt werden können, bietet sich eine regelmäßige Kontrolle des Scheinwiderstandsspektrums während des Targetbetriebs an. Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Messbox entwickelt, die eine unkomplizierte und schnelle Messung dieses Spektrums ermöglicht. Über dies hinaus lässt sich die Messbox für die Suche nach möglichen Betriebsfrequenzen nutzen.

Die beim Herabkühlen auftretenden Veränderungen des Schwingungsverhaltens des Düsenhaltersystems sind nicht trivial. Da das WASA-Pelletttarget bei Temperatu-

ren um 14 K betrieben wird, sollten sich weitere Untersuchungen der Messung des Scheinwiderstandsspektrums auch bei tiefen Temperaturen widmen. Den Ergebnissen dieser Arbeit zufolge, sollte ein Herunterkühlen des Düsenhaltersystems auf etwa 50 K bis 100 K genügen, um eine gute Einschätzung für das Schwingungsverhalten des Düsenhaltersystems bei Betriebstemperatur zu erhalten.

Als Ergänzung zur Scheinwiderstandsmessung kann bei Messungen im Labor die Mikrofonmessung herangezogen werden. Diese kann Hinweise auf Frequenzen geben, bei denen eine große Schwingungsamplitude auftritt, die jedoch im Scheinwiderstandsspektrum nicht sichtbar ist. Im Betrieb kann die Mikrofonmessung aufgrund des Unterdrucks in der Vakuumkammer nicht verwendet werden. Empfehlenswert für zukünftige Messungen ist dabei die Bestimmung der Kennlinie des Mikrofons. Diese erlaubt eine bessere Vergleichbarkeit der in unterschiedlichen Frequenzbereichen gemessenen Schwingungsamplituden.

6.2. Schlussfolgerungen für die Düsenteststation

Mit der von C. Husmann entwickelten Düsenteststation konnten im Rahmen dieser Arbeit drei für den Einsatz im WASA-Pelletttarget vorgesehene Düsen erfolgreich einer Belastungsprobe unterzogen werden. Die erste Stufe des Belastungstest, also unter Gasdurchfluss, haben alle drei Düsen unbeschadet überstanden. Im Verlauf der zweiten Stufe, bei welcher der Piezoaktor mit eingeschaltet wird, wurden zwei Düsen blockiert. Dabei hat sich eine Düse vollständig zugesetzt, während die andere nur teilweise blockiert wurde. Bei beiden Düsen verläuft der Vorgang des Zusetzens innerhalb einer Minute. Dies weist darauf hin, dass sich die Düsen nicht in einem kontinuierlichen Prozess zusetzen, sondern schlagartig durch das Versperren des Strömungskanals der Düse durch relativ große Fremdkörper.

Somit sind, unter Berücksichtigung der Messungen von C. Husmann, bisher sechs Düsen mit der Düsenteststation einem Belastungstest unterzogen worden [Hus12]. Dabei haben alle Düsen die erste Stufe der Langzeitmessung überstanden, während drei der sechs Düsen unter den mechanischen Schwingungsbelastungen in Stufe zwei des Belastungstests blockiert worden sind. Es hat sich folglich gezeigt, dass eine besonders hohe Wahrscheinlichkeit für das Blockieren der Düsen unter dem Betrieb mit Piezoaktor und Gasstrom besteht. Eine naheliegende Erklärung dafür könnte sein, dass die mechanischen Belastungen durch den Piezoaktor Bruchstücke des Sinterfilters lösen, die anschließend durch den Gasstrom in die Düsen spitze getragen werden und diese blockieren.

Aufgrund der Ergebnisse lässt sich annehmen, dass der Düsenteststand eine her-

vorragende Möglichkeit bietet Düsen vor ihrem Einbau in das WASA-Pelletttarget auf ihre Qualität zu überprüfen und auf diese Weise Düsen auszusortieren, die dazu neigen schnell zu blockieren.

A. Scheinwiderstandsmessungen

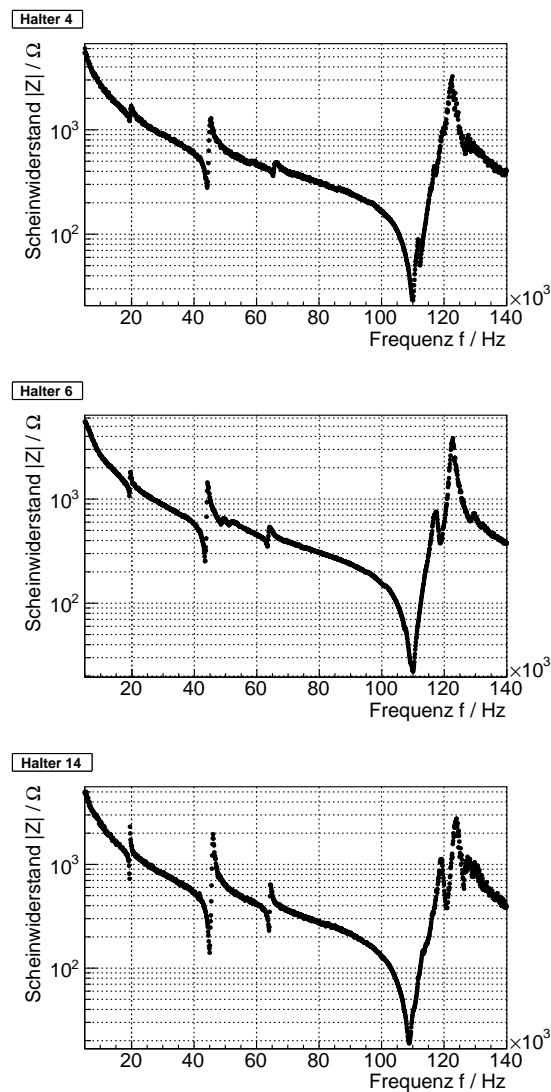


Abbildung A.1.: Scheinwiderstandspektren der Halter (von oben nach unten): 04, 06 und 14.

A. Scheinwiderstandsmessungen

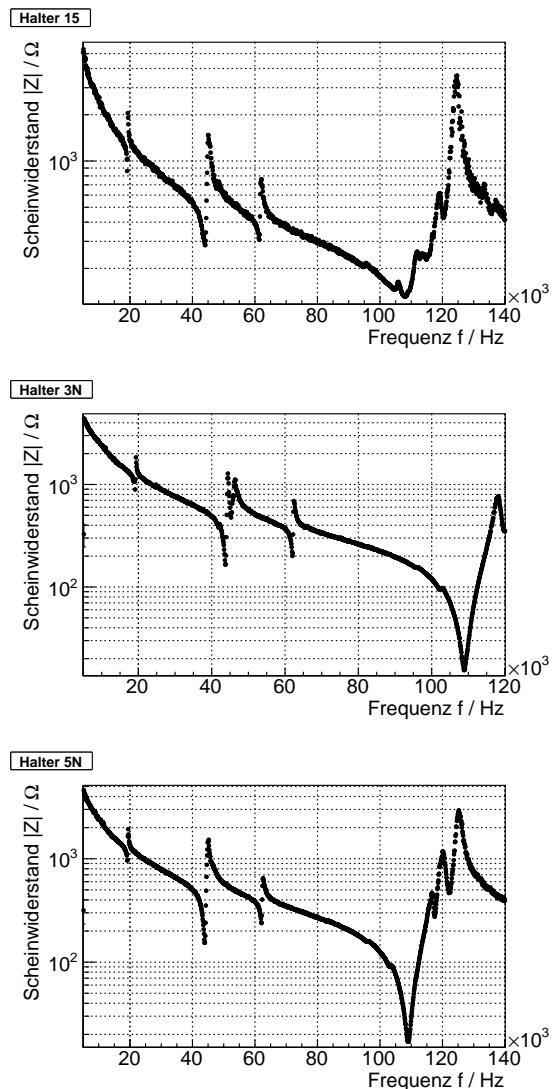


Abbildung A.2.: Scheinwiderstandspekturen der Halter (von oben nach unten): 15, 3N und 5N.

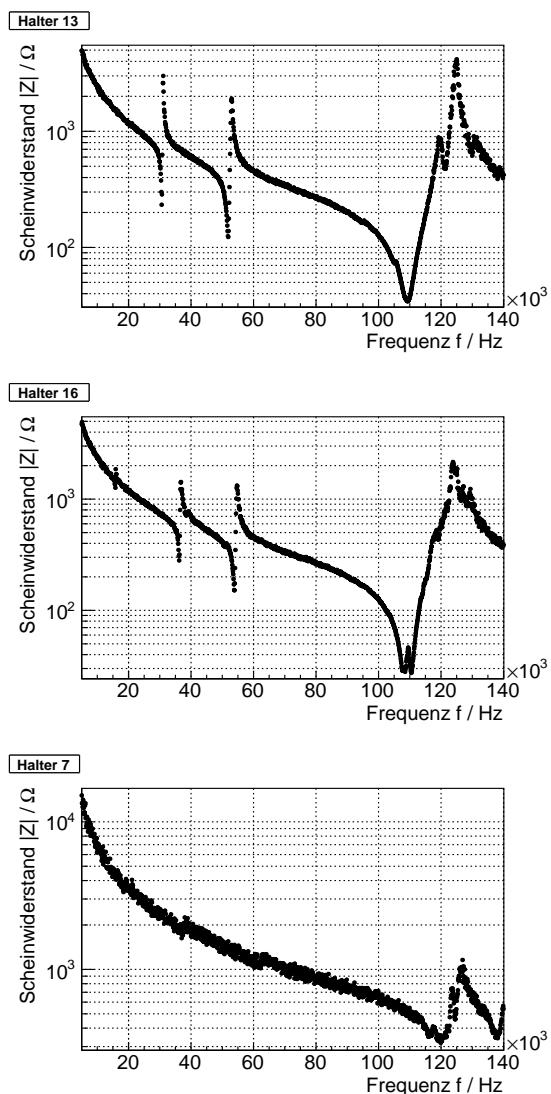


Abbildung A.3.: Scheinwiderstandsspektren der Halter (von oben nach unten): 13, 16 und 7.

B. Mikrofonmessungen

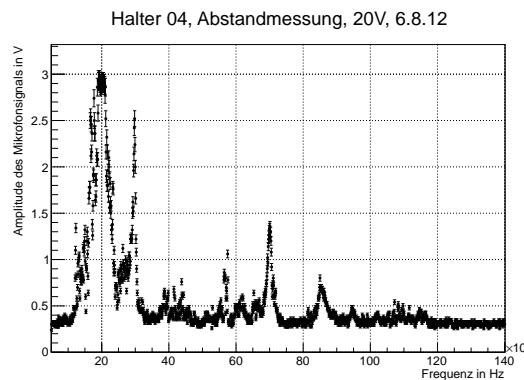


Abbildung B.1.: Frequenzspektrum des Halters 4 gemessen auf Abstand.

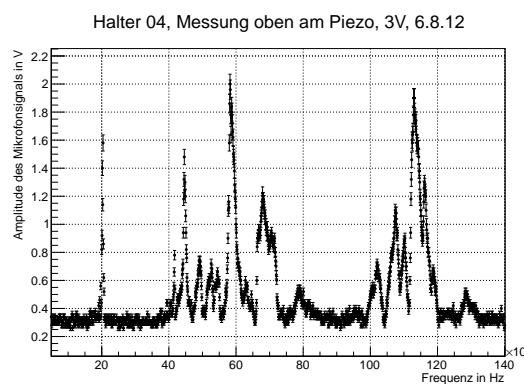


Abbildung B.2.: Frequenzspektrum des Halters 4 gemessen oben am Piezoaktor.

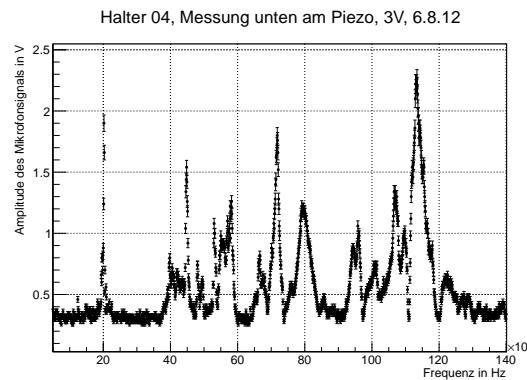


Abbildung B.3.: Frequenzspektrum des Halters 4 gemessen unten am Piezoaktor.

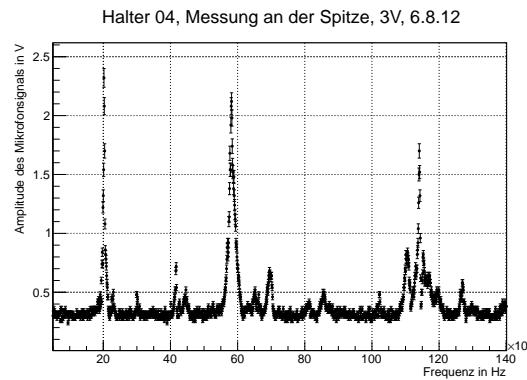


Abbildung B.4.: Frequenzspektrum des Halters 4 gemessen an der Überwurfmutter.

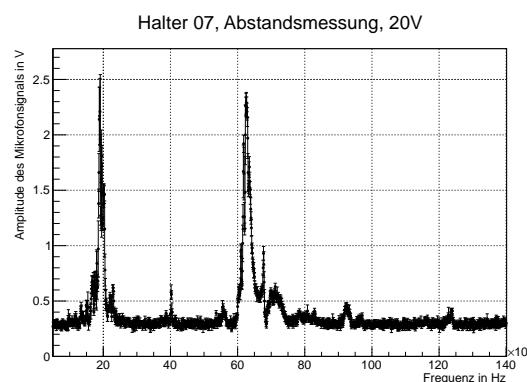


Abbildung B.5.: Frequenzspektrum des Halters 7 gemessen auf Abstand.

B. Mikrofonmessungen

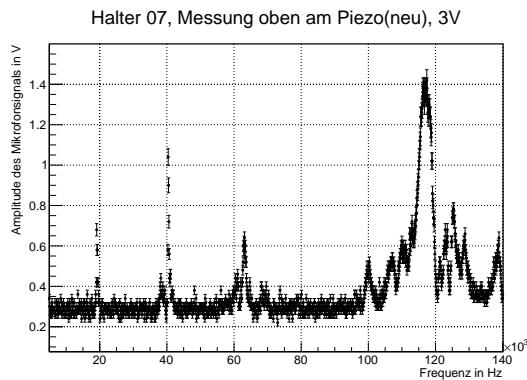


Abbildung B.6.: Frequenzspektrum des Halters 7 gemessen oben am Piezoaktor.

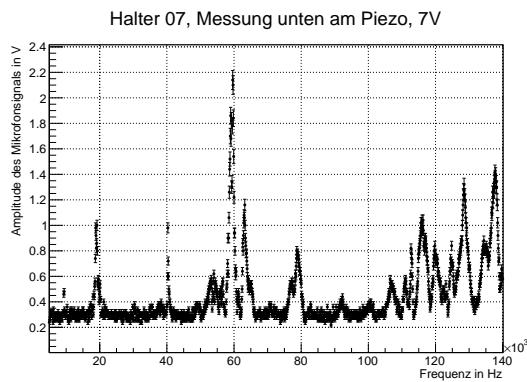


Abbildung B.7.: Frequenzspektrum des Halters 7 gemessen unten am Piezoaktor.

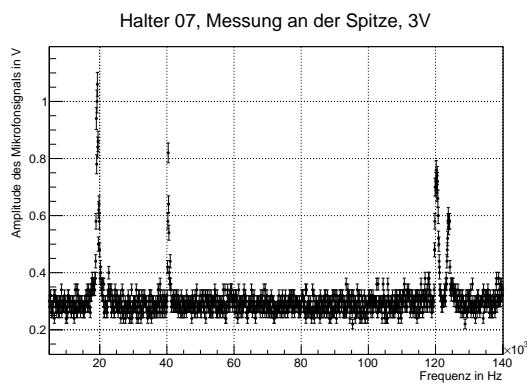


Abbildung B.8.: Frequenzspektrum des Halters 7 gemessen an der Überwurfmutter.

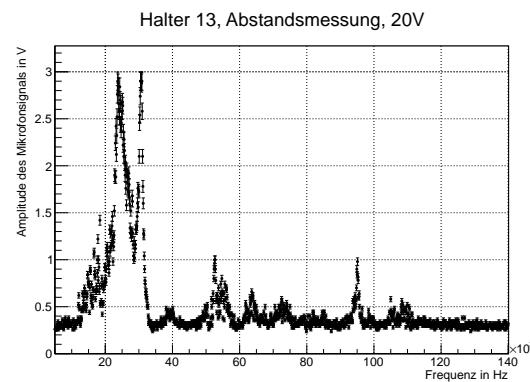


Abbildung B.9.: Frequenzspektrum des Halters 13 gemessen auf Abstand.

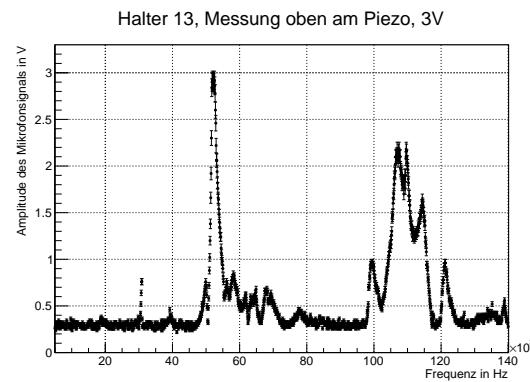


Abbildung B.10.: Frequenzspektrum des Halters 13 gemessen oben am Piezoaktor.

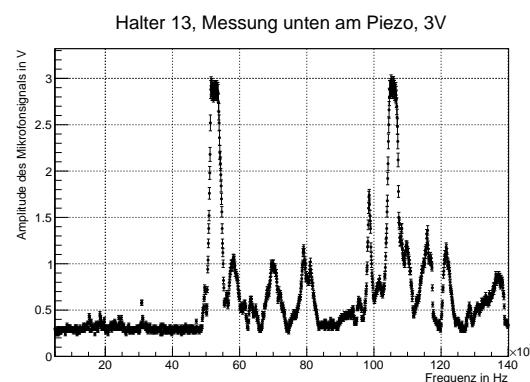


Abbildung B.11.: Frequenzspektrum des Halters 13 gemessen unten am Piezoaktor.

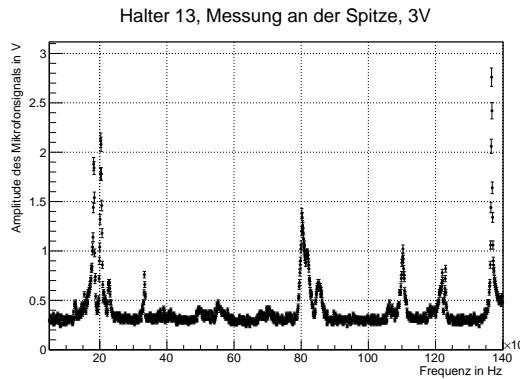


Abbildung B.12.: Frequenzspektrum des Halters 13 gemessen an der Überwurfmutter.

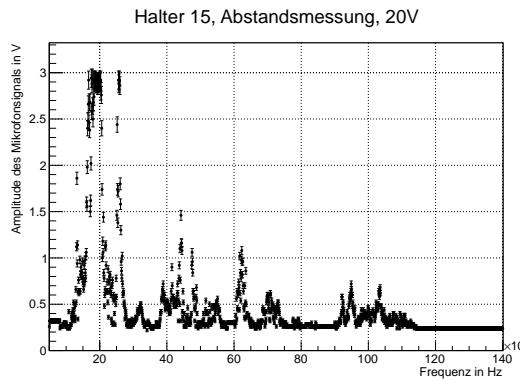


Abbildung B.13.: Frequenzspektrum des Halters 15 gemessen auf Abstand.

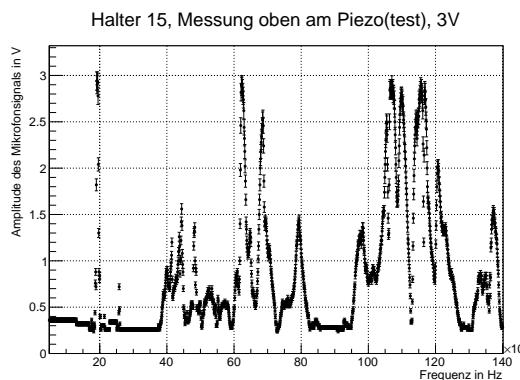


Abbildung B.14.: Frequenzspektrum des Halters 15 gemessen an der Überwurfmutter.

Halter 15, Messung unten am Piezo, 3V

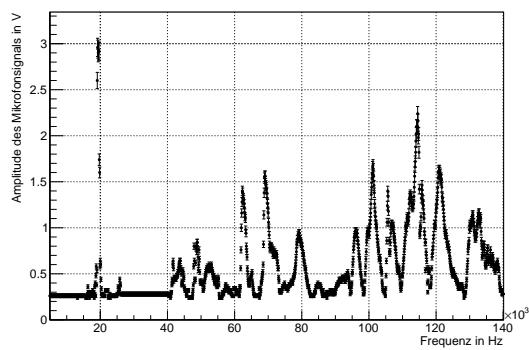


Abbildung B.15.: Frequenzspektrum des Halters 15 gemessen unten am Piezoaktor.

Halter 15, Kontaktmessung an der Spitze, 3V

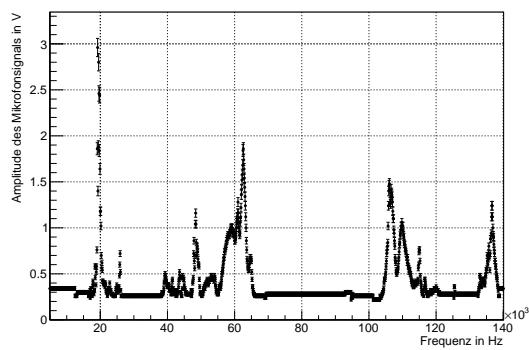


Abbildung B.16.: Frequenzspektrum des Halters 15 gemessen auf Abstand.

B. Mikrofonmessungen

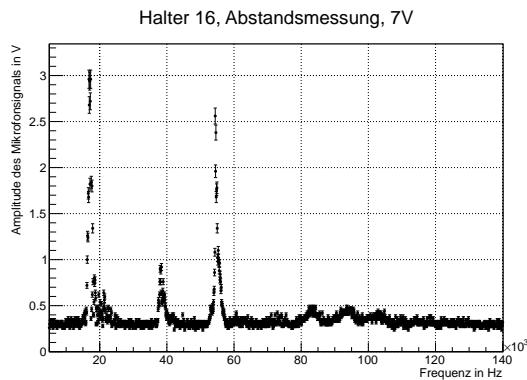


Abbildung B.17.: Frequenzspektrum des Halters 16 gemessen auf Abstand.

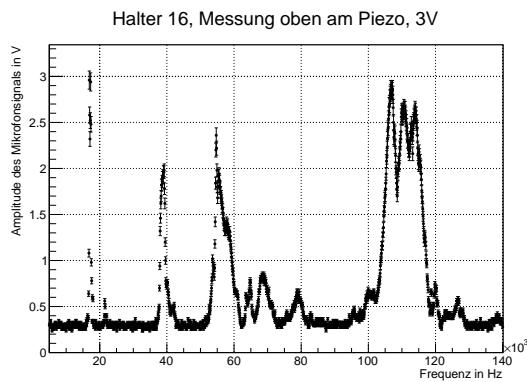


Abbildung B.18.: Frequenzspektrum des Halters 16 gemessen oben am Piezoaktor.

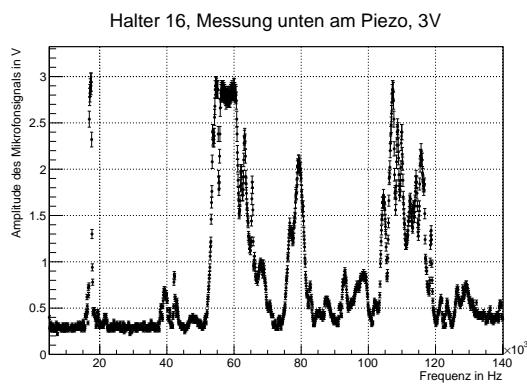


Abbildung B.19.: Frequenzspektrum des Halters 16 gemessen unten am Piezoaktor.

Halter 16, Kontaktmessung an der Spitze, 3V

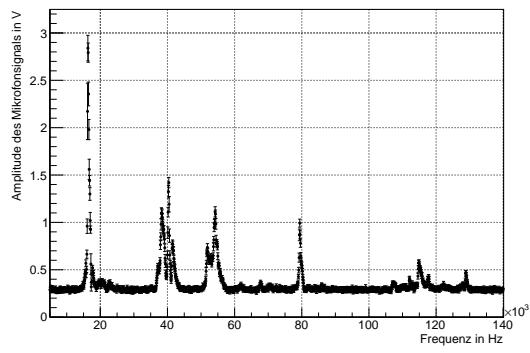


Abbildung B.20.: Frequenzspektrum des Halters 16 gemessen an der Überwurfmutter.

C. Literaturverzeichnis

- [A⁺04] ADAM, H.-H. et al.: *Proposal for the Wide Angle Shower Apparatus (WASA) at COSY-Jülich „WASA at COSY“*. 2004.
- [B⁺12] BERNINGER, J. et al.: *Particle Physics Booklet* Particle Data Group, 2012.
- [Ber06] BERGER, C.: *Elementarteilchenphysik Von den Grundlagen zu den modernen Experimenten*. 2.Auflage, Springer, 2006.
- [Cal08] CALÉN, H.: *Pellet beam dump modification*. WASA-at-COSY Collaboration WIKI - ID: Pelletdump_HC080107, Januar 2008.
- [Demm10] DEMMICH, K.: *Studien zum Nachweis schwerer Pseudoskalarer Mesonen in der Proton-Deuteron-Fusion am WASA-at-COSY*. Bachelorarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2010.
- [Dem10] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 4 Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. 3.Auflage, Springer, 2010.
- [DES13] DEUTSCHES ELEKTRONEN-SYNCHROTRON DESY: *Teilchenphysik in Deutschland* www.teilchenphysik.de (2013). Zuletzt aufgerufen: 19.02.2013.
- [E⁺96] EKSTRÖM, C. et al.: *Hydrogen pellet targets for circulating particle beams*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 371(3):572-574, 1996.
- [efu] EFUNDA: *Overview of Piezoelectricity* http://www.efunda.com/materials/piezo/general_info/gen_info_index.cfm. Zuletzt aufgerufen: 10.02.2013.
- [Eks95] EKSTRÖM, C.: *Internal targets - a review*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A Volume 362: 1-15, 1995.
- [G⁺04] GEBEL, R. et al.: *Polarized Negative Light Ions at the Cooler Synchrotron COSY/Jülich*. Institute for Nuclear Physics - COSY/ Jülich, 2004.

- [GBF⁺89] GRUBER, A. et al.: *Internal Gas-Jet Target for the ESR at GSI*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 282(1):87-93, 1989.
- [Hus12] HUSMANN, C.: *Untersuchungen zur Optimierung der Dropleterzeugung innerhalb des Pelletttargets des Experimentaufbaus WASA-at-COSY*. Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2012.
- [Kes] KESSLER, R.: *Simulation der Dynamik eines Piezoelements, Frequenzbereiche, Zeitbereiche, Aufstellen des Ersatzschaltbildes*. Fachhochschule Karlsruhe <http://www.home.hs-karlsruhe.de/~kero0001/piezo/piezo4.pdf> Zuletzt aufgerufen: 10.02.2013.
- [K⁺13] KÖHLER, E. et al.: *Laval nozzle production for internal targets*. 2013.
- [Mai97] MAIER, R.: *Cooler synchrotron COSY - performance and perspectives*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A390:1-8, 1997.
- [Mor] MORGAN ELECTRO CERAMICS: *Piezoelectric Ceramics Properties and Applications* <http://www.morgantechnicalceramics.com/resources/piezoelectric-ceramics-properties-and-applications/>. Zuletzt aufgerufen: 12.01.2013.
- [Mor07] MORGAN ELECTRO CERAMICS: *Piezoelectric Ceramics* <http://www.morgantechnicalceramics.com/resources/Literature/>. November 2007, Zuletzt aufgerufen: 12.01.2013.
- [Mor2] MORGAN ELECTRO CERAMICS: <http://www.morganelectroceramics.com/products/piezoelectric/piezoelectric-standard-tubes/>. Zuletzt aufgerufen: 24.01.2013.
- [NIS] NATIONAL INSTITUT OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>. Zuletzt aufgerufen: 12.01.2013.
- [Nor06] NORDHAGE, Ö.: *On a Hydrogen Pellet Target for Antiproton Physics with PANDA*. Dissertation, Uppsala Universitet, 2006.
- [Nor05] NORDHAGE, Ö. et al.: *On the behavior of micro-spheres in a hydrogen pellet target* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Vol 546, 391-404, 2005.
- [Nor04] NORMAN, G.: *Pellet Target Documentation*. Technischer Bericht, Internes Dokument, April 2004.

- [P⁺06] POVH, B. et al.: *Teilchen und Kerne Eine Einführung in die physikalischen Konzepte*. 7.Auflage, Springer, 2006.
- [Res10] RESAG, J.: *Die Entdeckung des Unteilbaren Quanten, Quarks und der LHC*. Springer, 2010.
- [S⁺97] STOCKHORST, H. et al.: *The cooler synchrotron COSY facility*. In: *Particle Accelerator Conference Proceedings*, Band 1, Seiten 1048-1050. IEEE, 1997.
- [Sch02] SCHNABEL, P.: *Elektronik-Fibel Elektronik Grundlagen, Messtechnik, Bau-elemente, Schaltungstechnik, Digitaltechnik* 3. Auflage, Books on Demand, 2002.
- [T⁺11] TÄSCHNER, A. et al.: *High density cluster jet target for storage ring experiments*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Volume 660: 22-30, 2011.
- [WAW82] WUTZ, M., H. ADAM UND W. WALCHER: *Theorie und Praxis der Vakuумtechnik*. Vieweg, 1982.
- [Win11] WINNEMÖLLER, A.: *Analyse des verbotenen η -Mesonen Zerfalls $\eta \rightarrow \pi^0 + e^- + e^-$ am Experimentieraufbau WASA-at-COSY*. Dissertation, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2011.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich bei meiner Bachelorarbeit unterstützt haben. Besonders möchte ich mich bei Herrn Professor Alfons Khoukaz bedanken, der es mir ermöglichte meine Bachelorarbeit in der Kern- und Teilchenphysik zu schreiben. Mein weiterer Dank gilt der gesamten AG Khoukaz, die mich herzlich aufgenommen hat und mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand. Dabei gilt mein besonderer Dank Florian Bergmann und Alexander Täschner, auf deren Unterstützung ich bis zur letzten Sekunde vertrauen konnte.

Für eine schöne Zeit und eine angenehme Arbeitsatmosphäre danke ich meinen Bürokollegen, ganz besonders Lukas mit dem die Nachschichten zum Vergnügen wurden. Ebenfalls vielen Dank an Kristina und Florian für das Korrekturlesen meiner Arbeit. Ein Dankeschön geht auch an meine Eltern und meine Freunde, auf die ich mich immer verlassen kann. Danke Ruth für deine liebevolle Unterstützung!

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst habe, dass ich keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken - auch elektronischen Medien - dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

Münster, den 21. Februar 2013