

# Betrieb und Erweiterung eines Düsenteststands sowie Untersuchung von Pentandroplets

Bachelorarbeit im Fach Physik  
vorgelegt von

Patrice Hüsemann

September 2013

Institut für Kernphysik  
Westfälische Wilhelms Universität Münster



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 WASA at COSY</b>	<b>3</b>
2.1 Das Cooler Synchrotron (COSY) . . . . .	3
2.2 Das WASA-Experiment . . . . .	4
2.2.1 Das Detektorsystem . . . . .	4
2.2.2 Das Pelletttarget-System . . . . .	5
2.2.2.1 Die Funktionsweise des Pelletttarget-Systems . . . . .	6
2.2.2.2 Der Düsenhalter . . . . .	7
2.3 Der Düsenteststand . . . . .	8
<b>3 Die Piezoaktoren</b>	<b>9</b>
3.1 Der piezoelektrische Effekt . . . . .	9
3.2 Die Scheinwiderstandsmessung . . . . .	10
3.2.1 Das Van-Dyke-Ersatzschaltbild . . . . .	11
3.2.2 Der Aufbau der Scheinwiderstandsmessung . . . . .	13
3.2.3 Die Datenaufnahme der Scheinwiderstandsmessung . . . . .	14
3.2.4 Die Kategorisierung . . . . .	17
3.2.5 Die Ergebnisse der Scheinwiderstandsmessung . . . . .	19
3.3 Die Mikrofonmessung . . . . .	22
3.3.1 Der Aufbau der Mikrofonmessung . . . . .	22
3.3.2 Die Datenaufnahme der Mikrofonmessung . . . . .	24
3.3.3 Die Ergebnisse der Mikrofonmessung . . . . .	26
3.3.4 Die Ergebnisse der schnellen Fouriertransformation . . . . .	30
<b>4 Die Glasdüsen</b>	<b>33</b>
4.1 Die Durchflussmessung . . . . .	34
4.1.1 Die Datenaufnahme der Mikrofonmessung . . . . .	36
4.1.2 Der automatische Frequenzregler . . . . .	39
4.1.3 Die Ergebnisse der Durchflussmessungen . . . . .	40
4.1.3.1 Die Ergebnisse von Halter 13 . . . . .	41
4.1.3.2 Die Ergebnisse von Halter 14 . . . . .	42
4.1.3.3 Die Ergebnisse von Halter 16 . . . . .	44
4.1.3.4 Die Ergebnisse von Halter 1N . . . . .	45
4.1.3.5 Die Ergebnisse von Halter 4N . . . . .	46
4.2 Die Bildung von Droplets . . . . .	47
4.3 Die Pentanmessung . . . . .	48
4.3.1 Der Aufbau der Pentanmessung . . . . .	48

4.3.2	Der Betrieb mit Pentan . . . . .	50
4.3.3	Die Interpretation der Aufnahmen und der Vergleich mit Methoden der Resonanzfrequenzbestimmung . . . . .	52
4.3.4	Die Bestimmung der Dropleteigenschaften . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>57</b>
<b>A</b>		<b>59</b>
A.1	Die Scheinwiderstandsmessung . . . . .	59
A.2	Die Mikrofonmessung . . . . .	66
A.3	Die Pentanmessung . . . . .	67

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Sehnsucht nach Antworten ist der Antrieb des Menschen, Wissenschaft zu betreiben. So strebt er schon lange nach der Antwort auf die Frage, aus was die Welt um uns herum besteht. Obwohl sich bereits im antiken Griechenland Philosophen wie Leukipp und Demokrit mit einer Erklärung durch die unteilbaren Teilchen „Atomos“ versuchten [Kay04], gelingt es dem Menschen erst seit knapp über einem Jahrhundert, experimentell in die Materie vorzudringen. Dabei ließ sich im Laufe der Jahre ein ganzer Teilchen-“Zoo“ detektieren, der zwar als solcher recht unübersichtlich war, jedoch im Grunde nur die Kombinationsmöglichkeiten von 12 unteilbaren Elementarteilchen widerspiegelt. Zusammen mit den 12 Eichbosonen, den sogenannten Austauschteilchen, die für die Wechselwirkung zwischen den Elementarteilchen verantwortlich sind, sowie dem Higgs-Boson bilden die Elementarteilchen die Grundlage für das Standardmodell der Teilchenphysik [Deu13].

Die Überprüfung des Modells erfolgt durch Experimente wie dem WASA Detektorsystem am COSY Speicherring im Forschungszentrum Jülich. Dort werden die Symmetrien und Symmetriebrüche sowie die Strukturen und Wechselwirkungen von Hadronen untersucht. Die Beobachtung von seltenen und verbotenen Zerfällen von Mesonen können dabei auf eine Physik jenseits des Standardmodells deuten [A<sup>+</sup>04]. Wichtiger Bestandteil des Detektorsystems bildet das Fixed Target System: Bei diesem tritt ein flüssiger Wasserstoff- (bzw. Deuterium-)Strahl aus einer Glasdüse aus und wird durch einen Piezoaktor mit einer bestimmbarer Frequenz gezwungen, in Tropfen, den sogenannten Droplets, aufzubrechen. Während des Eintritts in eine Vakuumkammer gefrieren die Droplets zu Pellets, die als Targetmaterial mit dem COSY-Beschleunigerstrahl kollidieren [A<sup>+</sup>04].

Die Düsendurchmesser der am Target-System verwendeten Düsen sind mit ungefähr  $13\text{ }\mu\text{m}$  am Düsenseaustgang so gering, dass eine Blockierung nicht ausgeschlossen werden kann. In der Tat wurde die Blockierung einiger Düsen bereits beobachtet. Zudem ist es in der Vergangenheit einige Male vorgekommen, dass der Piezoaktor keinen piezoelektrischen Effekt aufwies und damit keine Arbeitsfrequenz gefunden werden konnte [Ins11].

Sowohl die Blockierungen der Düsen als auch das Fehlen der Arbeitsfrequenzen fordern trotz ihrer Seltenheit den Ausbau der Targetdüse und unterbrechen dadurch die nutzbare Strahlzeit. Um den Targetbetrieb noch weiter zu optimieren, werden daher die Düsen schon vor dem Einbau im WASA Detektorsystem an einem Düsenteststand im Institut für Kernphysik an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster überprüft. Dort werden durch Durchflussmessung mit Stickstoff die Belastungen im Targetbetrieb simuliert und mit Mikrofon- und Scheinwiderstandsmessungen das Resonanzverhalten der Piezoaktoren untersucht.

Das Primärziel dieser Arbeit ist die Fortführung der Düsentests mit neuen Düsen, die im WASA Pelletttarget eingebaut werden sollen. Zusätzlich wird ein Progaramm geschrieben, dass den Piezoaktor während der Durchflussmessung in seiner Resonanzfrequenz arbeiten lässt, um die maximale Belastung zu erreichen. Mit zwei Abwandlungen der Mikrofonmessung wird zudem untersucht, wie sich

der Gasfluss auf die Messung auswirkt und ob Oberwellen der Schwingung als Nachweis für eine gute Arbeitsfrequenz verwendet werden können. Zudem wird ein weiterer Test entwickelt, bei dem die Dropletentstehung mit n-Pentan als Ersatzfluid für Wasserstoff optisch beobachtet werden kann. Neben der Untersuchung der Dropleteigenschaften ist das Ziel dieser Pentanmessung, zu prüfen, welche Methode – Scheinwiderstandsmessung oder Mikrofonmessung – die Frequenzen, bei denen Droplets entstehen, genauer vorhersagt.

# Kapitel 2

## WASA at COSY

### 2.1 Das Cooler Synchrotron (COSY)

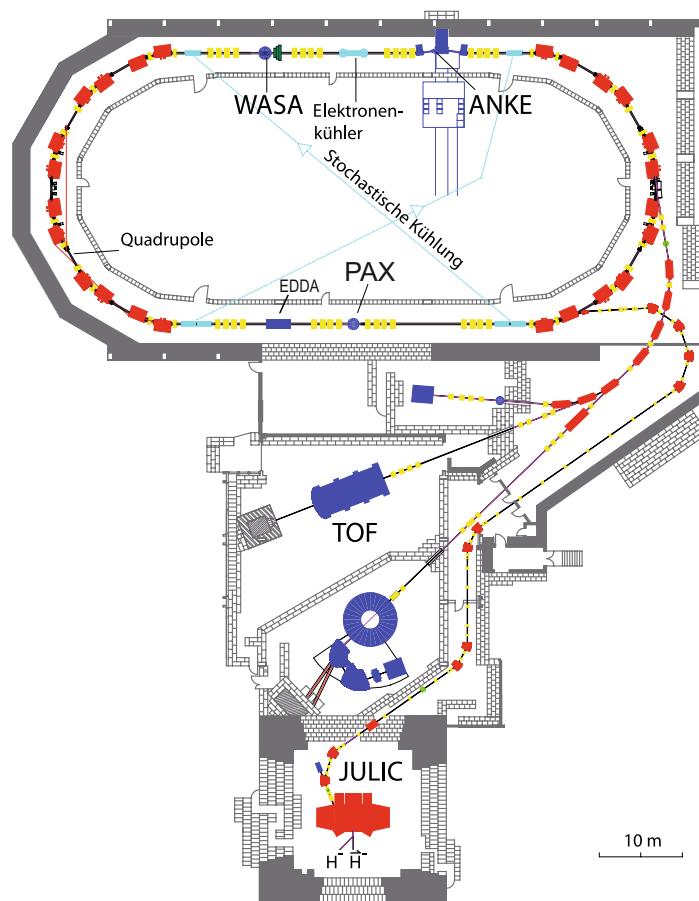


Abbildung 2.1.1: Schematischer Aufbau der COSY-Anlage in Jülich. Zu sehen sind das Zyklotron JULIC und der Speicherring mit den internen Experimenten WASA, ANKE und PAX sowie dem externen Experiment TOF. Entnommen aus [Dem13] nach [Nor04, ?].

COSY (*Cooler Synchrotron*) ist ein Speicherring für Wasserstoff- bzw. Deuterium-Ionen mit 184 m Umfang, der seit 1993 am Forschungszentrum in Jülich steht [A<sup>+</sup>04].

Nachdem  $H^-$  Wasserstoff-Ionen (bzw.  $D^-$  Deuterium-Ionen) im JULIC-Zyklotron zunächst vorbeschleunigt werden, beschleunigt der Speicherring den Teilchenstrahl weiter auf Teilchenimpulse von  $0,3 - 3,7 \frac{\text{GeV}}{c}$ . Der Name Cooler Synchrotron leitet sich von dem Mechanismus zur Kühlung des Be-

schleunigerstrahls ab, durch welche die Abweichung der Teilchen von der vorgegebenen Bahn verringert wird (vgl. Abbildung 2.1.1) [Mai97]. Nach der Beschleunigung ist es durch Kollisionen mit Targetteilchen möglich, eine Reihe von Mesonen zu erzeugen, in den Detektoranlagen zu detektieren und damit das Standardmodell der Teilchenphysik zu überprüfen. So könnte beispielsweise die Beobachtung von verbotenen Zerfällen des sogenannten  $\eta$ -Mesons auf eine Physik jenseits des Standardmodells hinweisen. Am COSY befinden sich neben dem externen Detektor TOF die internen Detektoren ANKE, PAX und WASA (**W**ide **A**ngle **S**hower **A**pparatus).

## 2.2 Das WASA-Experiment

WASA ist seit dem Umzug 2005 vom CELSIUS Speicherring in Uppsala (Schweden) in dem COSY Speicherring integriert [Hej13]. Bei WASA handelt es sich um ein internes Fixed-Target-Experiment, bei dem die Teilchen des Beschleunigerstrahls mit festen Targetteilchen (ebenfalls Wasserstoff bzw. Deuterium) kollidieren [A<sup>+</sup>04].

Die Wahl der richtigen Targetdichte entspricht einer Gratwanderung. Für die Beobachtung seltener Zerfälle ist eine hohe Ereignisrate und damit eine hohe Targetdichte von Vorteil. Ist diese allerdings zu groß, so wird der Beschleunigerstrahl zu stark beeinflusst und es erfolgt eine Impulsverschmierung [E<sup>+</sup>96]. Zudem steigt mit der Targetdichte die Wahrscheinlichkeit von Doppelereignissen.

### 2.2.1 Das Detektorsystem

WASA ist in der Lage neutrale und geladene Teilchen zu detektieren und besteht aus einem Vorwärtsdetektor sowie aus einem Zentraldetektor (vgl. Abbildung 2.2.1), die detailliert in [A<sup>+</sup>04] beschrieben sind.

Der Vorwärtsdetektor dient zur Detektion, Identifikation und Spurenrekonstruktion von Teilchen mit großem Impuls in Strahlrichtung. Er besteht aus folgenden sechs hintereinanderliegenden Detektoren:

- Dem *Forward Window Counter* (FWC), der die Triggersignale erster Stufe liefert.
- Der *Forward Proportional Chamber* (FPC), die aus vier Lagen mit Proportionaldriftkammern aufgebaut ist und zur Spurenrekonstruktion dient.
- Dem *Forward Trigger Hodoscope* (FTH), der Triggersignale zur Reduzierung des Untergrunds liefert.
- Dem *Forward Range Hodoscope* (FRH), der zur Energiebestimmung und Identifikation dient.
- Dem *Forward Range Interleaving Hodoscope* (FRI) innerhalb des FRH, der für die zweidimensionale Positionsbestimmung neutraler Teilchen verwendet wird.
- Dem *Forward Veto Hodoscope* (FVH), mit dem Teilchen gemessen werden, die das FRH durchdrungen haben.

Die genannten Detektoren bestehen bis auf die FPC wiederum aus verschiedenen Anordnungen von Szintillationsdetektoren. Optional kann zwischen dem FRH und FVH ein Absorber aus Eisen eingesetzt werden, der nur elastisch gestreute, hochenergetische Protonen zum FVH durchlässt.

Der Zentraldetektor ist um den Interaktionspunkt aufgebaut, an dem der beschleunigte Strahl des COSY und der Targetstrahl des Pelletttargets kollidieren. Da der Zentraldetektor kaum unterbrochen wird, kann er als  $4\pi$ -Detektor bezeichnet werden. Er ist schalenförmig aufgebaut:

- Im innersten befindet sich die *Mini Drift Chamber* (MDC) die aus zylinderförmig um das Strahlrohr angebrachten Driftröhren besteht und zur Rekonstruktion der Teilchenspuren und des Vertex dient.
- Die MDC ist umgeben von dem *Plastic Scintillator Barrel* (PSB), der wiederum aus unterschiedlichen Anordnungen von Szintillatoren besteht, Triggersignale erster Stufe liefert und zur Identifikation der Teilchen dient.
- Die nächste Schicht bildet ein *Superconducting Solenoid* (SCS), der durch die Erzeugung eines starken Magnetfeldes von bis zu 1,3 T zur Impulsbestimmung nötig ist.
- Es folgt eine Schicht aus Caesiumchlorid-Kristallen im *Scintillator Electromagnetic Calorimeter* (SEC), die zur Messung von Energien bis 800 MeV verwendet werden.
- Den Detektor schließt zu Abschirmung des Magnetfeldes ein Eisenjoch ab.

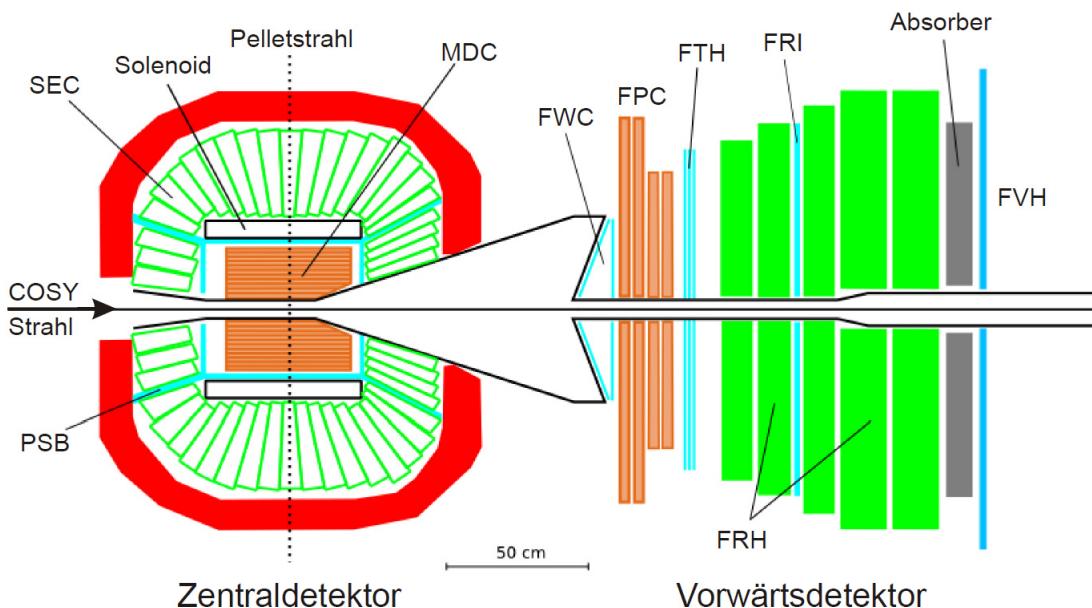


Abbildung 2.2.1: Aufbau des WASA Detektorsystems. Zu sehen ist links der schalenförmige Aufbau des Zentraldetektors mit den Detektoren MDC, PSB und SEC sowie dem Solenoid und dem Eisenjoch in rot. Rechts ist der Vorwärtsdetektor mit den hintereinanderliegenden Schichten aus den Detektoren FWC, FPC, FTH, FRH, FRI und FVH sowie dem Absorber zwischen FRH und FVH eingezeichnet [A<sup>+</sup>04].

## 2.2.2 Das Pelletttarget-System

Der WASA-Detektor verwendet das weltweit einzige Pelletttarget-System im Beschleunigerbetrieb [A<sup>+</sup>04]. Obwohl es mit Deuterium betrieben werden kann, soll sich die Beschreibung der Funktionsweise nur auf den Betrieb mit Wasserstoff beschränken.<sup>1</sup> Die genaue Beschreibung des Pelletttarget-Systems findet sich in [Nor04] (vgl. Abbildung 2.2.2).

<sup>1</sup>Der Betrieb mit Deuterium verläuft analog mit angepassten Werten für Temperatur und Druck.

### 2.2.2.1 Die Funktionsweise des Pelletttarget-Systems

Über einen heliumbetriebenen Kaltkopf wird Wasserstoff bei einem Druck von 400 mbar bis 800 mbar auf die Betriebstemperatur von ca. 15 K, also knapp über den Tripelpunkt bei  $(13,96 \pm 0,05)$  K, gekühlt [Ins11]. Durch eine Glasdüse, die in der Regel einen Düsendurchmesser am Ausgang von ca.  $13 \mu\text{m}$  aufweist, wird der Wasserstoff in flüssiger Form in eine Dropletkammer gepresst, in der ein Druck von ungefähr 20 mbar herrscht. Mithilfe eines Piezoaktors wird die Düse in Schwingung versetzt, sodass der Wasserstoff mit einer aufgezwungenen Frequenz in Form von kleinen Tropfen, den sogenannten Droplets, austritt. Im Targetbetrieb wird an den Piezoaktor eine Wechselspannung mit einer Frequenz im Bereich zwischen 40 kHz und 80 kHz und einer Spannung um  $100 \text{ V}_{pp}$  angelegt [Han09].<sup>2</sup> Durch eine Vakuuminjektionskapillare am Ende der Heliumkammer gelangen die Droplets in eine Vakuumkammer mit einem Druck von ca.  $10^{-3}$  mbar. In der Vakuuminjektionskapillare gefrieren die Droplets aufgrund des großen Druckunterschieds zu Pellets mit einem Durchmesser von ungefähr  $20 \mu\text{m}$  bis  $25 \mu\text{m}$  und einer typischen Geschwindigkeit von  $80 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  [B<sup>+</sup>08]. Ein Skimmer, der sich mit einer 1 mm großen Öffnung 70 cm unterhalb der Vakuuminjektionskapillare befindet, kollimiert den Targetstrahl, indem Pellets mit größerer Divergenz ausselektiert und nach Verdampfen abgepumpt werden [Nor04]. Um die Akzeptanz des  $4\pi$ -Zentraldetektors möglichst groß zu halten, führt der Zugang des Targetstrahls durch ein 2 m langes und 5 mm breites Targetstrahlrohr [A<sup>+</sup>04].

Hier zeigt sich ein Vorteil des Pelletttarget-Systems gegenüber anderen Target-Systemen, wie dem Gas-Jet- oder dem Cluster-Jet-Target in Form der geringen Aufweitung des Targetstrahls mit einem Durchmesser von maximal 4 mm am Interaktionspunkt [V<sup>+</sup>07, T<sup>+</sup>11, B<sup>+</sup>08]. Damit das Restgas nicht die Messung beeinflusst, befindet sich unterhalb des Interaktionspunktes und außerhalb des Zentraldetektors ein sogenannter Beam-Dump, in dem die Pellets aufbrechen und abgepumpt werden [A<sup>+</sup>04].

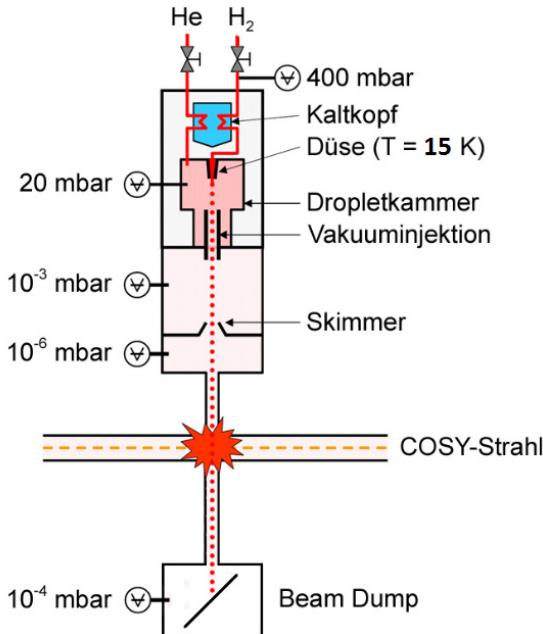


Abbildung 2.2.2: Aufbau des Pelletttarget-Systems mit den Stationen, die der Wasserstoff auf dem Weg zur Kollision mit dem COSY-Strahl durchläuft. Zunächst flüssig und über den Kaltkopf auf eine Temperatur knapp über den Triplepunkt gekühlt wird der Wasserstoffstrahl zunächst durch die Düse in Droplets aufgebrochen und erstarrt anschließend durch den Druckunterschied in der Vakuuminjektionskapillare zu Pellets. Nachdem der Skimmer den Targetstrahl kollimiert, gelangen die Pellets zum Interaktionspunkt, in dem die Targetteilchen mit den Beschleunigerteilchen kollidieren. Unterhalb des Targetstrahlrohrs brechen die Pellets im Beam Dump auf und werden abgepumpt. Nach [Nor04].

<sup>2</sup> $\text{V}_{pp}$  bezeichnet die Peak-to-Peak Spannung eines Wechselstromsignals.

### 2.2.2.2 Der Düsenhalter

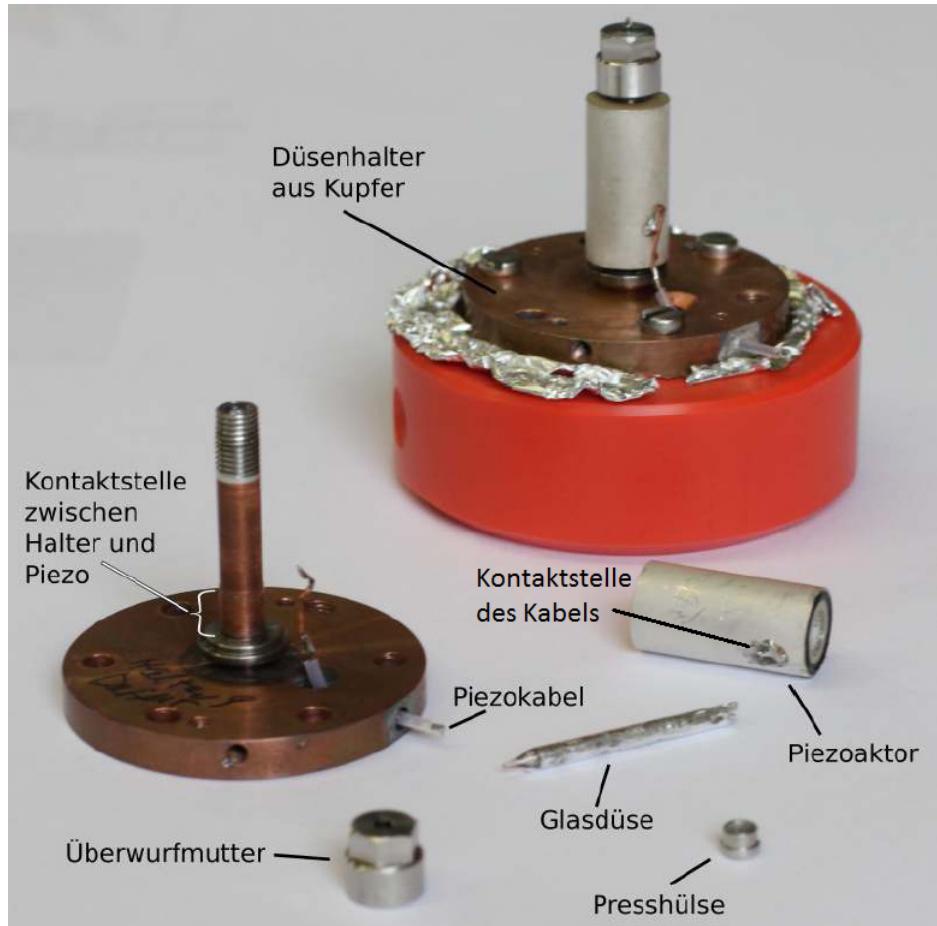


Abbildung 2.2.3: Düsenhaltersystem im zerlegten (unten) und zusammengesetzten (oben rechts) Zustand. Zu sehen ist links der Kupferhalter mit dem hohlzylinderförmigen Stift oben und der scheibenförmigen Basis unten. Während sich am unteren Ende des Stifts der Kovar-Ring als Kontaktstelle zwischen Halter und Piezoaktor befindet, ist am oberen Ende ein Gewinde für die Überwurfmutter zu sehen. Durch die Basis führt das Piezokabel, dessen Kontaktstelle an der Außenseite des Piezoaktors auf der rechten Bildseite zu erkennen ist. Die Glashülse ist an der Außenseite mit Indium bedeckt. Im zusammengesetzten Zustand ist der Düsenhalter mit Alufolie geschützt auf einem Plastikhalter geschraubt, der beim Transport der Düse verwendet wird. Nach [Hus12].

In Abbildung 2.2.3 ist einer der Düsenhalter mit Düse gezeigt, die im Pelletttarget verwendet werden. Der Kupferhalter wird für jeden Piezoaktor individuell gefertigt und besteht aus einer scheibenförmigen Basis mit konzentrischer Bohrung und einem hohlzylinderförmigen Stift, den der Piezoaktor umgibt. Zusätzlich wird der Piezoaktor mit einem Zwei-Komponenten Kleber an einen Kovar-Ring geklebt, der ebenfalls an dem Kupferhalter befestigt ist. Die versilberte Innen- und Außenwand des Piezoaktors dienen als Elektroden. Der Kupferhalter selbst bildet den Pol der Innenseite [MoroJb]. An der Außenseite wird der Piezoaktor mit einem Kabel verlötet. Dieses führt durch eine abgedichtete Kabelführung auf die Außenseite der Basis und damit von der Dropletkammer in die Kammer des Stützvakuums. Innerhalb der Basis und des Stifts befindet sich die Glasdüse. Der Raum zwischen Glasdüse und Düsenhalter ist mit Indium ausgefüllt. An der Düsen spitze stabilisieren eine Überwurfmutter und eine Presshülse die Düse zusätzlich. Anders als der Piezoaktor kann die Glasdüse bei Funktionsunfähigkeit ausgewechselt werden [Hus12].

## 2.3 Der Düsenteststand

Es ist möglich, dass die Glasdüsen blockieren oder keine Arbeitsfrequenzen der Piezoaktoren gefunden werden können. Dies hat zur Folge, dass die Messung am WASA-Detektor unterbrochen werden muss. Um die Düsen und Piezoaktoren bereits vor der Verwendung in Jülich zu testen, ist daher im Institut für Kernphysik in Münster von C. Husmann ein Düsenteststand eingerichtet worden, der die Bedingungen des WASA-Experiments simuliert. Der Düsenteststand bestand ursprünglich aus einem Aufbau zur Überprüfung der Düsendurchlässigkeit durch eine Durchflussmessung (vgl. Abschnitt 4.1) und einem weiteren Aufbau zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens und Bestimmung der Resonanzfrequenzen durch eine Mikrofon- und Scheinwiderstandsmessung (vgl. Abschnitt 3.2.2 und 3.3) [Hus12]. Aus Sicherheitsgründen wird bei der Durchflussmessung mit gasförmigem Stickstoff anstelle von Wasserstoff gearbeitet. Durch die Entwicklung einer Messbox von F. Schepers, die in Abschnitt 3.2.2 genauer beschrieben wird, kann der Scheinwiderstand am Aufbau zur Durchflussmessung bestimmt werden. Im Zuge dieser Arbeit wird der Teststand weiter optimiert. Es wird ein automatischer Frequenzregler entwickelt, der bei der Durchflussmessung die Arbeitsfrequenz in der Nähe der Resonanzfrequenz hält. Zudem wird ein Experiment zur Untersuchung der Dropletentstehung von Pentan (vgl. Abschnitt 4.3) in den Aufbau der Mikrofonmessung integriert. Die Mikrofonmessung wird so erweitert, dass die Schwingung von Stickstoffgas, das durch die Düse geleitet wird, untersucht werden kann.

In dieser Arbeit werden sechs Düsen getestet, die im weiteren mit ihrer Halternummer beschrieben werden. Die bereits im Pellettarget-System genutzten Halter 13, 14, 16 sowie die bisher nicht verwendeten Halter 1N und 4N werden mit der Durchflussmessung und Scheinwiderstandsmessung untersucht. Die Düse im Halter 4 dient als Testdüse für die Pentanmessung, mit der die Methoden der Scheinwiderstands- und Mikrofonmessung verglichen werden können.

# Kapitel 3

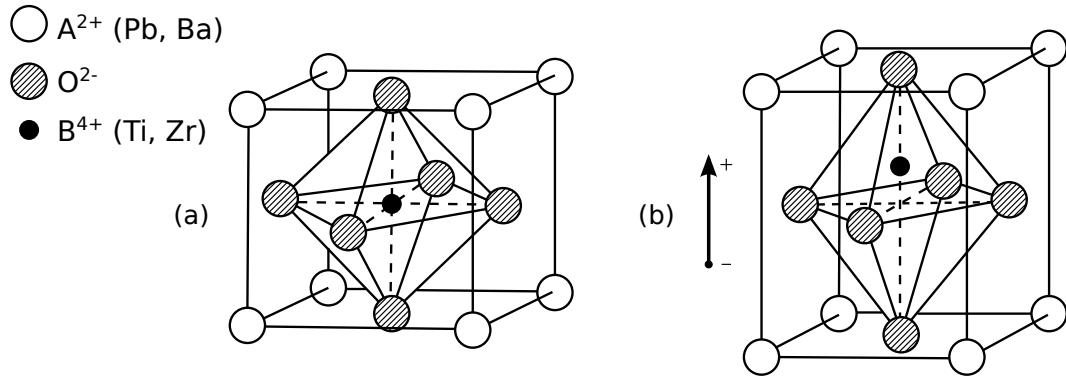
## Die Piezoaktoren

Es ist wichtig die Funktionsweise der Piezoaktoren zu untersuchen und zu verstehen, da ein Defekt des am Pelletttarget verwendeten Piezoaktors eine Ursache für die Unterbrechung der Messungen des WASA-Detektors ist. Im Folgenden werden die Eigenschaften der Piezokristalle und die theoretischen Grundlagen des inversen piezoelektrischen Effekts nach [MoroJa] erklärt.

### 3.1 Der piezoelektrische Effekt

Der direkte piezoelektrische Effekt, die Eigenschaft einiger Kristalle unter mechanischer Verformung eine Spannung aufzubauen, wurde 1880 von den Brüdern Jacques und Pierre Curie entdeckt. Für die Dropleterzeugung wird der umgekehrte (inverse) piezoelektrische Effekt genutzt:

Wird zwischen den gegenüberliegenden Seiten eines Piezokristalls eine Spannung angelegt, so verformt sich dieser. Neben den natürlichen Piezokristallen, wie zum Beispiel Quarzkristallen, die schon seit Jahren für elektronische Bauteile verwendet werden, gibt es eine Reihe von synthetischen Materialien, wie zum Beispiel Blei-Zirconium-Titan (PZT)-Kristalle, bestehend aus Blei bzw. Barium, Sauerstoff und Titan bzw. Zirconium. PZT-5H Kristalle dienen als Piezoaktoren des WASA-Pelletttarget-Systems. Oberhalb der sogenannten Curie-Temperatur besitzen diese Kristalle eine einfach kubische Symmetrie (vgl. Abbildung 3.1.1 (a)). Dabei nehmen die Blei- bzw. Barium-Atome die Anordnung eines primitiv kubischen Gitters mit flächenzentrierten Sauerstoff-Atomen und einem raumzentrierten Titan- bzw. Zirconium-Atom ein. Unterhalb dieser kritischen Temperatur verzerrt sich das Gitter zu einer tetragonalen / rhomboedrischen Perowskit-Struktur und das positiv geladene Titan- bzw. Zirconium-Atom wandert aus der raumzentrierten Position heraus (vgl. Abbildung 3.1.1 (b)). So entstehen elektrische Dipole, die sich allerdings statistisch verteilen, sodass der piezoelektrische Effekt makroskopisch nicht auftritt. Um den Effekt makroskopisch zu erhalten, wird der Kristall bei der Herstellung auf eine Temperatur oberhalb der Curietemperatur erhitzt und beim anschließenden Herunterkühlen durch ein äußeres Feld polarisiert. Dadurch frieren die Dipole ein, die sich entlang des äußeren elektrischen Feldes angeordnet haben. Wird der Kristall über die Curietemperatur erhitzt oder wird ein zu hohes elektrisches Feld ( $200 \frac{V}{mm}$  bis  $500 \frac{V}{mm}$ ) angelegt, verliert der Piezo seinen Effekt irreversibel. Der am Düsenhalter verwendete Piezoaktor hat die Form eines Hohlzylinders mit einer Wandstärke von 6 mm, sodass die angelegte Spannung einen Wert von 1200 V nicht übersteigen sollte [MoroJb].



Der Piezoaktor besitzt durch seine Form drei Schwingungsmoden [Mor07], die in Abbildung 3.1.2 dargestellt sind:

- Longitudinale Schwingung, bei der die Höhe des Hohlzylinders schwingt,
- Breitenschwingung, bei der Innen- und Außenradius gegenphasig schwingen,
- Radiale Schwingung, bei der Innen- und Außenradius gleichphasig schwingen.

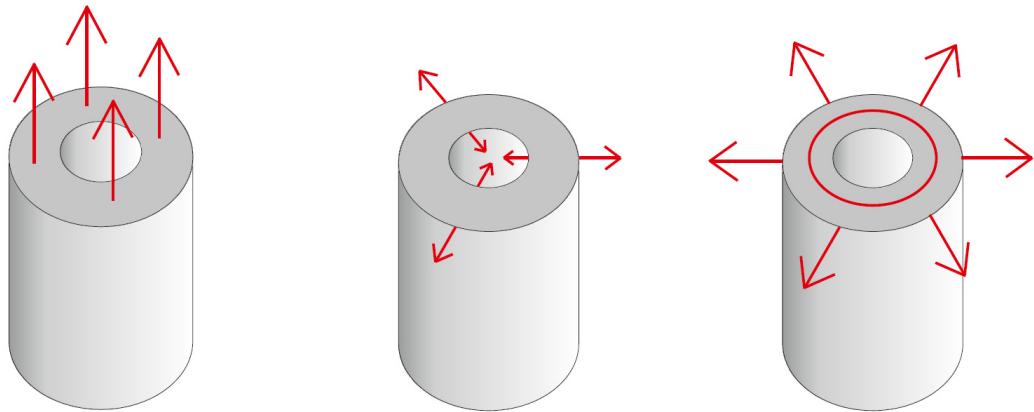


Abbildung 3.1.2: Die drei Schwingungsmodi für die am Pelletttarget verwendeten Piezoaktoren. V.l.n.r.: Die Longitudinale Schwingung, die Breitenschwingung und die radiale Schwingung [Hus12].

## 3.2 Die Scheinwiderstandsmessung

Eine Möglichkeit das Schwingungsverhalten der Piezoaktoren zu untersuchen, bietet die Messung des Scheinwiderstands. Durch die direkte Abhängigkeit von der angelagerten Wechselspannung können mit dem Scheinwiderstand die Resonanzfrequenzen der Schwingungsmoden nachgewiesen werden.

### 3.2.1 Das Van-Dyke-Ersatzschaltbild

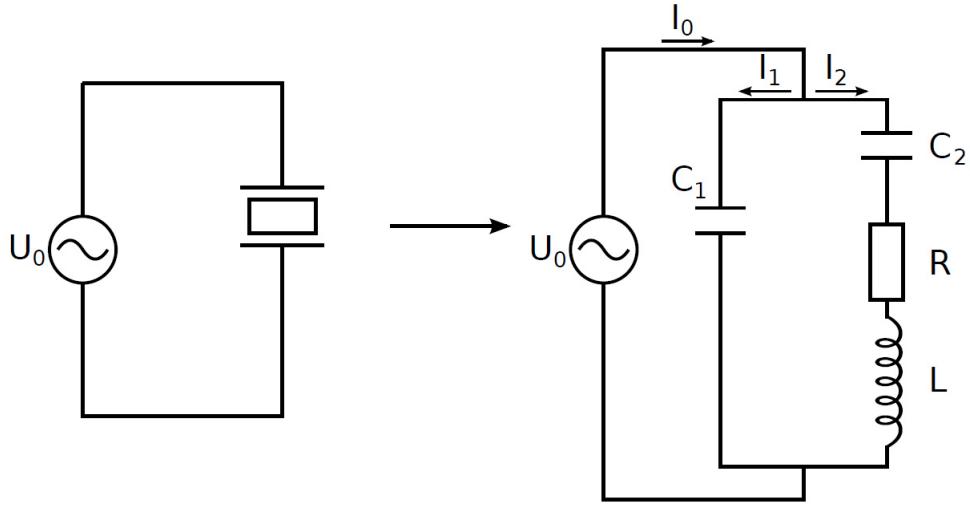


Abbildung 3.2.1: Schaltkizze von Piezokristallen (links) und Übergang zum Van-Dyke-Ersatzschaltbild (rechts). Im Ersatzschaltbild sind die beiden parallelen Zweige zu erkennen: Der linke Zweig mit dem Kondensator  $C_1$  zur Beschreibung der elektrischen Eigenschaft und der rechte Zweig mit der Reihenschaltung aus dem Kondensator  $C_2$  dem Widerstand  $R$  und der Spule  $L$  zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaft [Ins11].

Die genauen Zusammenhänge zwischen der mechanischen Verformung und der angelegten Spannung sowie die Bestimmung der Resonanzfrequenz können mithilfe des Van-Dyke-Ersatzschaltbildes hergeleitet werden. Das Ersatzschaltbild besteht aus zwei parallelen Zweigen (vgl. Abbildung 3.2.1). Einer dient der Beschreibung der elektrischen und einer der Beschreibung der mechanischen Eigenschaften des Piezoaktors. Für den ersten Zweig kann der Piezoaktor als Kondensator mit einem Dielektrikum betrachtet werden. Er entspricht in der Abbildung 3.2.1 dem linken Zweig der Parallelschaltung mit dem Kondensator  $C_1$ . Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, handelt es sich bei dem Piezoaktor genauer um einen Zylinderkondensator mit der Länge  $l$  dem äußeren Durchmesser  $d_a$  und dem inneren Durchmesser  $d_b$ , sodass seine Kapazität gegeben ist durch [Mor07]

$$C_1 = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{l}{\ln\left(\frac{d_a}{d_b}\right)}. \quad (3.2.1)$$

Hier ist  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$  die elektrische Feldkonstante und  $\epsilon_r = 3400$  die relative Permittivität des Dielektrikums des Piezomaterials [Mor07]. Die Impedanz  $Z$  als komplexer Widerstand ergibt sich aus

$$Z_1 = \frac{1}{i\omega C_1}. \quad (3.2.2)$$

Die mechanische Verformung wird in Abbildung 3.2.1 durch den rechten Zweig der Parallelschaltung beschrieben und in [KesoJ] ausführlich hergeleitet. Die Verformung des Piezoaktors unter einer angelegten Wechselspannung wird durch einen eindimensionalen gedämpften harmonischen Oszillator beschrieben. Die Impedanz ergibt sich aus der Reihenschaltung aus einem Kondensator mit der Kapazität  $C_2$ , einem Widerstand  $R$  und einer Spule mit der Induktivität  $L$  (vgl. Abbildung 3.2.1), sodass gilt:

$$Z_2 = Li\omega + \frac{1}{i\omega C_2} + R = R + i \cdot (\omega L - \frac{1}{\omega C_2}). \quad (3.2.3)$$

Die Gesamtimpedanz ergibt sich aus der Parallelschaltung der beiden einzelnen Impedanzen  $Z_1$  und  $Z_2$  zu

$$\begin{aligned} Z_{ges} &= \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} = \frac{1}{i\omega C_1 + \frac{1}{R+i\cdot(\omega L - \frac{1}{\omega C_2})}} \\ &= \frac{R + i \cdot (\omega L - \frac{1}{\omega C_2})}{i\omega C_1 R - \omega C_1 \cdot (\omega L - \frac{1}{\omega C_2}) + 1}. \end{aligned} \quad (3.2.4)$$

Für den Scheinwiderstand als Realteil der Impedanz folgt damit

$$|Z_{ges}| = \frac{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C_2})^2}}{\sqrt{(1 - \omega C_1 \cdot (\omega L - \frac{1}{\omega C_2}))^2 + (\omega C_1 R)^2}}. \quad (3.2.5)$$

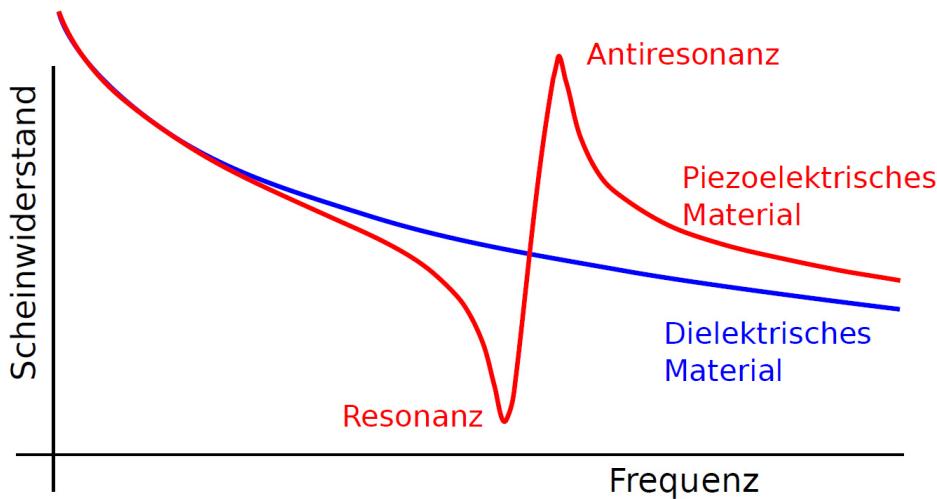


Abbildung 3.2.2: Scheinwiderstand gegen Frequenz aufgetragen. Zu sehen ist das Resonanz-Antiresonanz-Paar in rot, das in dem Zweig mit der Reihenschaltung ihren Ursprung hat und sich auf der Grundlinie in blau ausbildet. Die Grundlinie entsteht durch den Zweig mit dem Kondensator  $C_1$  und besitzt den Verlauf von einem dielektrischen Material [EfuoJ].

Wird der Scheinwiderstand  $|Z|$  gegen die Frequenz  $f = \omega/(2\pi)$  aufgetragen, ergibt sich ein Verlauf, wie er in Abbildung 3.2.2 gezeigt ist. Auf einer fallenden Grundlinie, die nach Gleichung (3.2.2) durch den Zweig mit dem Kondensator  $C_1$  entsteht, bildet sich ein Paar aus Resonanz und Antiresonanz aus. Dieses Paar hat in dem Zweig mit der Reihenschaltung ihren Ursprung.

Unter Vernachlässigung des ohmschen Widerstandes gilt für das Minimum bei der Resonanzfrequenz nach [Mor07]

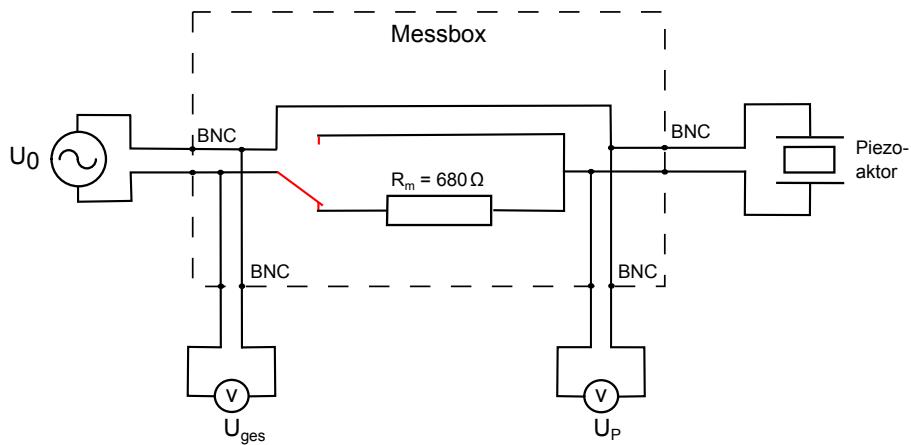
$$f_R = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC_2}} \quad (3.2.6)$$

und für das Maximum bei der Antiresonanzfrequenz

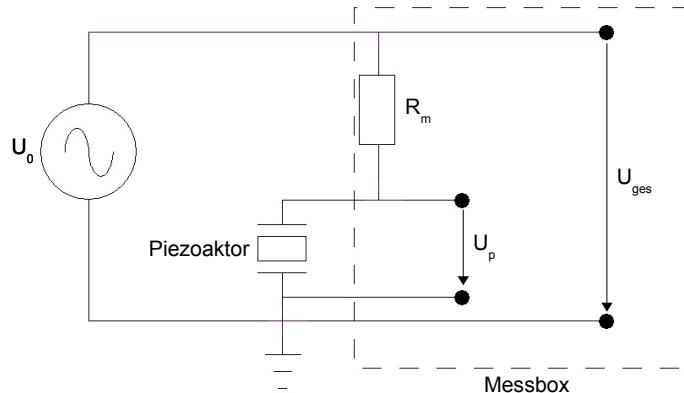
$$f_A = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L} \cdot \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)}. \quad (3.2.7)$$

Am WASA-Pelletttarget konnte die Bildung von Droplets in der Nähe dieser Resonanz-Antiresonanz-Paare beobachtet werden. Aus diesem Grund wurde in Münster ein Versuchsaufbau entwickelt, mit dem es möglich ist, den Scheinwiderstand der Piezoaktoren weiter zu untersuchen und die Resonanzfrequenzen zu bestimmen.

### 3.2.2 Der Aufbau der Scheinwiderstandsmessung



(a) Schaltungsprinzipielle Darstellung der Messbox [Sch13b].



(b) Vereinfachte Schaltungsprinzipielle Darstellung der Messbox nach [Hus12].

Abbildung 3.2.3: Von F. Schepers entwickelte Messbox zur Messung des Scheinwiderstands. Die Messbox besitzt einen BNC-Eingang für die angelegte Wechselspannung des Frequenzgenerators, einen BNC-Ausgang zur Ansteuerung des Piezoaktors sowie jeweils einen BNC-Ausgang vor und nach dem Messwiderstand  $R_m$  zur Messung der Gesamtspannung  $U_{ges}$  und der am Piezoaktor abfallenden Spannung  $U_P$ .

Von F. Schepers wurde eine Messbox entwickelt, mit der es möglich ist, den Scheinwiderstand der Piezoaktoren zu ermitteln. Sie besteht aus einem Messwiderstand mit  $R_m = 680 \Omega$ , der in Reihe mit dem Piezoaktor geschaltet wird [Sch13b]. Wie in der zugehörigen Schaltkizze in Abbildung 3.2.3b zu sehen, wird zum einen die am Piezoaktor abfallende Spannung  $U_P$  und zum anderen die Gesamtspannung der Reihenschaltung  $U_{ges}$  über zwei BNC-Ausgänge ausgegeben. Die Spannung  $U_m$ , die am Messwiderstand  $R_m$  abfällt, ergibt sich aus der Differenz zu

$$U_m = U_{ges} - U_P. \quad (3.2.8)$$

Der Scheinwiderstand am Piezoaktor ergibt sich aus dem Quotienten der Effektivwerte der Spannung und Stromstärke

$$|Z| = \frac{U_P^{eff}}{I_P^{eff}}. \quad (3.2.9)$$

Die Stromstärke  $I_p$  am Piezoaktor ist dieselbe, wie die Stromstärke  $I_R$  am Messwiderstand  $R_m$ . Es gilt

$$I_p^{eff} = I_m^{eff} = \frac{U_m^{eff}}{R_m}. \quad (3.2.10)$$

Wird (3.2.10) in (3.2.9) eingesetzt, folgt

$$|Z| = \left( \frac{1}{\frac{U_{ges}^{eff}}{U_p^{eff}} - 1} \right) \cdot R_m. \quad (3.2.11)$$

Mit der Messbox ist es möglich, den Verlauf des Scheinwiderstandes gegen die Frequenz zu untersuchen, die Resonanzfrequenzen zu bestimmen (vgl. auch Abbildung 3.2.11) und zu überprüfen, ob die Piezoaktoren über längere Zeit ihre Eigenschaften ändern.

### 3.2.3 Die Datenaufnahme der Scheinwiderstandsmessung

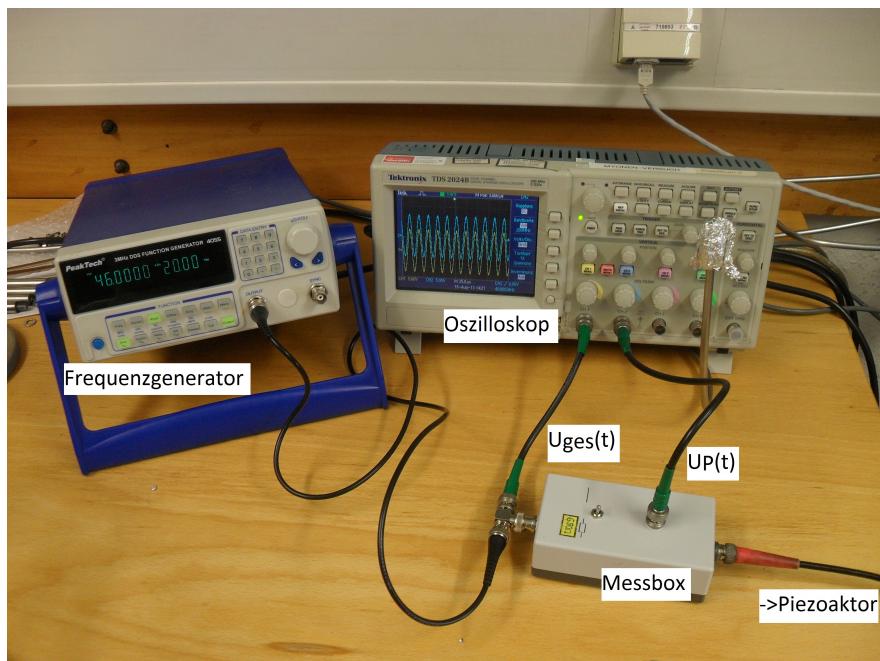


Abbildung 3.2.4: Foto vom Aufbau der Scheinwiderstandsmessung. Zu sehen ist die Messbox, über die das Spannungssignal des Frequenzgenerators zum Piezoaktor läuft. Durch den Widerstand in der Messbox (vgl. Abbildung 3.2.3) können vom Oszilloskop die beiden Spannungssignale  $U_{ges}(t)$  und  $U_P(t)$  gemessen werden.

Die am Piezoaktor angelegte Wechselspannung wird durch den Frequenzgenerator *DDS 4055* von PeakTech erzeugt. Dieser Frequenzgenerator wird bei allen folgenden Experimenten verwendet, um den Piezoaktor anzusteuern. Mit LabVIEW wurde von C. Husmann zur Aufnahme eines Scheinwiderstandsspektrums ein Programm entwickelt, das eine definierte Startfrequenz mit einer bestimmten Schrittweite anwachsen lässt (vgl. Abbildung 3.2.5). Üblicherweise liegt die Schrittweite bei  $\Delta f = 500$  Hz in einem Frequenzbereich von 10000 Hz bis 120000 Hz bzw. bei  $\Delta f = 100$  Hz im Bereich der für die Durchflussmessung verwendeten Resonanzfrequenz. Es ergeben sich Unsicherheiten von 140 Hz bei einer Schrittweite von  $\Delta f = 500$  Hz und 30 Hz bei einer Schrittweite von  $\Delta f = 100$  Hz. Die Spannungssignale  $U_P(t)$  und  $U_{ges}(t)$  werden mit dem Oszilloskop *TDS 2024B* von Tektronix über zwei Kanäle gemessen (vgl. Abbildung 3.2.4). Das Oszilloskop wird ebenfalls bei allen folgenden Versuchen verwendet. In dieser Arbeit liegt die angelegte Spannung bei 20 V<sub>pp</sub>.

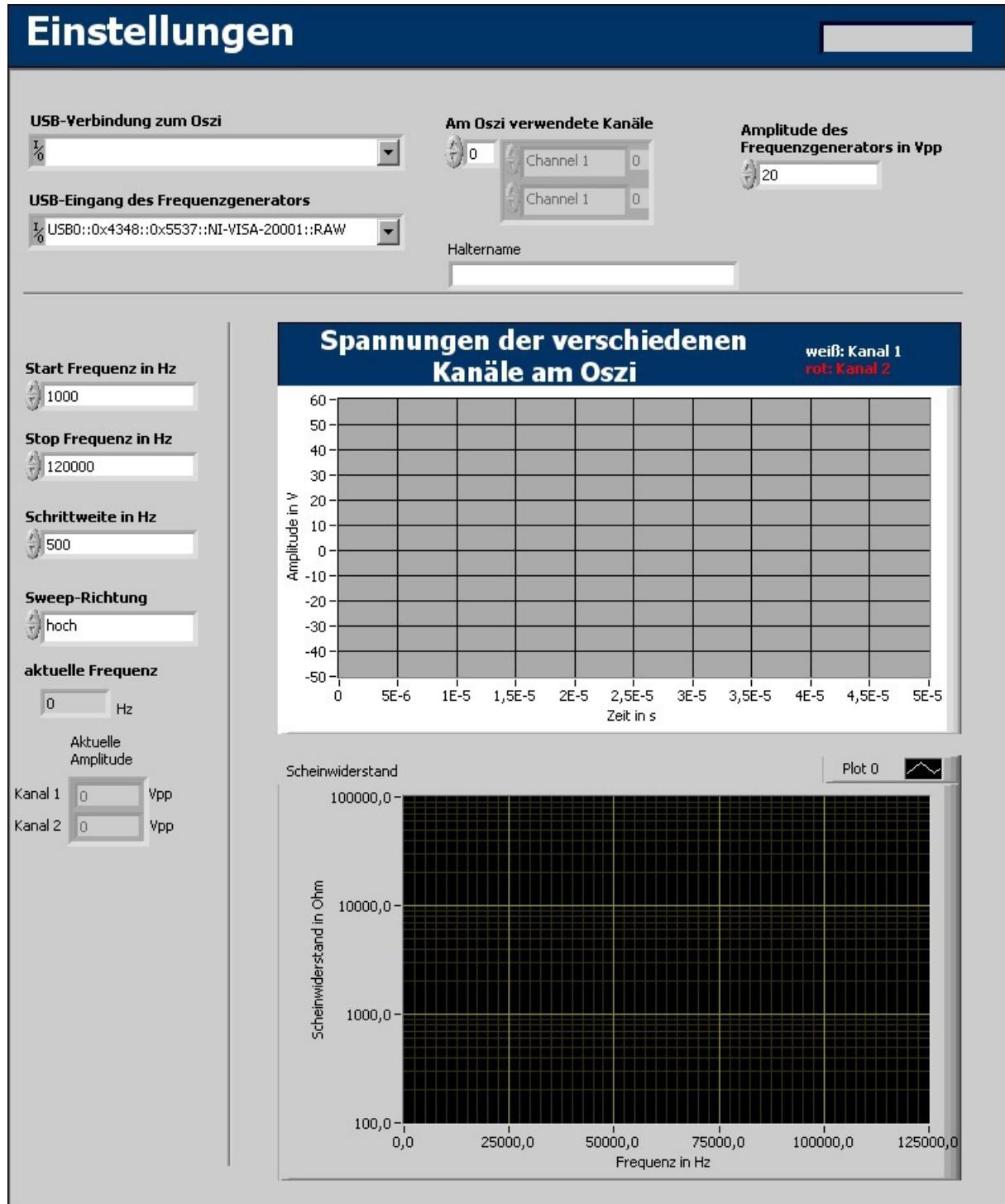
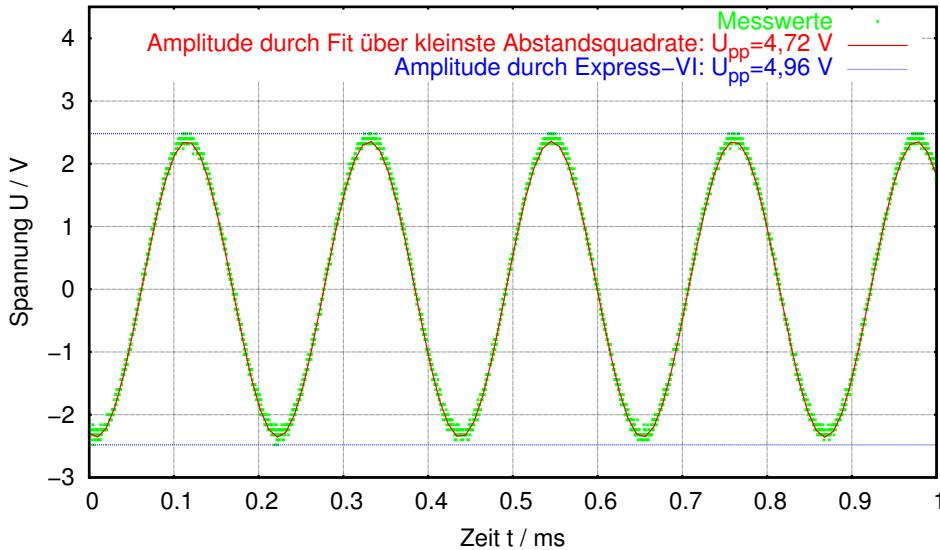
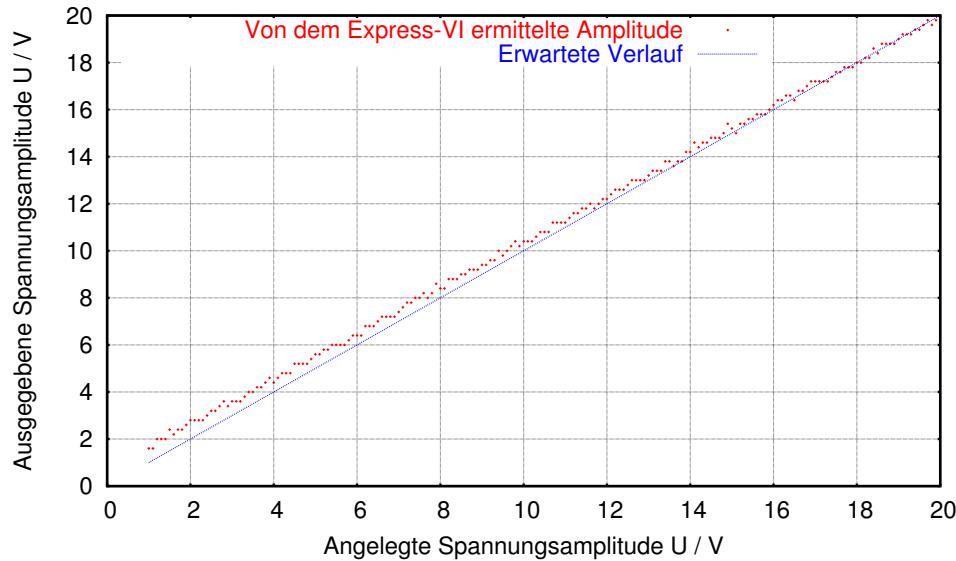


Abbildung 3.2.5: Frontpanel des LabVIEW Programms. Oben und auf der linken Seite können die Spannungsamplitude, die Startfrequenz sowie die Schrittweite für den Frequenzgenerator eingestellt werden. Während der obere Graph die aktuell vom Oszilloskop gemessenen Spannungssignale  $U_P(t)$  und  $U_{ges}(t)$  darstellt, ist im unteren Graphen der berechnete Scheinwiderstand  $|Z|$  des Piezoaktors gegen die angelegte Frequenz aufgetragen.



(a) Beispielhafte Signalaufnahme ( $f = 4,5$  kHz) mit deutlichem Unterschied zwischen den verschiedenen (C++ bzw. LabVIEW) ermittelten Amplituden.



(b) Es zeigt sich eine Abweichung der gemessenen Amplitude von der eingestellten Amplitude einer angelegten Wechselspannung.

Abbildung 3.2.6: Untersuchung der Genauigkeit des verwendeten Express-VI.

Bisher wurde das Scheinwiderstandsspektrum durch weitere, auf C++ basierende Programme berechnet. Dazu wurden die Spannungssignale mit LabVIEW für die einzelnen Frequenzen und Kanäle gespeichert und mit C++ durch die Cosinus-Funktion  $U(t) = a \cdot \cos(2\pi ft + c)$  nach dem Prinzip der kleinsten Abstandsquadrate angefittet. Aus den Fitparametern für die Amplituden  $a$  konnte nach Gleichung (3.2.11) der Scheinwiderstand berechnet werden.

Im Zuge dieser Arbeit wurde das LabVIEW-Programm so erweitert, dass durch eine Subroutine, einem sogenannten Express-Virtual-Instrument oder Express-VI, die Differenz der maximalen und minimalen Signalspannung als Amplitude bestimmt wird. Dadurch kann das Scheinwiderstandsspektrum direkt auf dem Frontpanel ausgegeben und abgespeichert werden (vgl. Abbildung 3.2.5).

Abbildung 3.2.6a zeigt den Unterschied zwischen der alten Methode, dem Fit über kleinsten Abstandsquadrate durch ein auf C++ basierendes Programm, und der neuen Methode, dem direkten Auslesen durch ein Express-VI von LabVIEW [Nat12]. Da das Signal leicht verrauscht ist, liegt die durch das

Express-VI ermittelte Amplitude über der Amplitude, die sich aus dem Fit über die kleinsten Abstandsquadrate ergibt.

In Abbildung 3.2.6b ist die von dem Express-VI ausgegebene Amplitude gegen die tatsächliche Amplitude einer angelegten Wechselspannung aufgetragen. Besonders bei geringen Spannungen ist der Einfluss des Rauschens größer, sodass die ausgegebene Amplitude bis zu 80% über den tatsächlichen Werten liegt.

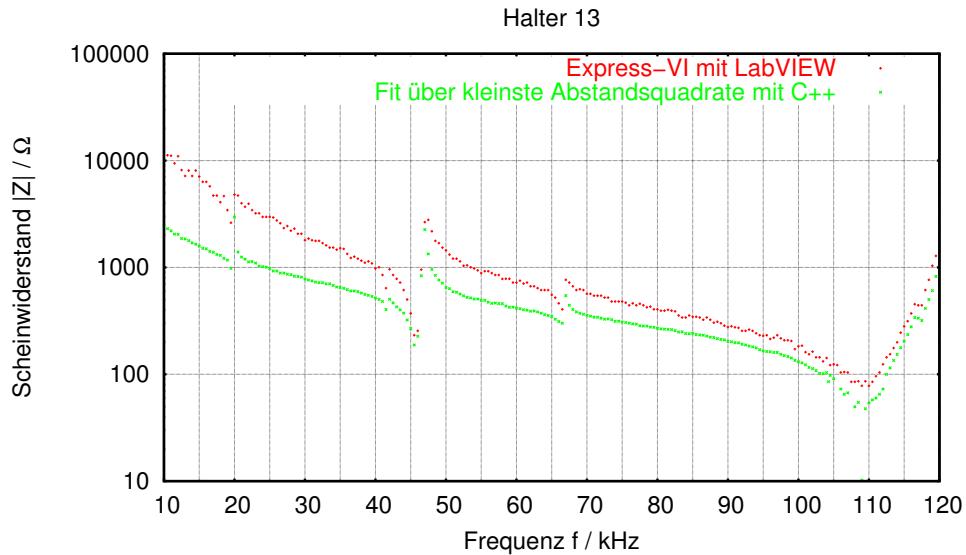


Abbildung 3.2.7: Vergleich der Scheinwiderstandsspektren von Halter 13 mit der bisherigen (C++) und neuen (LabVIEW) Methode.

Die Abbildungen 3.2.7 sowie A.1.1 und A.1.2 im Anhang zeigen die Scheinwiderstandsspektren, die mit der bisherigen (C++) und der neuen (LabVIEW) Methode aufgenommen wurden. Es zeigen sich zwar deutliche Unterschiede in den berechneten Scheinwiderstandswerten, jedoch können mit der neuen Methode ebenfalls Aussagen über die Frequenzen, bei denen Resonanzen auftreten, getroffen werden.

### 3.2.4 Die Kategorisierung

Zur Vereinfachung der Beschreibung hat F. Schepers folgende Kategorisierung für die Scheinwiderstandsspektren eingeführt [Sch13b]:

- Kategorie I: Das Spektrum weist die drei Resonanzfrequenzen  $f_{I,1} \approx 19$  kHz,  $f_{I,2} \approx 45$  kHz und  $f_{I,3} \approx 64$  kHz auf. Die Abweichung von diesen Werten beträgt höchstens 2 kHz. In logarithmischer Darstellung ist die Amplitude bei der mittleren Resonanzfrequenz  $f_{I,2}$  größer als die Amplitude bei den übrigen Resonanzfrequenzen  $f_{I,1}$  und  $f_{I,3}$ . Die Amplituden bei den Resonanzfrequenzen  $f_{I,1}$  und  $f_{I,3}$  haben wiederum dieselbe Größe (vgl. Abbildung 3.2.8).

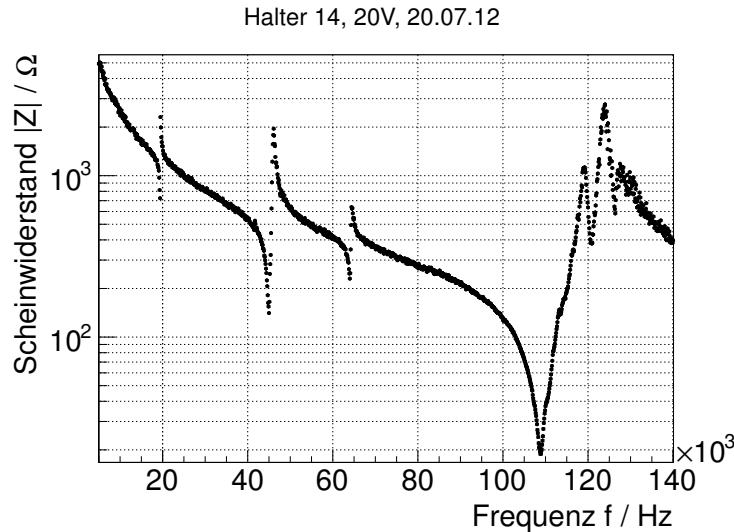


Abbildung 3.2.8: Beispiel für ein Scheinwiderstandsspektrum der Kategorie I [Sch13b].

- Kategorie II: Das Spektrum weist zwei Resonanzen mit nahezu gleicher Amplitude auf. Die erste liegt in einem Frequenzbereich von  $30 \text{ kHz} < f_{II,1} < 40 \text{ kHz}$  und die zweite bei der Frequenz  $f_{II,2} \approx 53 \text{ kHz}$ . Zusätzlich kann sich eine weitere Resonanzfrequenz unter 20 kHz befinden (vgl. Abbildung 3.2.9).

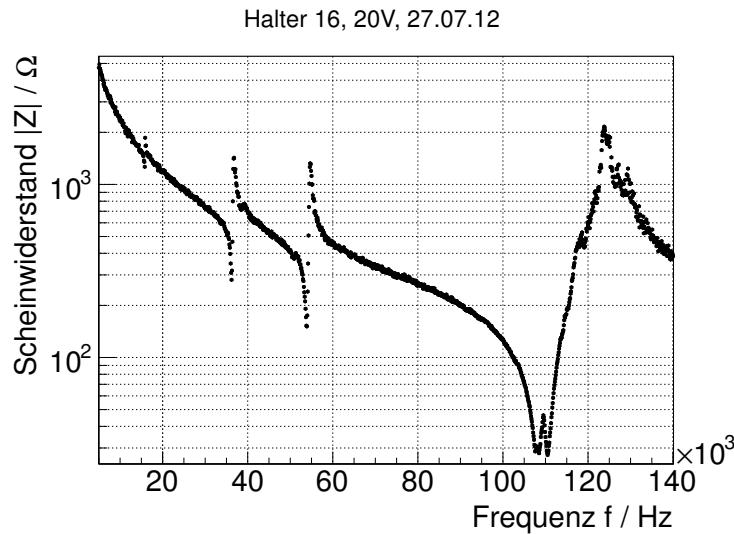


Abbildung 3.2.9: Beispiel für ein Scheinwiderstandsspektrum der Kategorie II [Sch13b].

- Kategorie III: Das Spektrum zeigt die Resonanzfrequenzen  $f_{III,1} \approx 18 \text{ kHz}$ ,  $f_{III,2} \approx 36 \text{ kHz}$  und  $f_{III,3} \approx 60 \text{ kHz}$  auf. Ihre Amplitude ist in logarithmischer Darstellung sehr klein. Zudem ist die Grundlinie um drei Größenordnungen höher als bei den anderen Kategorien. Diese Kategorie ist von F. Schepers bei einem Piezoaktor, der aufgrund fehlender Arbeitsfrequenz am Pelletttarget nicht weiter verwendet wurde, gemessen worden. F. Schepers hat daraus geschlussfolgert, dass ein Spektrum der Kategorie III auf eine geringe elektrische Kapazität  $C_1$  hinweist und als Indikator für die Fehlfunktion eines Piezoaktors verwendet werden kann (vgl. Abbildung 3.2.10).

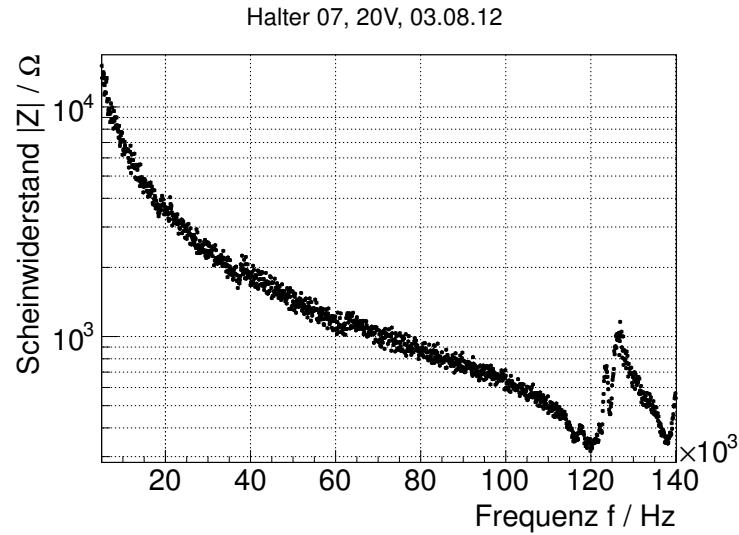


Abbildung 3.2.10: Beispiel für ein Scheinwiderstandsspektrum der Kategorie III [Sch13b].

### 3.2.5 Die Ergebnisse der Scheinwiderstandsmessung

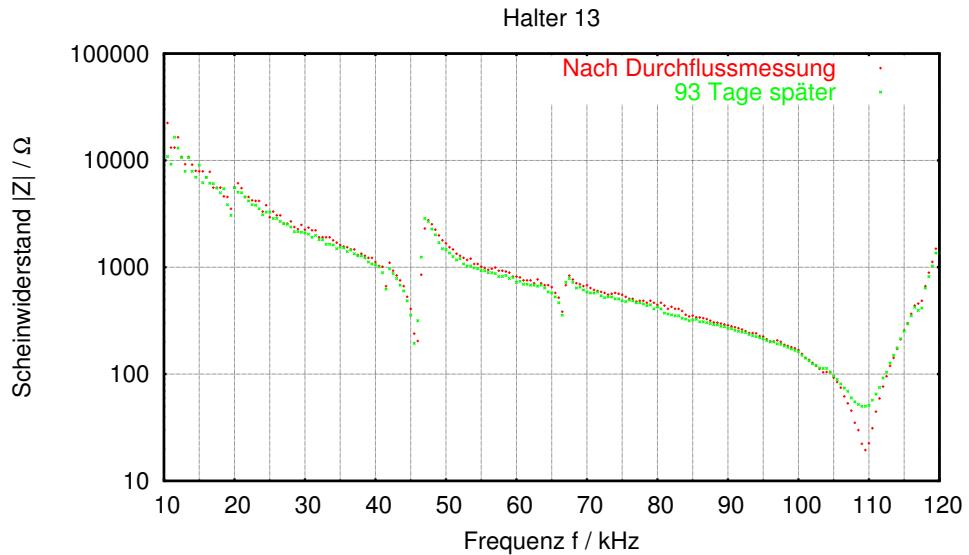


Abbildung 3.2.11: Vergleich der Scheinwiderstandsspektren von Halter 13 nach der Durchflussmessung sowie 93 Tage später bei einer Schrittweite von 500 Hz.

Die von LabVIEW ausgegebenen Werte der Scheinwiderstandsmessung sind in den Spektren in Abbildung A.1.3 bis A.1.6 im Anhang und beispielhaft für Halter 13 in Abbildung 3.2.11 dargestellt. Zusätzlich werden in Tabelle 3.1 die in den Spektren erkannten Resonanzfrequenzen aufgelistet. Die Piezoaktoren von Halter 14 und 16 wurden vor und direkt nach den Durchflussmessungen (DFM; vgl. Abschnitt 4.1), die einem Betrieb der Piezoaktoren von ungefähr einer Woche entsprechen, sowie nach einem längeren Zeitraum von ungefähr drei Monaten ohne Betrieb untersucht.

Die gezeigten Ergebnisse für Halter 13 wurden nach einer Ruhephase von wenigen Stunden im Anschluss an die Durchflussmessung sowie nach einem längeren Zeitraum von ungefähr drei Monaten ohne Betrieb gemessen. Das Scheinwiderstandsspektrum des Piezoaktors von Halter 13 wurde vor der Durchflussmessung untersucht aber nicht abgespeichert. Die vor der Durchflussmessung bestimmte Resonanzfrequenz lag allerdings an derselben Stelle, wie die Resonanzfrequenz nach der Ruhephase

bei  $66,5 \pm 0,14$  kHz. Daher kann davon ausgegangen werden, dass sich in der Ruhephase wieder der ursprüngliche Zustand des Piezoaktors einstellte.

Die Messung der Scheinwiderstände von Halter 1N und 4N nach einem längeren Zeitraum ohne Betrieb war im Rahmen der Arbeit nicht möglich.

Halter	R-A-Paar	Frequenz vor DFM [kHz]	Frequenz nach DFM [kHz]	Frequenz nach ca. 3 Monaten [kHz]
13	1	-	$19,5 \pm 0,14^*$	$19,5 \pm 0,14$
	2	-	$46 \pm 0,14^*$	$45,5 \pm 0,14$
	3	-	$66,5 \pm 0,14^*$	$66,5 \pm 0,14$
14	1	$18,5 \pm 0,14$	$18,5 \pm 0,14$	$18,5 \pm 0,14$
	2	$42,5 \pm 0,14$	$42,5 \pm 0,14$	$42,5 \pm 0,14$
	3	$57,9 \pm 0,03$	$58,4 \pm 0,03$	$58 \pm 0,14$
16	1	$19 \pm 0,14$	$19 \pm 0,14$	$19,5 \pm 0,14$
	2	$44,5 \pm 0,03$	$44,5 \pm 0,03$	$44,5 \pm 0,14$
	3	$63,5 \pm 0,14$	$63,5 \pm 0,14$	$62,5 \pm 0,14$
1N	1	$19 \pm 0,14$	$19 \pm 0,14$	-
	2	$42,5 \pm 0,14$	$42,5 \pm 0,14$	-
	3	$60,1 \pm 0,03$	$60,3 \pm 0,03$	-
4N	1	$19 \pm 0,14$	$19 \pm 0,14$	-
	2	$43,6 \pm 0,03$	$43,6 \pm 0,03$	-
	3	$62,5 \pm 0,03$	$62,7 \pm 0,03$	-

Tabelle 3.1: Resonanzen beim Scheinwiderstandsspektrum vor und nach der Durchflussmessung (DFM). Die unterstrichenen Werte zeigen eine Veränderung während der DFM an. die mit „\*“ markierten Werte erfolgten nach einer Ruhephase.

Bei der Betrachtung der Abbildungen A.1.3 bis A.1.6 und 3.2.11 zeigen sich neben dem großen R-A-Paar im Bereich zwischen 100 kHz und 120 kHz deutliche Gemeinsamkeiten der Spektren. So besitzen sie alle eine schwach ausgeprägte Resonanz bei der Frequenz  $f_1 \approx 19$  kHz mit einer Abweichung von maximal 0,5 kHz von diesem Wert. Bei allen Haltern sind bereits bei niedrigeren Frequenzen kleinere Strukturen zu erkennen, die im weiteren aber nicht betrachtet werden sollen.

Es existiert bei allen Haltern eine Resonanz im Frequenzbereich von  $42,5$  kHz  $< f_2 < 47,5$  kHz, die eine große Amplitude aufweist. Diese wird bei Halter 13 von einer schwachen Struktur unterhalb der Resonanzfrequenz, bei Halter 14 und 1N von einer schwachen Struktur oberhalb der Resonanzfrequenz, und bei Halter 16 und 4N von zwei schwachen, die Resonanzfrequenz flankierenden Strukturen begleitet. Diese Strukturen werden im weiteren mit *Begleitresonanzen* bezeichnet.

Zusätzlich besitzen die Spektren eine weitere Resonanz die in Frequenz und Amplitude von Halter zu Halter variiert. Die Resonanz liegt in einem großen Frequenzbereich von  $57,89$  kHz  $< f_3 < 66,5$  kHz und ihre Amplitude ist in logarithmischer Darstellung bei Halter 13, 16, 1N und 4N so klein wie die Amplitude der Resonanz bei der Frequenz  $f_1$ . Bei Halter 14 ist die Amplitude so groß wie die Amplitude der Resonanz bei der Frequenz  $f_2$ .

Der theoretisch zu erwartende Wert der Resonanzfrequenz liegt für die longitudinale Schwingungs- mode bei  $55,0 \pm 0,2$  kHz [Hus12]. Da es sich jedoch nicht um einen frei schwingenden Piezoaktor, sondern um ein System des gesamten Düsenhalters handelt, ergibt sich ein abweichendes Spektrum, in dem sich die Resonanzfrequenz der longitudinalen Schwingungsmoden auf einen Bereich von 42,5 kHz bis 66,5 kHz aufweitet. Durch die Individualität der einzelnen Düsenhalter ergeben sich zudem Abweichungen zwischen den einzelnen Spektren.

Die Arbeit von C. Husmann hat im Besonderen darauf hingewiesen, dass die Resonanzfrequenz  $f_1 \approx 19$  kHz der Eigenresonanzfrequenz des Düsenhalters entspricht und die dazugehörige Amplitude einen Indikator für die Verbindung zwischen Piezoaktor und Düsenhalter darstellt. Bei einem längeren Betrieb des Piezoaktors kann sich diese Verbindung lockern, was zum Verlust der Resonanz bei der Frequenz  $f_1$  im Scheinwiderstandsspektrum führt. Zudem schloss F. Schepers in seiner Bachelorarbeit aus der Erhöhung der Grundlinie um drei Größenordnungen im Vergleich zu den anderen Kategorien und der gleichzeitigen Abnahme der Resonanzamplituden, dass bei den Piezoaktoren die elektrische Kapazität  $C_1$  sehr gering sein kann (vgl. Kategorie III in Abschnitt 3.2.4). Beide Phänomene wurden bei Piezoaktoren entdeckt, die am Pelletttarget Defekte aufwiesen und können so den Verlust der Arbeitsfrequenz erklären.

Die Messungen im Zuge dieser Arbeit zeigen keines dieser Phänomene. Daher ist davon auszugehen, dass die Piezoaktoren geeignet sind, am Pelletttarget eingesetzt zu werden.

Anders als die neuen Halter 1N und 4N wurden die weiteren hier gemessenen Halter 13, 14 und 16 bereits von F. Schepers ungefähr ein Jahr zuvor untersucht. Dabei waren in Halter 13 und 16 jedoch keine und in Halter 14 eine andere Düse eingebaut, sodass sich die damals aufgezeichneten Scheinwiderstandsspektren und zugeordneten Kategorien nach Abschnitt 3.2.4 stark von den jetzigen unterscheiden (vgl. Abbildung A.1.7 im Anhang) [Sch13a]:

Die Scheinwiderstandsspektren der Halter 13 und 16 gehören nun ebenfalls zur Kategorie I statt zur Kategorie II. Sie weisen nun Resonanzen bei den Frequenzen  $f_1 \approx 19$  kHz und  $f_3 \approx 64$  kHz auf, die in logarithmischer Darstellung die gleiche Amplitude besitzen. Zudem existiert eine weitere Resonanz bei der Frequenz  $f_2 \approx 45$  kHz, die im Vergleich zu den Resonanzen bei den Frequenzen  $f_1$  und  $f_3$  eine größere Amplitude aufweist.

Das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 14 unterscheidet sich ebenfalls deutlich von dem von F. Schepers gemessenen und ist keiner dieser Kategorien zuzuordnen. Neben der Kategorie I spezifischen Resonanz bei der Frequenz  $f_1 = 19,5 \pm 0,14$  kHz existieren nun zwei Resonanzen bei den Frequenzen  $f_2 = 42,5 \pm 0,14$  kHz und  $f_3 = 57,89 \pm 0,03$  kHz mit annähernd gleicher Amplitude. Dagegen ist die von F. Schepers gefundene Resonanz bei der Frequenz  $f \approx 64$  kHz komplett verschwunden.

Die damals eingeführte Kategorisierung ist damit nicht mehr ausreichend und muss für Halter 14 um mindestens eine Kategorie erweitert werden. Das Spektrum von Halter 14 weist mit der Resonanzfrequenz  $f_1 = 19,5 \pm 0,14$  kHz Eigenschaften von Kategorie I auf. Dagegen weisen die beiden höheren Resonanzfrequenzen, sowie die Resonanzamplituden auf ein Spektrum der Kategorie II hin. Aus diesem Grund wird das Scheinwiderstandsspektrum von Halter 14 einer neuen Kategorie zugeordnet, die mit Kategorie Ib bezeichnet wird.

Beim Vergleich der Spektren vor und nach der Durchflussmessung, sind die Resonanzfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  stabil, während die Resonanzfrequenz  $f_3$  bei Halter 14, 1N und 4N im Schnitt um 0,3 kHz anstiegen. Die Begleitresonanzen um die Resonanzfrequenz  $f_2$  verändern sich bei Halter 1N und 4N ebenfalls mit der Zeit, in der der Piezoaktor betrieben wird. Grund hierfür könnte sein, dass die Temperatur und damit die Resonanzfrequenzen der Piezokristalls im Betrieb ansteigen. Die Ruhephase, in der sich der Halter 13 nach der Durchflussmessung befand, hat für den Piezoaktor ausgereicht, um sich abzukühlen. Daher kann durch die Scheinwiderstandsmessung keine Änderung der Resonanzfrequenz festgestellt werden (vgl. Abschnitt 4.1.3.1).

Mit einer zusätzlichen Aufnahme der Spektren ungefähr drei Monate später kann überprüft werden, ob sich die Piezoeigenschaft über einen längeren Zeitraum ohne Betrieb verändert. Während die Messungen vor und nach der Durchflussmessung im Vakuum stattfanden, ist die Messung nach drei Monaten in dem Aufbau für die Mikrofon-/Pentanmessung durchgeführt worden. Zusätzlich wurde der Halter 14, im Unterschied zur Messung vor und nach der Durchflussmessung, bei der Messung nach 80

Tagen etwas schwächer an den Flansch geschraubt. In den Ergebnissen zeigt sich, dass die Einflüsse der Zeit ohne Betrieb, des Vakuums sowie der Verschraubung auf das Scheinwiderstandsspektrum vernachlässigbar sind.

### 3.3 Die Mikrofonmessung

Ein weiterer Test zur Beobachtung des Schwingungsverhaltens sowie zur Bestimmung der Resonanzfrequenzen ist die Mikrofonmessung. Ziel ist es, nicht nur die Eigenschaft des Piezoaktors, sondern die Übertragung der Schwingung auf das gesamte Piezo-Halter-System und damit den direkten Einfluss auf die Dropletentstehung zu untersuchen. Dazu kann zum einen die Gesamtleistung eines Mikrofonsignals aufgenommen und zum anderen desselben Signal durch eine schnelle Fouriertransformation analysiert werden.

#### 3.3.1 Der Aufbau der Mikrofonmessung

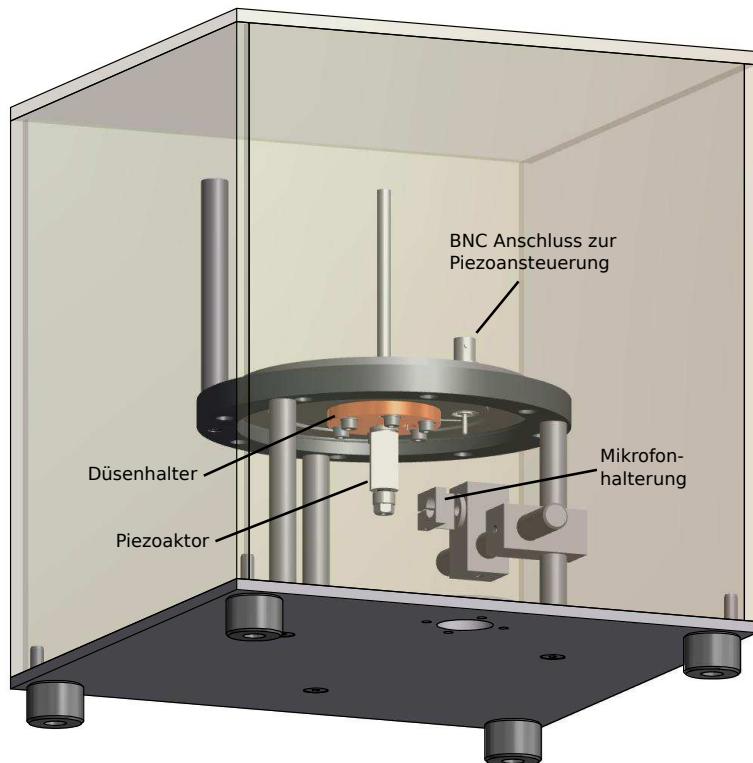


Abbildung 3.3.1: Aufbau zur Mikrofonmessung nach C. Husmann. Zu sehen ist die Halterung für den Flansch auf drei Füßen. Die mit dem Düsenhalter am Flansch verschraubte Düse zeigt mit der Düsenöffnung nach unten und ist vom Piezoaktor umgeben. Auf der Höhe der Düse befindet sich das Mikrofon, dass mit einer Halterung an einem der Füße angebracht ist. Zum Schutz vor äußeren Einflüssen befindet sich der gesamte Aufbau unter einer Plexiglashaube [Hus12].

Bei der Mikrofonmessung wird der Aufbau aus Abbildung 3.3.1 verwendet. Der Düsenhalter wird auf der Seite eines Flansches mit passender Bohrung angeschraubt und das Kabelende der Piezoansteuerung mit dem Ende einer Kabeldurchführung verlötet, die durch den Flansch führt. Dadurch kann an der dem Düsenhalter gegenüberliegenden Seite der Piezoaktor über einen BNC-Anschluss angesteuert werden. Der Flansch befindet sich kopfüber, mit der Düsen spitze nach unten zeigend in einer Halterung, die wiederum auf drei Füßen steht. Mit einem Mikrofon, das an einem der Füße

befestigt ist, kann an verschiedenen Stellen der Düse die Schwingung des Systems gemessen werden. Es handelt sich hier um ein Elektretmikrofon, das im Grunde aus einer leitenden Membran und einer dahinterliegenden Metallplatte besteht, die zusammen die Platten eines Kondensators bilden. Schwingt nun die Membran, verändert sich der Abstand der Kondensatorplatten und damit die Kapazität [MieoJ]. Der Spannungsunterschied wird als Signal über einen BNC-Anschluss ausgegeben. Um den Einfluss der Hintergrundgeräusche so gering wie möglich zu halten, befindet sich der Aufbau unter einer Plexiglashaube. Zudem wird ein Hochpassfilter verwendet, der die Geräusche unter 20000 Hz ausfiltert. Allerdings ist das Mikrofon für einen hörbaren Frequenzbereich  $< 20000$  Hz entwickelt worden, sodass für den verwendeten Frequenzbereich von 20000 Hz bis 120000 Hz das Signal verstärkt werden muss. Zu berücksichtigen ist, dass der Verstärker das Signal bis maximal 3 V verstärkt und damit das Signal begrenzt.

Die Amplitude und die Frequenz der Wechselspannung wird hier wie bei der Scheinwiderstandsmessung von dem LabVIEW Programm an den Frequenzgenerator vorgegeben, sodass das Mikrofonsignal in Abhängigkeit von der Frequenz aufgenommen werden kann.

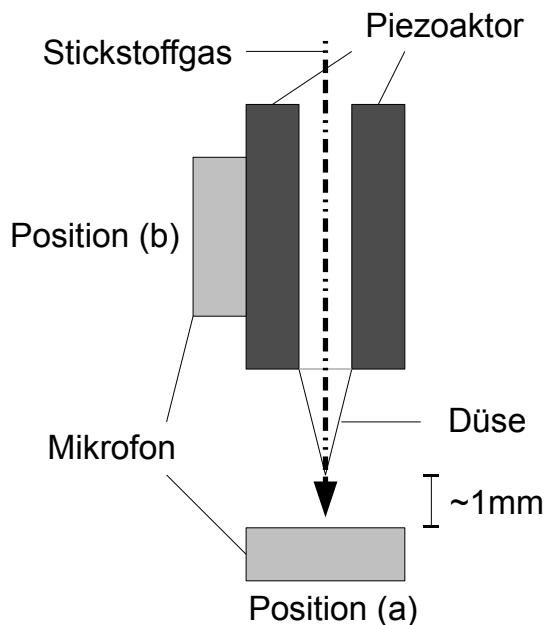


Abbildung 3.3.2: Positionen des Mikrofons. Für die Messung des Amplitudenspektrums wird die Position (a) ungefähr 1 mm unterhalb der Düse und für die Messung des Leistungsspektrums wird die Position direkt an dem Piezoaktor (b) verwendet.

Im Zuge dieser Arbeit ist der Aufbau für die neu entwickelten Messungen verändert worden. Die drei Füße zum Flansch sind verlängert worden, sodass das Mikrofon auch unter der Düse justiert werden kann. Zudem ist von oben durch die Plexiglashaube ein Zugang zu einer Stickstoffflasche verlegt worden. Da bisher die Schwingung der Raumluft um die Düse bzw. die direkte Schwingung der Düse gemessen wurde, war das Ziel des Umbaus, zu untersuchen, ob die Schwingung des durch die Glasdüse geleiteten Stickstoffgases eine andere Eigenschaft aufweist.

Zur Untersuchung der Düsenschwingung werden neben den Gesamtleistungen in den Amplitudenspektrien die frequenzabhängigen Leistungsspektren untersucht. Für die Aufnahme des Amplitudenspektrums befindet sich das Mikrofon ungefähr 1 mm unterhalb des Düsenausgangs, da dort der Gasstrom am besten gemessen werden kann. Für die Aufnahme des Leistungsspektrums wird eine Position des Mikrofons gewählt, bei der ein direkter Kontakt mit dem Piezoaktor besteht (vgl. Abbildung 3.3.2).

### 3.3.2 Die Datenaufnahme der Mikrofonmessung

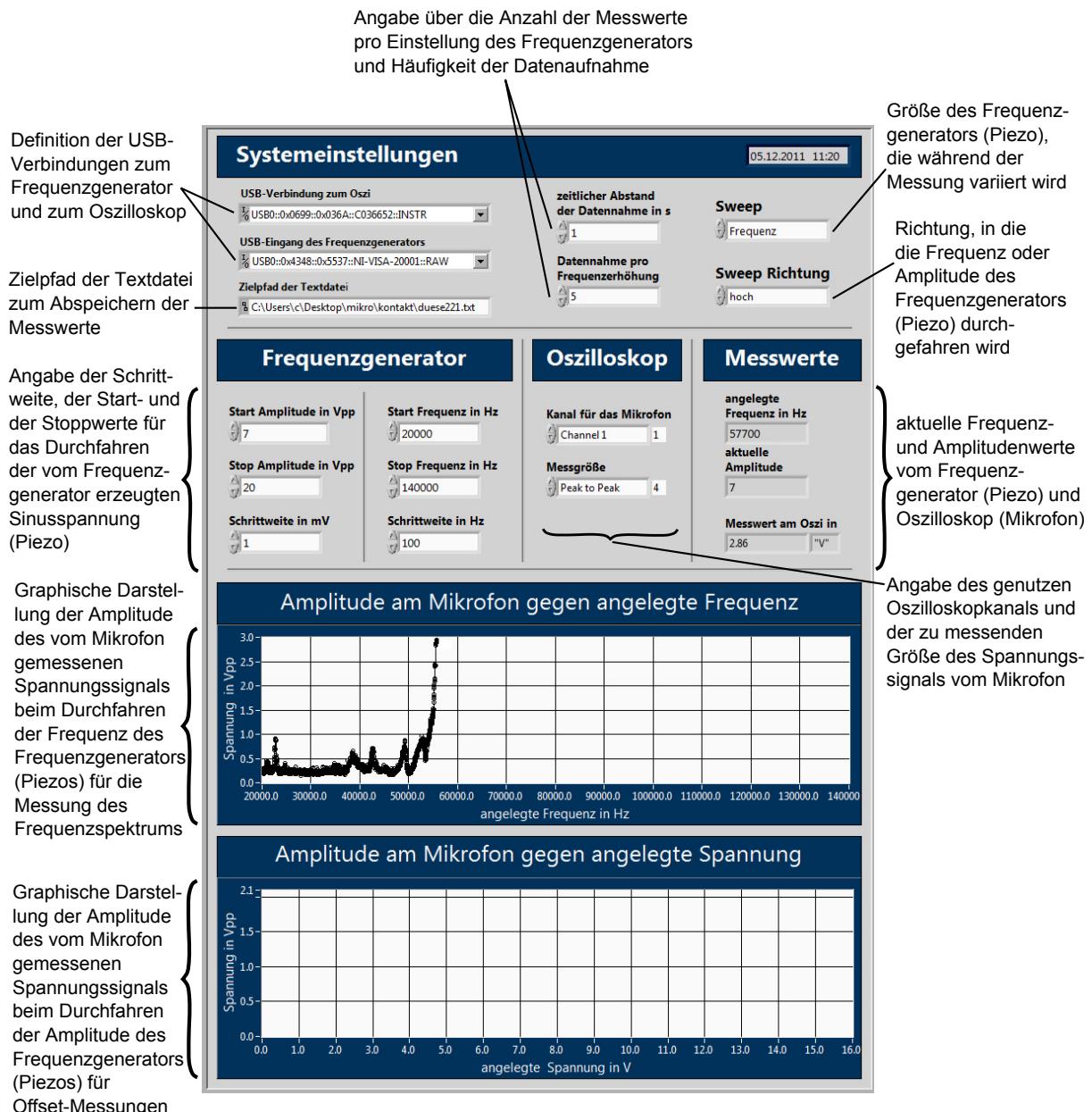


Abbildung 3.3.3: Frontpanel des LabVIEW-Programms zur Aufnahme eines Amplitudenspektrums. Um das Frontpanel sind die Erklärungen zu den einzelnen Funktionen des Programms. Die Funktion, die Amplitude gegen die angelegte Spannung zu messen, wurde im Zuge dieser Arbeit nicht verwendet [Hus12].

Das LabVIEW-Programm in Abbildung 3.3.3 steuert den Frequenzgenerator, der den Piezoaktor zu Schwingung anregt. Das vom Mikrofon gemessene Signal wird verstärkt und vom Oszilloskop aufgenommen. Bei der ursprünglichen Methode bestimmt das LabVIEW Programm die Amplitude des Signals und gibt sie in Abhängigkeit von der Frequenz als Textdatei aus. Die Anzahl an Messungen pro Frequenz kann mit dem LabVIEW-Programm eingestellt werden und liegt in der Regel bei fünf Messungen. Ein auf C++ basierendes Programm berechnet aus der Textdatei die mittlere Amplitude pro Frequenz, und gibt diese in Form eines Amplitudenspektrums aus. Die Unsicherheit ergibt sich aus der Standardabweichung der einzelnen Messungen.

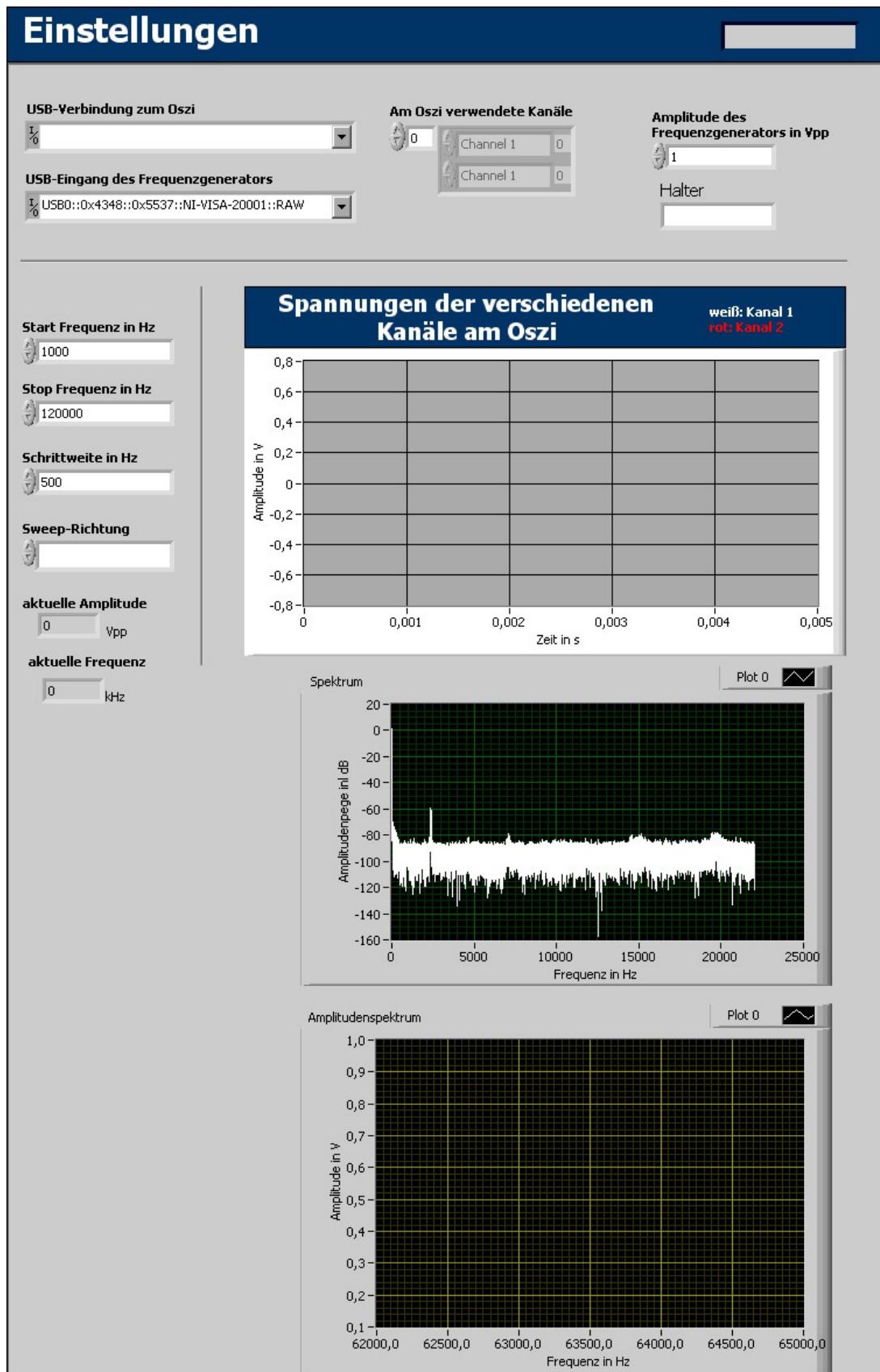


Abbildung 3.3.4: Frontpanel des LabVIEW Programms zur Aufnahme eines Leistungsspektrums. Oben und links können die Einstellungen für den Frequenzgenerator vorgegeben werden. In dem oberen Graphen wird das Spannungssignal, in dem mittleren das aktuelle Leistungsspektrum und im unteren das Amplitudenspektrum angezeigt.

Zur Beobachtung von Oberwellen wird ein anderes LabVIEW-Programm verwendet (vgl. Abbildung 3.3.4). Dieses steuert ebenfalls den Frequenzgenerator an und nimmt das Mikrofonsignal über das Oszilloskop auf. Neben der Ausgabe der Gesamtleistung, wird das Signal durch eine schnelle Fouriertransformation (FFT) analysiert. Ein Express-VI berechnet dabei das Leistungsspektrum durch [Nat11]

$$S(f) = \frac{|X(f)|^2}{n^2}. \quad (3.3.1)$$

Hier ist

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i \frac{2\pi n f}{N}} \quad (3.3.2)$$

die schnelle Fouriertransformation des Eingangssignals  $x_n$ . Über einen Zeitraum von 500  $\mu\text{s}$  werden  $N = 2500$  Spannungswerte von dem Signal  $x(t)$  gemessen. Für eine korrekte Rekonstruktion des Signals bis zu einer maximalen Frequenz von 250 kHz muss nach dem Nyquist-Abtasttheorem das Oszilloskop mit einer Abtastrate von  $f_{\text{Abtast}} = 500$  kHz betrieben werden [TekoJ]. Insgesamt ergibt sich im Leistungsspektrum ein Frequenzabstand von

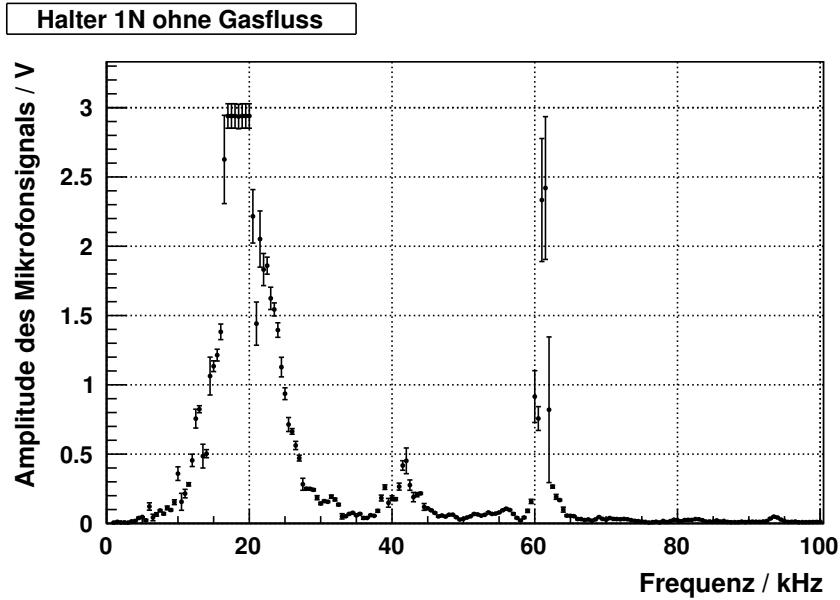
$$\Delta f_{\text{Leistungsspektrum}} = \frac{f_{\text{Abtast}}}{N} = 200 \text{ Hz}. \quad (3.3.3)$$

Bei verschiedenen Frequenzen der angelegten Wechselspannung wird jeweils ein Leistungsspektrum aufgenommen und als Textdatei ausgegeben. Ein auf C++ basierendes Programm stellt die Messwerte in einem 3D-Plot mit zusätzlichem 2D-Contour-Plot an der Oberseite dar.

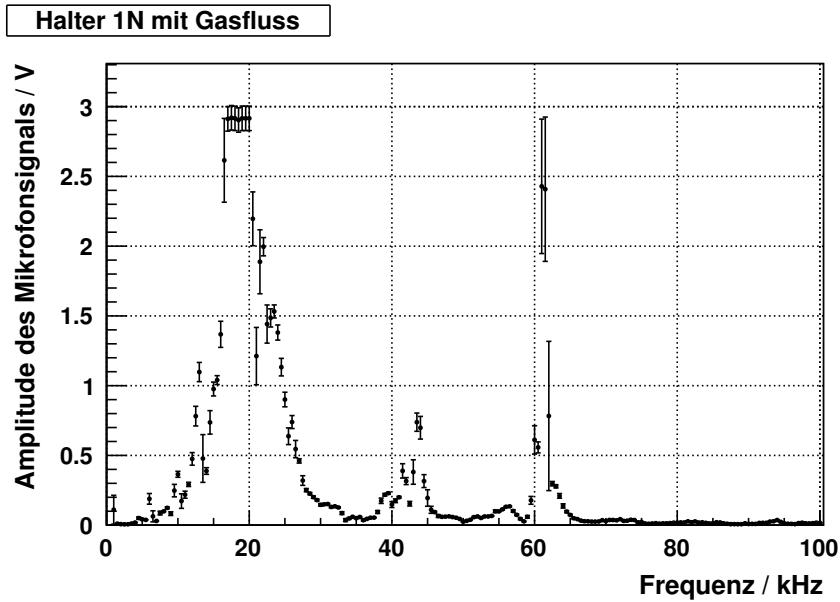
### 3.3.3 Die Ergebnisse der Mikrofonmessung

Die Abbildung 3.3.5 zeigt zwei Amplitudenspektren, die durch die Mikrofonmessung des Halters 1N bei einer Schrittweite von  $\Delta f = 500$  Hz aufgenommen wurden. Während die Messung in Abbildung 3.3.5a ohne Gasfluss stattfand und so nur die Schwingung der Raumluft, die die Düse umgab, gemessen wurde, nahm das Mikrofon bei der Messung in Abbildung 3.3.5b mit Gasfluss die Schwingung des austretenden Stickstoffgases auf.

Bei beiden Messungen sind drei Peaks zu erkennen, die schon durch die Scheinwiderstandsmessung als Resonanzfrequenzen identifiziert werden konnten. Allerdings findet sich die deutliche Resonanz aus den Scheinwiderstandsspektren bei 100 kHz nicht im Amplitudenspektrum wieder. Da das Mikrofon für den hörbaren Frequenzbereich  $< 20000$  Hz entwickelt wurde, ist nicht bekannt, wie sich die Sensitivität bei höheren Frequenzen verhält. Eine Möglichkeit wäre, dass diese oberhalb einer bestimmten Frequenz abrupt abnimmt und bei der Resonanzfrequenz bei 100 kHz kaum noch Schwingungen gemessen werden.



(a) Amplitudenspektrum von Halter 1N ohne Gasfluss.



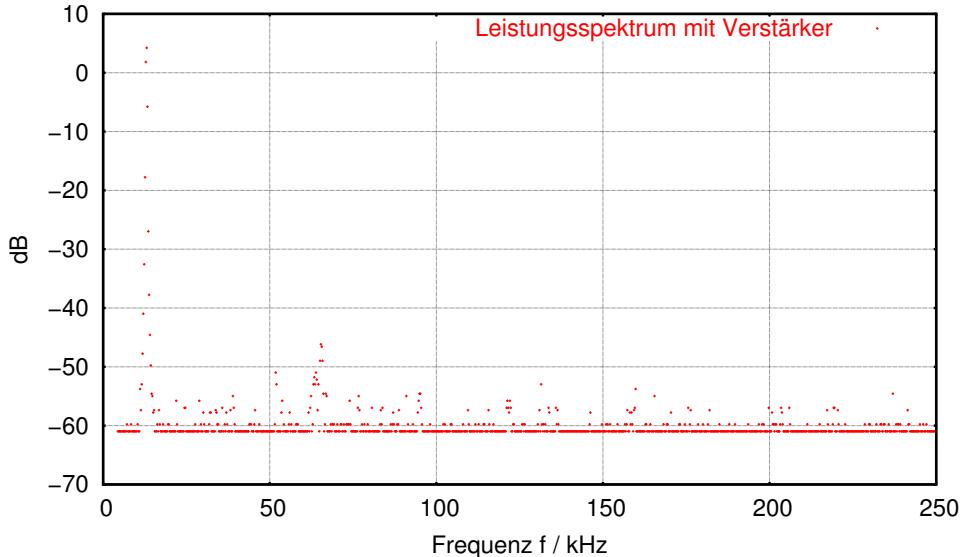
(b) Amplitudenspektrum von Halter 1N mit Gasfluss.

Abbildung 3.3.5: Vergleich der Amplitudenspektren der Mikrofonmessung mit und ohne Gasfluss bei einer Schrittweite von  $\Delta f = 500$  Hz.

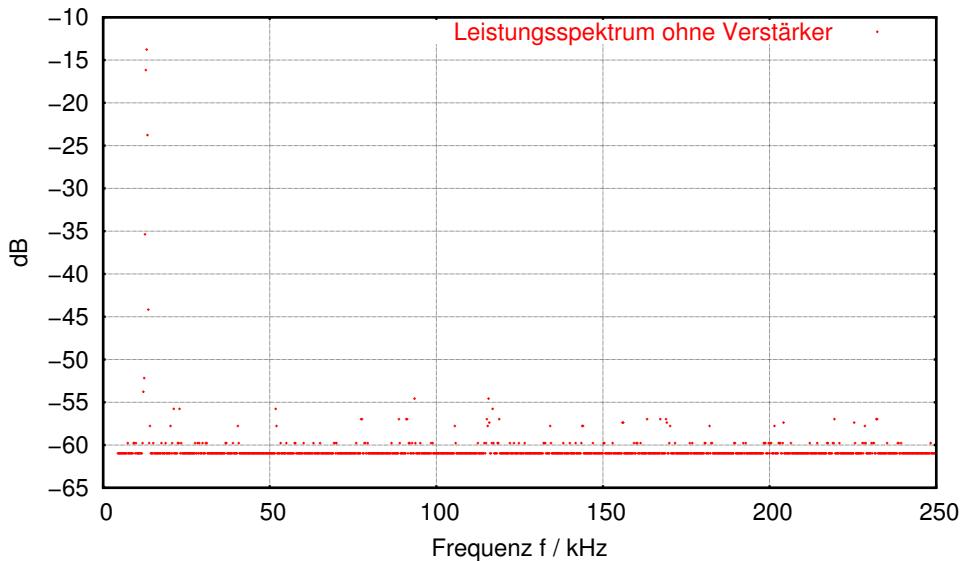
Bei der Frequenz  $f_1 \approx 18$  kHz, die mit der ersten Resonanz aus der Scheinwiderstandsmessung übereinstimmt, übersteuert der Verstärker aufgrund der hohen Eingangsspannung. Durch das resultierende Clipping bildet sich ein Plateau bei 3 V.

Der Peak, der ohne Gasfluss bei einer Frequenz von  $f_2 = 42$  kHz liegt, liegt mit Gasfluss bei einer Frequenz von  $f_2 = 43,5$  kHz. Er entspricht der zweiten Resonanz aus dem Scheinwiderstandsspektrum. Die Peakpositionen stimmen im Rahmen der Messunsicherheit überein, die sich aus der Peakbreite von ungefähr 3 kHz ergibt.

Der Peak bei einer Frequenz von  $f_3 = 60$  kHz entspricht der dritten Resonanz aus dem Scheinwiderstandsspektrum, während der Peak bei  $f = 61,5$  kHz mit einem Maximum von fast 3 V keine Resonanz des Piezoaktors, sondern des Verstärkers darstellt (vgl. Abbildung 3.3.6).



(a) Leistungsspektrum mit Verstärker.



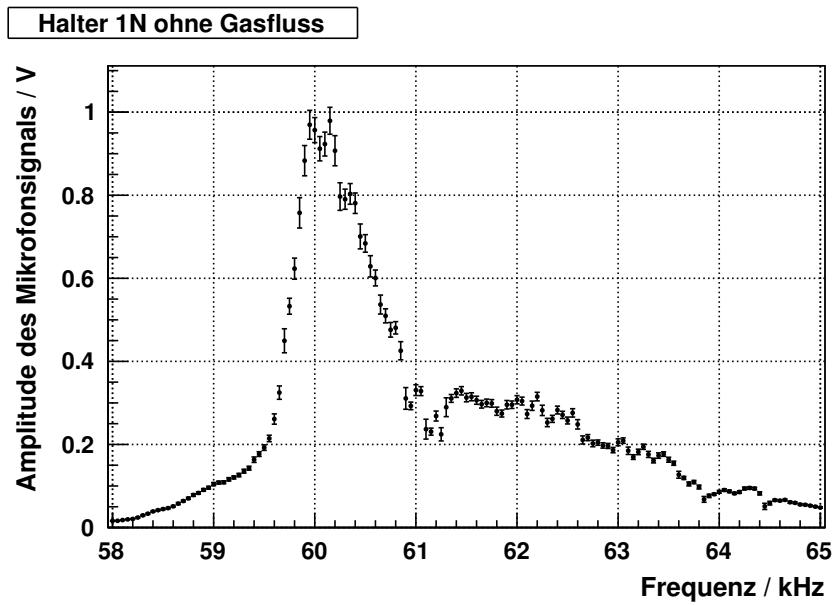
(b) Leistungsspektrum ohne Verstärker.

Abbildung 3.3.6: Vergleich eines Leistungsspektrums mit und ohne Verstärker. Das analysierte Signal hat eine Frequenz von 13 kHz. Mit Verstärker zeigt sich bei einer Frequenz von ungefähr 62 kHz ein Peak.

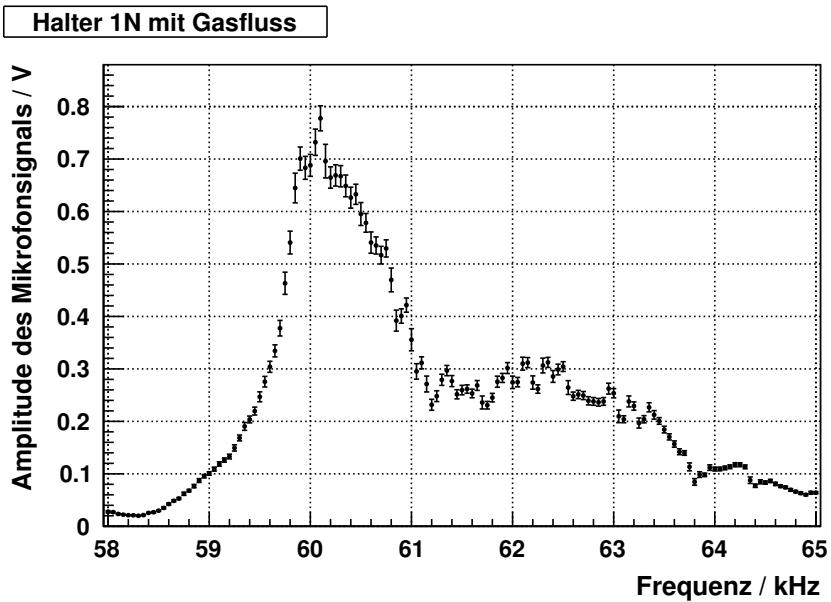
Der Peak erscheint, wenn der Verstärker verwendet wird und bleibt für alle Frequenzen stabil. In Abbildung 3.3.7 ist der Bereich um den Peak bei  $f_3 = 60$  kHz mit einer Schrittweite von 50 Hz untersucht worden. Zu erkennen ist, dass der Peak nicht direkt auf Höhe des Untergrunds abfällt. Zudem sinkt die Gesamtleistung im Amplitudenspektrum langsamer, als der Scheinwiderstand im Scheinwiderstandsspektrum in Abbildung A.1.5a steigt. Der Düsenhalter schwingt demnach noch bei einer Frequenz oberhalb der Antiresonanzfrequenz aus dem Scheinwiderstandsspektrum.

Ein Unterschied zwischen der Messung mit Gasfluss und der Messung ohne Gasfluss liegt in den Werten der Peakmaxima. Bei dem Vergleich der Messung mit einer Schrittweite von  $\Delta f = 500$  Hz in Abbildung 3.3.5 fällt Folgendes auf: Bei der Messung mit Gasfluss liegt das Peakmaximum an der Stelle  $f_2 = 43,5$  kHz bei  $0,74 \pm 0,12$  V, während das Peakmaximum bei der Messung ohne Gasfluss an der Stelle  $f_2 = 42$  kHz bei  $0,45 \pm 0,18$  V liegt (vgl. Abbildung 3.3.5). Damit ist das Peakmaximum

bei der Messung mit Gasfluss deutlich größer als das Maximum bei der Messung ohne Gasfluss. Bei dem Vergleich der Messungen mit einer Schrittweite von 50 Hz in Abbildung 3.3.7 ist dagegen zu erkennen, dass das Peakmaximum bei der Messung mit Gasfluss bei  $0,78 \pm 0,01$  V und das Peakmaximum bei der Messung ohne Gasfluss bei  $0,98 \pm 0,03$  V liegt. Insgesamt unterliegen die Messungen großen Schwankungen, sodass die Mikrofonmessung mit Gasfluss im Ergebnis keinen Vorteil gegenüber der bisherigen Messung ohne Gasfluss bietet.



(a) Amplitudenspektrum von Halter 1N ohne Gasfluss.



(b) Amplitudenspektrum von Halter 1N mit Gasfluss.

Abbildung 3.3.7: Vergleich der Amplitudenspektren in der Nähe des Peaks bei 60 kHz mit einer Schrittweite von  $\Delta f = 50$  Hz. Das Mikrofon befand sich bei der Aufnahme in einem Abstand von ungefähr 1 mm unterhalb der Düse.

### 3.3.4 Die Ergebnisse der schnellen Fouriertransformation

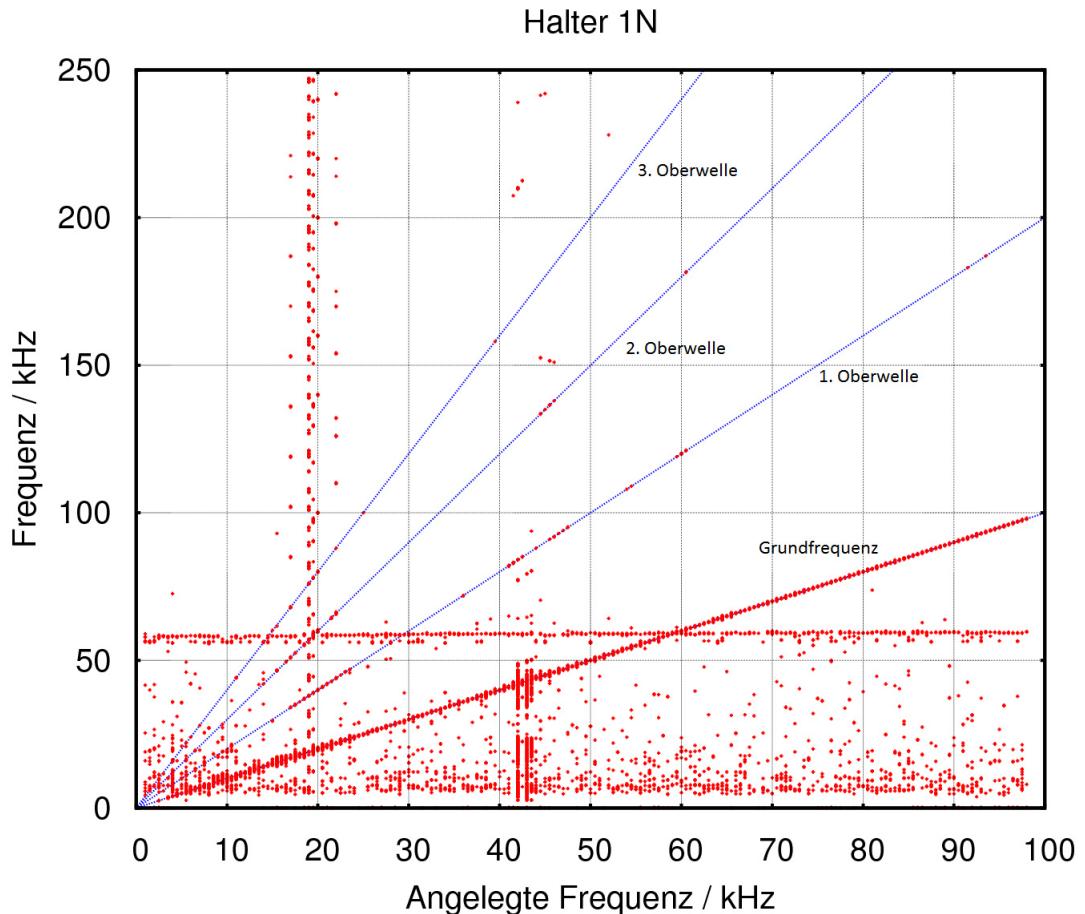
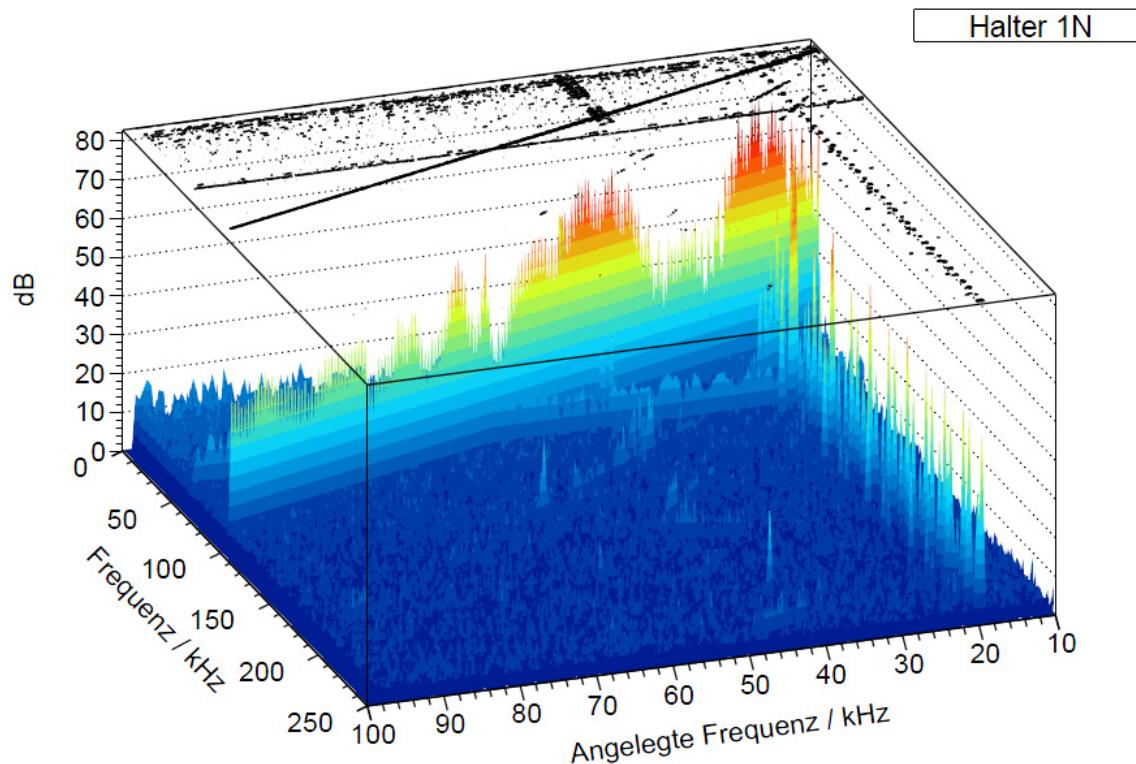
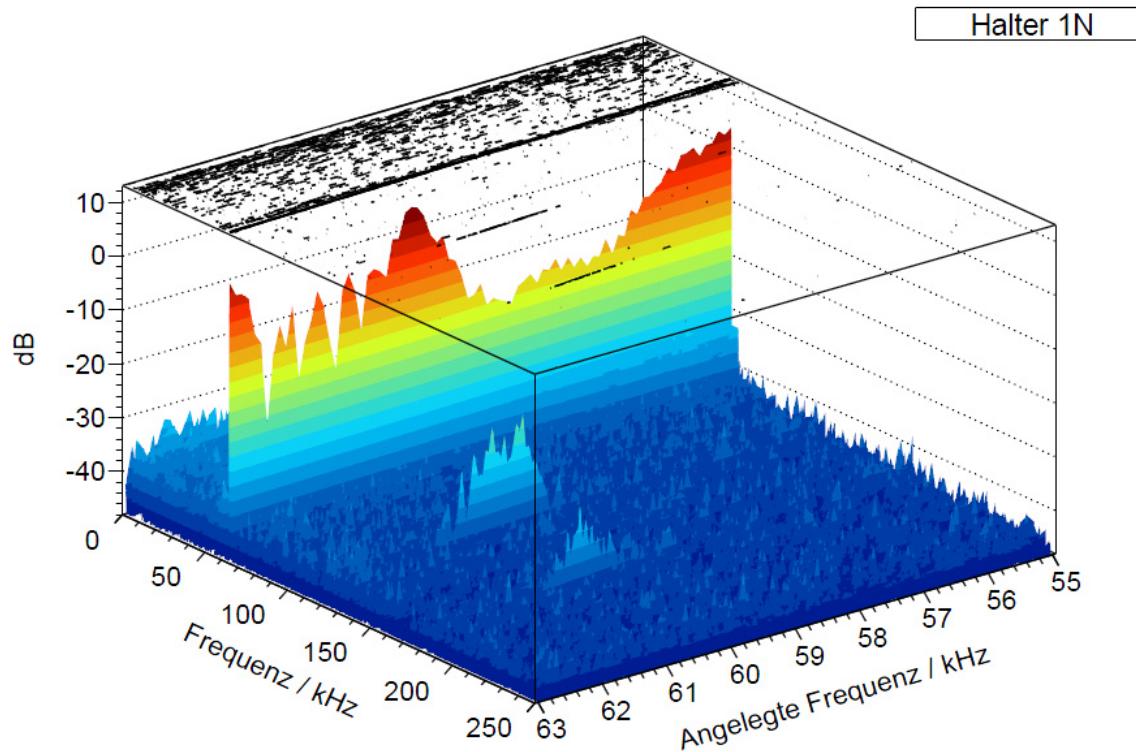


Abbildung 3.3.8: Leistungsspektrum gegen die angelegte Frequenz von Halter 1N bei einer Schrittweite von  $\Delta f = 500$  Hz. Es sind alle Leistungen  $> -37$  dB angezeigt. Zudem sind Linien eingezeichnet, auf denen Oberwellen zu erwarten sind. Die Leistungen bei einer angelegten Frequenz von  $f \approx 19$  kHz ist eine Folge des verwendeten Hochpassfilters. Die gemessenen niedrigen Frequenzen im Leistungsspektrum sind auf Hintergrundgeräusche zurückzuführen. Die Quelle der durchgängigen Frequenz von ungefähr 61 kHz entspricht der Resonanzfrequenz des Verstärkers.



(a) Leistungsspektrum von Halter 1N. Zur Übersichtlichkeit sind die Werte mit 48 dB addiert und das Minimum auf 0 dB gesetzt worden.



(b) Leistungsspektrum von Halter 1N im Bereich von 60 kHz. Zur Übersichtlichkeit ist das Minimum auf -48 dB gesetzt worden.

Abbildung 3.3.9: Leistungsspektren von Halter 1N mit Contour-Plot an der Oberseite. Das Mikrofon befand sich bei der Aufnahme in Kontakt mit dem Piezoaktor.

Die Ergebnisse der schnellen Fouriertransformation sind für Halter 1N in Abbildung 3.3.9 und für Halter 4N in Abbildung A.2.1 im Anhang dargestellt. Zur leichtenen Beschreibung sind die Messwerte von Halter 1N, die über  $-37$  dB liegen, zusätzlich in Abbildung 3.3.8 dargestellt. Diese Darstellung findet sich ebenfalls in Form eines jeweiligen Contour-Plots auf der Oberseite der Abbildungen 3.3.9 und A.2.1 wieder.

Im weiteren bezeichnet der Begriff *Frequenz* eine Frequenz im Leistungsspektrum. Eine Frequenz, die der Frequenzgenerator vorgibt, wird als *angelegte Frequenz* bezeichnet.

Bei der Frequenz, die mit der angelegten Frequenz identisch ist, handelt es sich um die sogenannte Grundfrequenz. Sie hebt sich in allen Abbildungen deutlich von dem Untergrund ab. Zudem sind die Oberwellen, die auf einem ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz liegen, mindestens bis zur zweiten Ordnung zu erkennen. Die Strukturen bei einer angelegten Frequenz von ungefähr 19 kHz entsprechen Artefakte, die auf den Hochpassfilter zurückzuführen sind. Zudem sind trotz Plexiglashaube Hintergrundgeräusche aufgenommen worden. Sie erscheinen in den Abbildungen in einem Bereich niedriger Frequenzen, haben bei ungefähr 10 kHz ihr Maximum und fallen bis 60 kHz stark ab. Die Quelle der gemessenen Frequenz von ungefähr 60 kHz liegt ebenfalls im Verstärker, der, wie im Amplitudenspektrum in Abbildung 3.3.5 zu erkennen ist, in seiner Resonanzfrequenz schwingt. Die Frequenz erstreckt sich über das gesamte Spektrum der angelegten Frequenz.

Die Erfahrung am Pellettarget zeigt, dass sich Droplets im Bereich der Resonanzfrequenzen bilden. Die Vermutung, dass die Oberwellen verstärkt auftauchen, wenn die angelegte Frequenz einer Resonanzfrequenz aus dem Scheinwiderstandsspektrum entspricht (vgl. Abbildung A.1.5a und A.1.6 im Anhang), kann nicht bestätigt werden. Besonders in Abbildung A.2.1 im Anhang zeigt sich, dass sich die Oberwellen nahezu über das gesamte Spektrum der angelegten Frequenz erstrecken und sich nur schwach vom Untergrund unterscheiden. Damit dienen Oberwellen nicht als Nachweis für eine geeignete Arbeitsfrequenz.

# Kapitel 4

## Die Glasdüsen

Neben der Funktion der Piezoaktoren ist die Zuverlässigkeit der Glasdüsen wichtig, die im Düsenhalter installiert sind. Die Wahrscheinlichkeit für eine Blockierung der Düse, welche zur Unterbrechung des Target-Betriebs führt, wird durch einen Sinterfilter mit einer Porengröße von  $1 \mu\text{m}$  in der Glasdüse sowie durch einen Millipore-Filter und ein Metallsieb in der Öffnung der Kupferhalter-Basis verringert (vgl. Abschnitt 2.2.2.2).

Zudem werden die Glasdüsen in Jülich unter sorgfältiger Beachtung der Reinheit und mit Qualitätsprüfungen nach und zwischen den einzelnen Arbeitsschritten gefertigt. Zunächst wird dabei ein Sinterfilter in ein 140 mm langes und 3 mm dickes Glasrörchen eingeschmolzen. Danach wird das Glasrörchen durch einen Handbrenner eingeschnürt und an der Stelle mit dem gewünschten Innendurchmesser  $D_{nozzle}$  abgebrochen [Nor04]. Mit Mikroskopen und einer Durchlassprüfung mit Stickstoffgas wird die Glasdüse auf Schäden untersucht und ihr Düsendurchmesser bestimmt. Die letzte Prüfung der Düsendurchlässigkeit bietet die Durchflussmessung am Düsenteststand in Münster, die im Folgenden beschrieben wird.

Die Erfahrung am WASA Detektor zeigt, dass die Blockierung der Düsen innerhalb der ersten sieben Tage nach dem Einbau auftreten [Hus12]. Ist dies nicht der Fall, so arbeiten die Düsen über mehrere Wochen zuverlässig. Für die Prüfung der Düsendurchlässigkeit wird daher eine Messdauer von ungefähr zwei Wochen gewählt. Im Zuge der Arbeit von C. Husmann wurde zudem ein vierstufiger Plan entwickelt, mit dessen Hilfe die Ursache für die Blockierungen von Düsen erkannt werden kann. Dieser Plan sieht vor, die Belastung schrittweise zu erhöhen und den Bedingungen in Jülich anzupassen [Hus12]:

- Stufe 1: Durchflusstest mit Stickstoff bei Raumtemperatur ohne Piezobetrieb, um zu überprüfen, ob bereits der Gasstrom eine Blockierung auslösen kann.
- Stufe 2: Durchflussmessung mit Stickstoff bei Raumtemperatur mit Piezobetrieb, um zu überprüfen, ob der Piezoaktor eine Blockierung auslösen kann. Getestet wird, ob sich Material (zum Beispiel aus dem Sinterfilter) durch die mechanische Schwingung lösen kann und die Düse verstopft.
- Stufe 3: Durchflussmessung mit Stickstoff oder Wasserstoff bei niedrigen Temperaturen, um zu überprüfen, welchen Einfluss ein Temperaturunterschied hat. Der Test kann zusätzlich in Kombination mit dem Piezoaktor betrieben werden.
- Stufe 4: Durchflussmessung mit Stickstoff oder Wasserstoff unterhalb ihrer Siedetemperatur. Zusätzlich sollen mit Helium als Hintergrundgas Droplets erzeugt werden, sodass sämtliche Bedingungen in der Teststation mit denen im WASA Detektor übereinstimmen.

Stufe 1 und 2 wurden bereits von C. Husmann und F. Schepers durchgeführt und in dieser Arbeit fortgeführt. Zwar sind Stufe 3 und 4 am Aufbau zur Durchflussmessung noch nicht durchführbar, Droplets können allerdings an dem Aufbau zur Pentanmessung mit Düsenhaltern, die nicht mehr in Jülich verwendet werden können, gebildet und untersucht werden (vgl. Abschnitt 4.3).

## 4.1 Die Durchflussmessung



Abbildung 4.1.1: Foto vom Aufbau zur Durchflussmessung. Zu sehen ist die Stickstoffflasche (unten links), der Tisch mit dem Messaufbau (rechts) und die Drehschieberpumpe unter dem Tisch (unten rechts). Auf dem Tisch sind um die Vakuumkammer, in der sich die Düse befindet, die Messinstrumente (Baratron, Ionivac, Durchflusszähler), die die Eigenschaften des Stickstoffs messen, installiert.

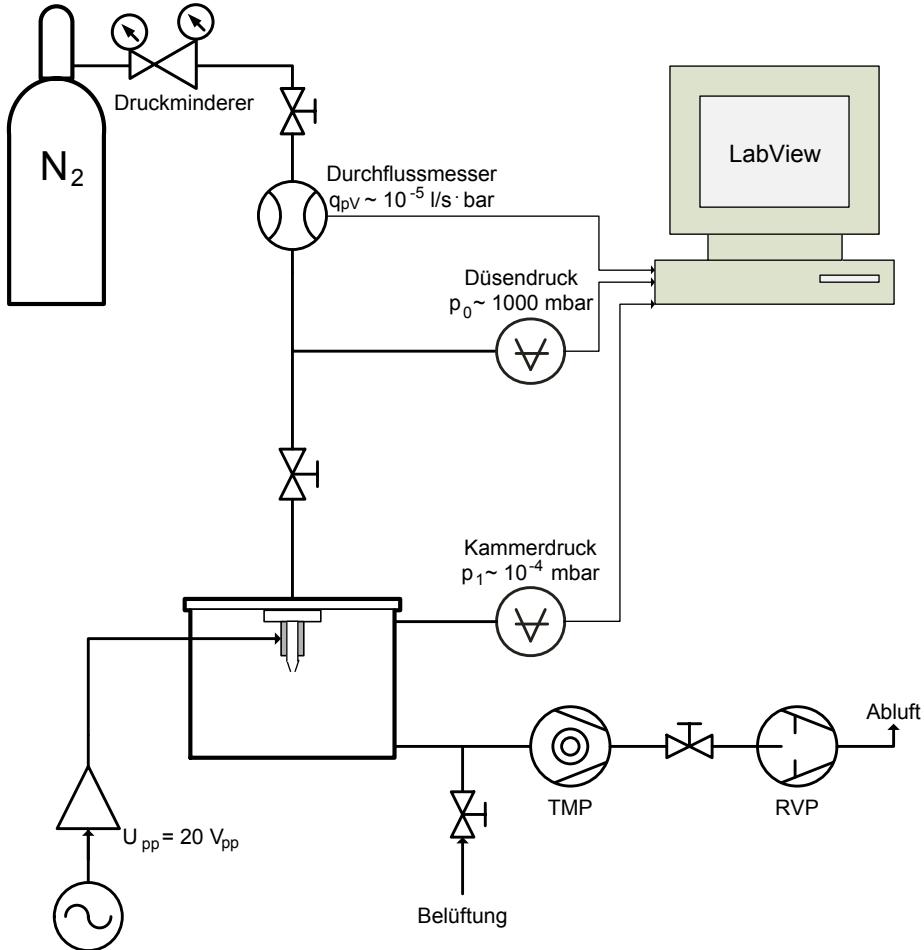


Abbildung 4.1.2: Pneumatischer Schaltkreis des Düsenteststands zur Prüfung der Düsendurchlässigkeit. Oben links ist die Stickstoffflasche, aus der Stickstoff über den Druckminderer und den Durchflussmesser und in die Vakuumkammer geleitet wird. In der Vakuumkammer befindet sich die Düse. Der Piezoaktor wird mit  $20 \text{ V}_{pp}$  von dem Frequenzgenerator angesteuert. Vor der Düse wird der Düsendruck mit einem Baratron und nach der Düse der Kammerdruck mit einem Ionivac gemessen. Unten rechts sind die Turbomolekularpumpe (TMP) und die Drehschieberpumpe (RVP), die die Vakuumkammer evakuieren [Hus12].

In Abbildung 4.1.2 ist der Aufbau zur Messung des Durchflusses gezeigt. Der Düsenhalter wird an dem Flansch befestigt, der schon in der Mikrofonmessung verwendet wurde (vgl. Abschnitt 3.3). Der Flansch schließt kopfüber, mit der Düsen spitze nach unten zeigend, eine Vakuumkammer ab. Der Druck in der Vakuumkammer wird zunächst mit einer Drehschieberpumpe (RVP) auf ein Vorvakuum mit ungefähr  $1 \cdot 10^{-2}$  bar und dann mit einer Turbomolekularpumpe (TMP) auf  $1 \cdot 10^{-6}$  bar reduziert. Während der Durchflussmessung wird Stickstoff aus einer Stickstoffflasche mit ungefähr 1 bar durch die Düse geleitet, sodass der resultierende Druck in der Vakuumkammer bei etwa  $1 \cdot 10^{-4}$  bar liegt. Dabei wird zwischen der Gasflasche und der Düse der Düsendruck  $p_D$  mit dem *Baratron 102A* von MKS Instruments bestimmt:

Bei einem Baratron bilden eine leitende Membran und eine Metallplatte die zwei Platten eines Kondensators. Ändert sich der Außendruck bei konstantem Innendruck, verformt sich die Membran und der Plattenabstand verändert sich. Der damit einhergehende Kapazitätsunterschied kann als Spannungsänderung gemessen werden [WAW82].

Zwischen Düse und Turbomolekularpumpe wird der Kammerdruck  $p_K$  mit dem Ionisationsvakuummeter *Ionivac ITR 200* von Oerlikon Leybold Vacuum gemessen:

Bei einem Ionisationsvakuummeter werden Elektronen in einem elektrischen Feld so stark beschleunigt, dass ihre Energie ausreicht die Gasatome zu ionisieren. Die positiv geladenen Gasionen geben an einem Kollektor ihre Ladung ab und erzeugen so einen Strom, der proportional mit der Gasdichte und damit mit dem äußeren Druck steigt [WAW82].

Zusätzlich wird zwischen Gasflasche und Düse der pV-Durchfluss  $q_{pV} = p\dot{V}$  mit dem thermischen Durchflusszähler *Smart Mass Flow 5850 S* von Brooks Instrument ermittelt. Der Düsendurchmesser lässt sich mithilfe der Durchflussformel

$$q_{pV} = A_{min} \cdot p_D \cdot \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} \cdot \frac{R \cdot T}{M_{mol}}} \quad (4.1.1)$$

berechnen [WAW82]. Hierbei ist  $\kappa = 1,40$  der Adiabatenkoeffizient,  $R = 8,3144621 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$  die universelle Gaskonstante,  $T = 300 \text{ K}$  die Gastemperatur und  $M_{mol} = 0,028 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$  die molare Masse von Stickstoff bei Raumtemperatur [The07].  $A_{min} = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$  ist die minimale Querschnittsfläche, die Fläche am Düsenausgang mit dem Düsendurchmesser  $d$ . Da Schwankungen des Durchflusses unter anderem aus Schwankungen des Düsendrucks  $p_D$  folgen, ist ein besseres Kriterium zur Überwachung der Düsendurchlässigkeit der Wert des Düsendurchmessers. Aus der Gleichung (4.1.1) folgt für diesen

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{q_{pV}}{p_D \cdot \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} \cdot \frac{R \cdot T}{M_{mol}}}}}. \quad (4.1.2)$$

Statt des Durchflusses  $q_{pV}$  bietet es sich an, das Saugvermögen  $S = \frac{q_{pV}}{p_K}$  zu verwenden, da der Durchfluss nur langsam auf einen veränderten Düsendurchmesser reagiert [Sch13b]. Das effektive Saugvermögen der Turbopumpe ist aus vorangegangenen Messungen von C. Husmann zu  $S_{eff} = (6,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  bestimmt worden [Hus12]. Damit ergibt sich

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_{eff} \cdot p_K}{p_D \cdot \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} \cdot \frac{R \cdot T}{M_{mol}}}}}. \quad (4.1.3)$$

Die Durchflussmessung wird ungefähr eine Woche ohne und eine Woche mit Piezobetrieb durchgeführt, um zu untersuchen, ob die Schwingung des Piezoaktors die Blockierung der Düse beschleunigt. Die Arbeitsfrequenz sollte in der Nähe der Resonanzfrequenz liegen, sodass die Belastung möglichst groß ist. Um diese Frequenz zu ermitteln, wird vor dem Einsatz des Piezoaktors eine Scheinwiderstandsmessung nach Abschnitt 3.2.2 durchgeführt.

Damit die angelegte Frequenz mit der Resonanzfrequenz während der Messung übereinstimmt, wird im Rahmen dieser Arbeit ein automatischer Frequenzregler entwickelt und verwendet (vgl. Abschnitt 4.1.2).

### 4.1.1 Die Datenaufnahme der Mikrofonmessung

Der Düsendruck  $p_D$  wird mit einem Baratron, der Kammerdruck  $p_K$  mit einem Ionivac und der Durchfluss  $q_{pV}$  mit einem Durchflusszähler gemessen.

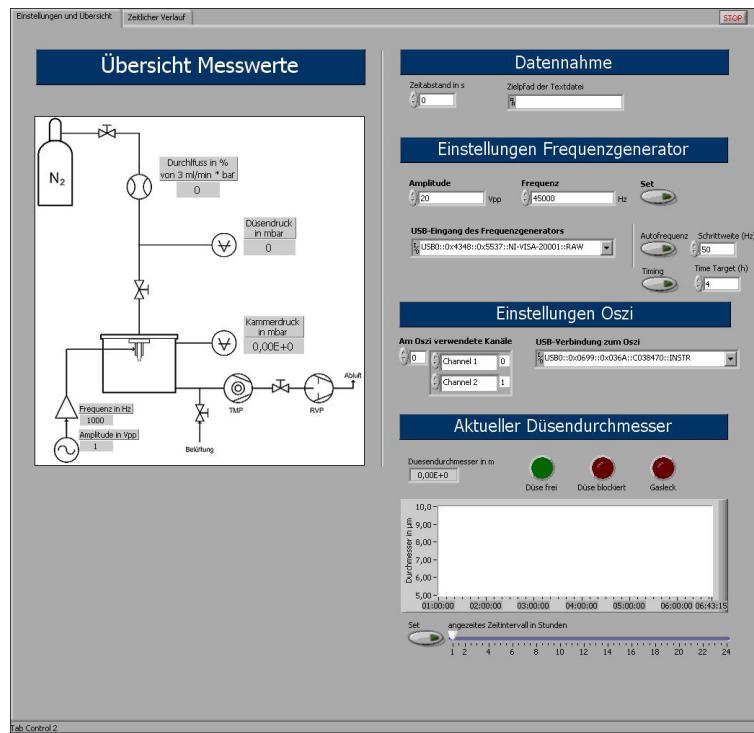
Für den angezeigten Düsendruck wird vom Hersteller MKS Instrument eine Unsicherheit von 0,5% angegeben [MKS96]. C. Husmann hat zudem die Korrektur  $p_D = (1,051 \pm 0,005) \times p_{Anzeige} - (20 \pm 1) \text{ mbar}$  ermittelt und erkannt, dass zum einen durch das Spannungsrauschen an der Messkarte eine Unsicherheit von 50 mbar und zum anderen durch die Digitalisierung eine Unsicherheit von 24 mbar auftreten [Hus12].

Für den Kammerdruck werden vom Hersteller Oerlikon Leybold Vacuum eine Messgenauigkeit von 15% und eine Wiederholbarkeit von 5% angegeben [Oer96].

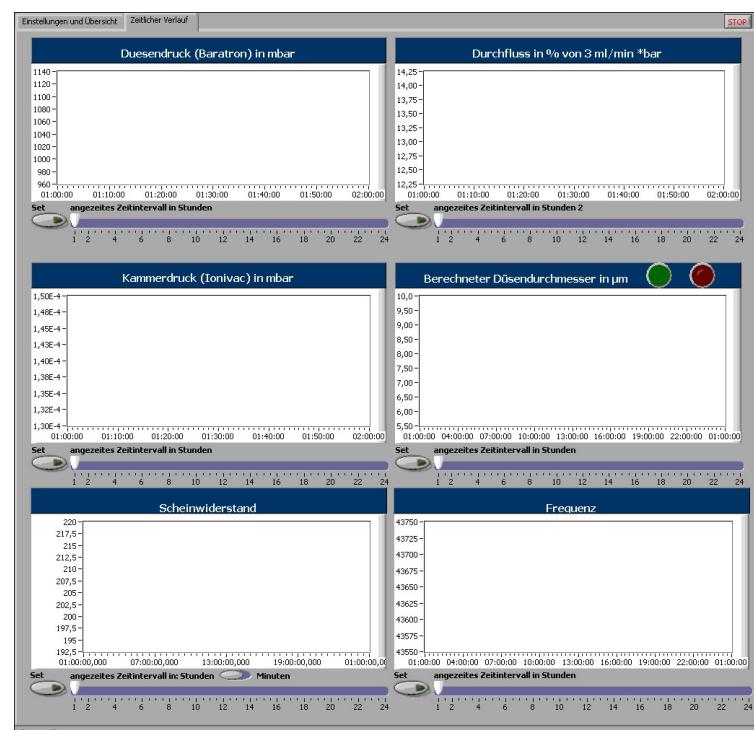
Für die eingestellte Frequenz des Frequenzgenerators *DDS 4055* von PeakTech wird eine Frequenzgenauigkeit von 50 ppm angegeben [Pea11].

In den Abbildungen der Durchflussmessungen 4.1.6a bis 4.1.10a im Anhang werden die Unsicherheiten für den Düsendurchmesser zu Gunsten der Übersichtlichkeit nicht angezeigt.

Nachdem die Messdaten für den Düsendruck und Durchfluss über einen Analog-Digital-Wandler digitalisiert werden, liest ein LabVIEW-Programm sämtliche Messdaten ein, korrigiert sie und gibt sie sowohl als Datei als auch auf dem Frontpanel aus (vgl. Abbildung 4.1.3). Der Düsendurchmesser wird nach Gleichung (4.1.3) berechnet und ebenfalls auf dem Frontpanel angezeigt und abgespeichert. Da die Strömungsverluste an der Innenwand der Düse nicht in Gleichung (4.1.3) eingehen, liegt der berechnete Düsendurchmesser unter dem optischen, durch das Mikroskop bestimmten, Durchmesser. Während der mit dem Mikroskop bestimmte Düsendurchmesser in der Regel bei ungefähr 13  $\mu\text{m}$  liegt, zeigen die Erfahrungen am Düsenteststand, dass die Düse bei einem gemessenen Düsendurchmesser zwischen 5,5  $\mu\text{m}$  und 11  $\mu\text{m}$  als frei gilt[Hus12]. Liegt der Durchmesser über diesen Bereich, liegt ein Gasleck vor. Liegt er unter diesem Bereich, ist die Düse verstopft. Hierbei sollte jedoch betont werden, dass die Grenzen des Bereichs auf Erfahrungswerten beruhen und Ausnahmen nicht ausgeschlossen werden können.



(a) Auf der linken Seite sind die aktuellen Messwerte des Baratrons, des Ionivacs und des Durchflusszählers angegeben. Der aus diesen Messwerten berechnete Düsendurchmesser wird im Graphen (unten rechts) gegen die Zeit aufgetragen. Dabei zeigen die darüberliegenden Signale an, ob sich der Düsendurchmesser innerhalb („Düse frei“), unterhalb („Düse blockiert“) oder oberhalb („Gasleck“) des Bereichs zwischen  $5,5 \mu\text{m}$  und  $11 \mu\text{m}$  befindet. Auf der rechten Seite ist die Ansteuerung des Oszilloskops und des Frequenzgenerators. Bei der Einstellung des Frequenzgenerators sind zudem bei Bedarf die Schrittweite und das Time-Target des automatischen Frequenzreglers (AFR) wählbar.



(b) Statt „Einstellungen und Übersicht“ kann an der linken Seite am oberen Rand das Fenster „Zeitlicher Verlauf“ geöffnet werden, in dem analog zum Graphen des Düsendurchmessers die weiteren Messwerte, Düsendruck, Durchfluss, Kammerdruck, Düsendurchmesser, Scheinwiderstand und Frequenz gegen die Zeit, aufgetragen werden.

Abbildung 4.1.3: Beide Fenster des Frontpanels vom LabVIEW Programm zur Messung des Düsen-durchmessers.

### 4.1.2 Der automatische Frequenzregler

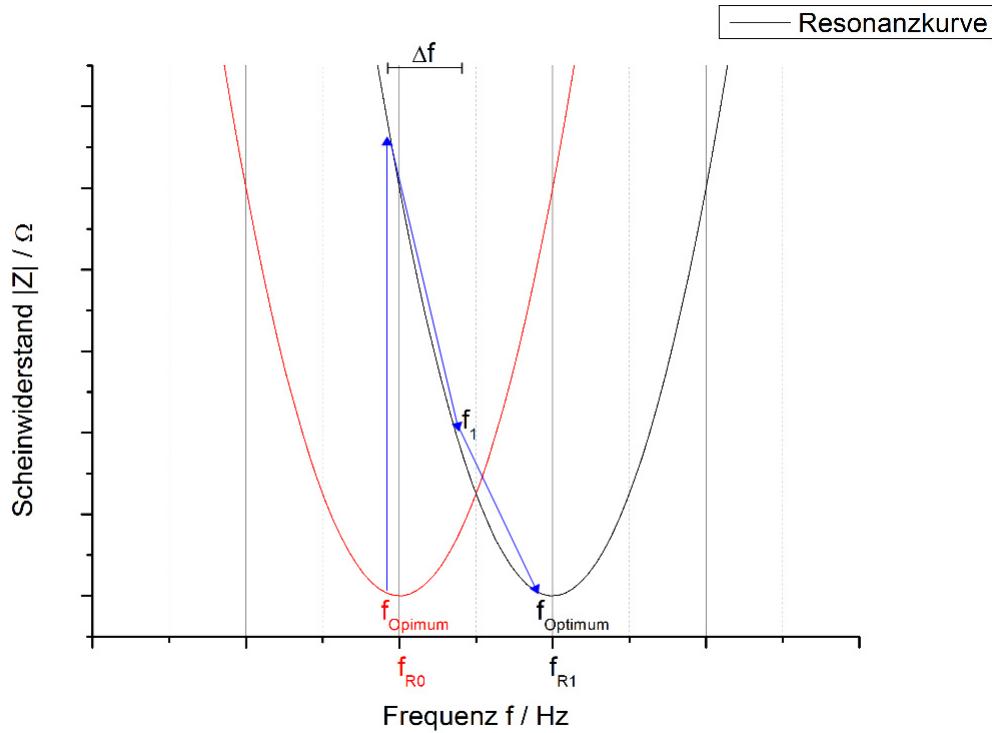


Abbildung 4.1.4: Schematische Funktion des automatischen Frequenzreglers (AFR): Zu Beginn wird  $f_{Optimum}$  (rot) als Arbeitsfrequenz in optimaler Nähe zur Resonanzfrequenz  $f_{R0}$  eingestellt. Durch Verschieben der Resonanzfrequenz von  $f_{R0}$  auf  $f_{R1}$  liegt  $f_{Optimum}$  (rot) nicht mehr in optimaler Nähe zur aktuellen Resonanzfrequenz  $f_{R1}$  und der Scheinwiderstand nimmt zu. Der AFR misst den Scheinwiderstand der benachbarten Frequenz  $f_1$  im Abstand  $\Delta f$  (in beide Richtungen) und nähert sich bis zur neuen optimalen Frequenz  $f_{Optimum}$  (schwarz) der aktuellen Resonanzfrequenz  $f_{R1}$  an.

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Programmteil integriert, der es ermöglicht, dass in einem wählbaren Abstand  $\Delta f$  in beide Richtungen zur momentan eingestellten Frequenz  $f_0$  der Scheinwiderstand wie in 3.2.3 beschrieben mit LabVIEW gemessen wird. Tritt der Fall ein, dass der über fünf Messungen gemittelte Scheinwiderstand bei der neuen Frequenz  $f_1 = f_0 \pm \Delta f$  geringer ist als bei der zuvor verwendeten Frequenz  $f_0$ , wird die zugehörige Frequenz  $f_1$  als neue Frequenz eingestellt. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis die optimale Frequenz  $f_{Optimum}$  gefunden wurde. Der Vorteil liegt darin, dass ein Wandern der Resonanzfrequenz nachverfolgt und ausgeglichen werden kann (vgl. Abbildung 4.1.4). Der *automatische Frequenzregler*, der im weiteren mit AFR abgekürzt wird, kann permanent oder periodisch nach einem Zeitintervall, das im weiteren mit *Time-Target* bezeichnet wird, wiederholt werden. LabVIEW gibt zudem die momentan eingestellte Frequenz und den Scheinwiderstand auf dem Frontpanel an (vgl. Abbildung 4.1.3).

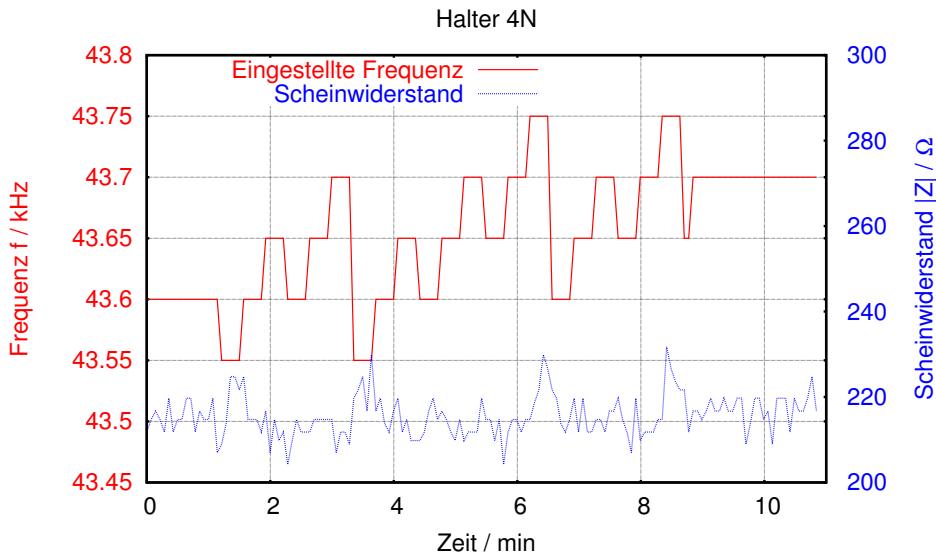


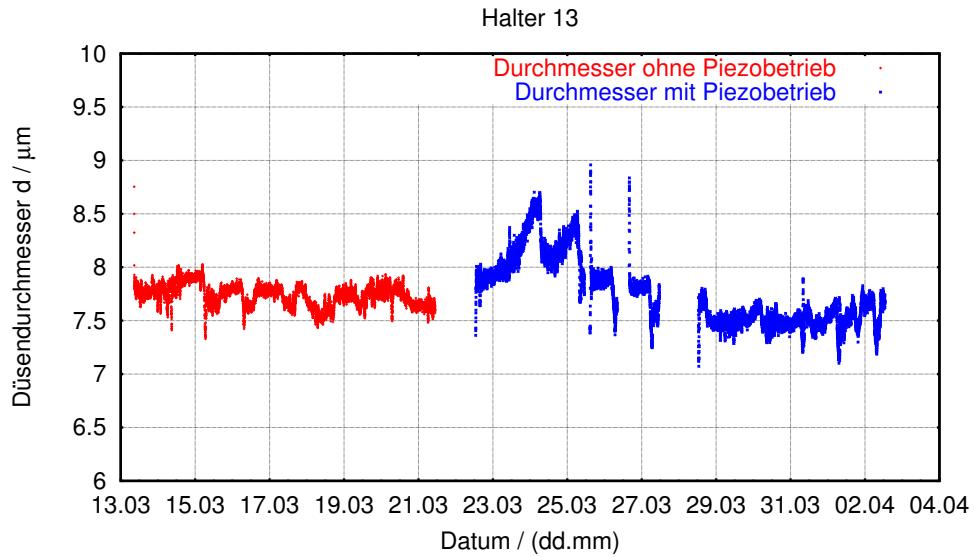
Abbildung 4.1.5: Elf minütiger Ausschnitt aus der Durchflussmessung von Halter 4N mit dem Verlauf der Frequenz und des Scheinwiderstands zur Verdeutlichung der Funktionsweise des AFR. Der AFR wechselt nach einem Time-Target von vier Stunden die eingestellte Frequenz von 43,6 kHz auf 43,7 kHz.

In Abbildung (4.1.5) wird die Funktionsweise des AFR beispielhaft für den Halter 14 deutlich. Diese Abbildung zeigt die Werte für die Frequenz und den Scheinwiderstand nach einem Time-Target von 4 Stunden. Zu Beginn liegt die ursprüngliche optimale Frequenz, die in Abbildung 4.1.4 mit  $f_{Optimum}$  (rot) bezeichnet wird, bei  $f_0 = 43,60$  kHz. Nach ungefähr einer Minute beginnt der AFR fünf Scheinwiderständswerte bei der Frequenz  $f = f_0 - 50$  Hz = 43,55 kHz zu messen. Ungefähr 20 s später wiederholt er die Messung für  $f_0$  und nach weiteren 20 s für  $f = f_0 + 50$  Hz = 43,65 kHz. Die Frequenz  $f = 43,65$  kHz, bei der der minimale gemittelte Scheinwiderstand gemessen wurde, wird als neue Frequenz  $f_1$  eingestellt. Der AFR wiederholt die Messungen über  $f_2 = 43,60$  kHz,  $f_3 = 43,65$  kHz,  $f_4 = 43,70$  kHz,  $f_5 = 43,65$  kHz,  $f_6 = 43,70$  kHz und  $f_7 = 43,70$  kHz. Bei der Messung von  $f_7 - 50$  Hz = 43,65 Hz erkennt der AFR, dass die Frequenz identisch ist mit der Frequenz  $f_6 - 50$  Hz = 43,65 Hz einen Zyklus zuvor. Der AFR bricht die Messung ab und stellt  $f_7$  als neue optimale Frequenz ein, die in Abbildung 4.1.4 mit  $f_{Optimum}$  (schwarz) bezeichnet wird. An dem Verlauf des Scheinwiderstands ist zu erkennen, dass er bei den Frequenzen 43,55 kHz und 43,75 kHz deutlich auf bis zu 232 Ω ansteigt, während er bei den Frequenzen dazwischen nur Werte von ungefähr 210 Ω erreicht. In diesem Frequenzbereich von 200 Hz muss daher die Resonanzfrequenz liegen. Eine genauere Angabe ist durch die große Schwankung des Scheinwiderstands nicht möglich.

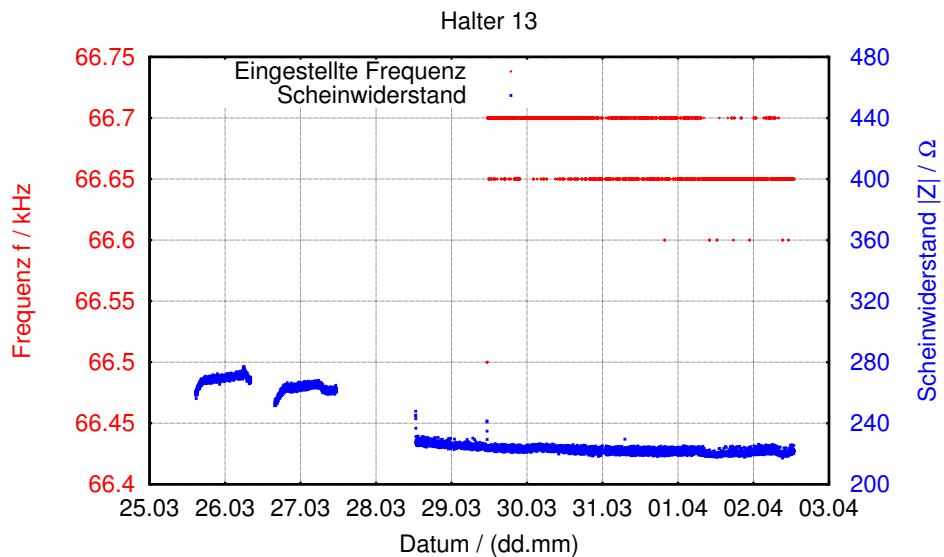
### 4.1.3 Die Ergebnisse der Durchflussmessungen

Im Folgenden werden die Messwerte für den Düsendurchmesser und den Scheinwiderstand über jeweils eine Minute gemittelt. Zur Übersichtlichkeit werden nur die Frequenzen dargestellt, die der AFR am Ende seiner Optimierung einstellt.

## 4.1.3.1 Die Ergebnisse von Halter 13



(a) Verlauf des Düsendurchmessers ohne und mit Piezobetrieb.



(b) Verlauf der Frequenz und des Scheinwiderstandes bei permanenter Verwendung des AFR.

Abbildung 4.1.6: Ergebnisse der Durchflussmessung von Halter 13.

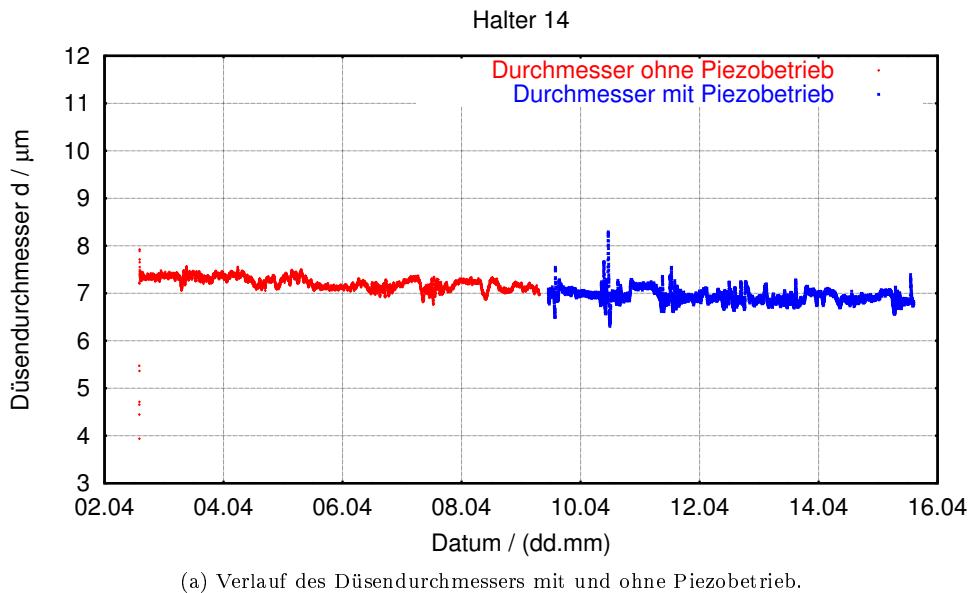
In Abbildung 4.1.6a ist der Düsendurchmesser gegen die Messdauer von über 20 Tagen aufgetragen. Dabei sind die Messwerte ohne den Piezobetrieb rot und die Messwerte mit Piezobetrieb blau. Die Unterbrechungen der Messung sowie die Ausreißer im Anschluss an einer Unterbrechung unter Verwendung des Piezoaktors sind Programmänderungen verschuldet. Um die Belastung konstant zu halten, lief während der Unterbrechungen der Piezoaktor ohne Datenaufnahme weiter. Die letzte Änderung am 29.03.2013 entspricht dabei der Einbindung des AFR, der in den folgenden Tagen ohne Time-Target arbeitete. Da der Düsendurchmesser konstant und oberhalb der 5,5  $\mu\text{m}$  ist, hat die Düse den Test bestanden.

Die Fluktuation des Durchmessers treten gleichzeitig mit Veränderungen der Raumtemperatur auf. Diese Temperaturabhängigkeit der Messung wurde bereits von F. Schepers qualitativ untersucht [Sch13b].

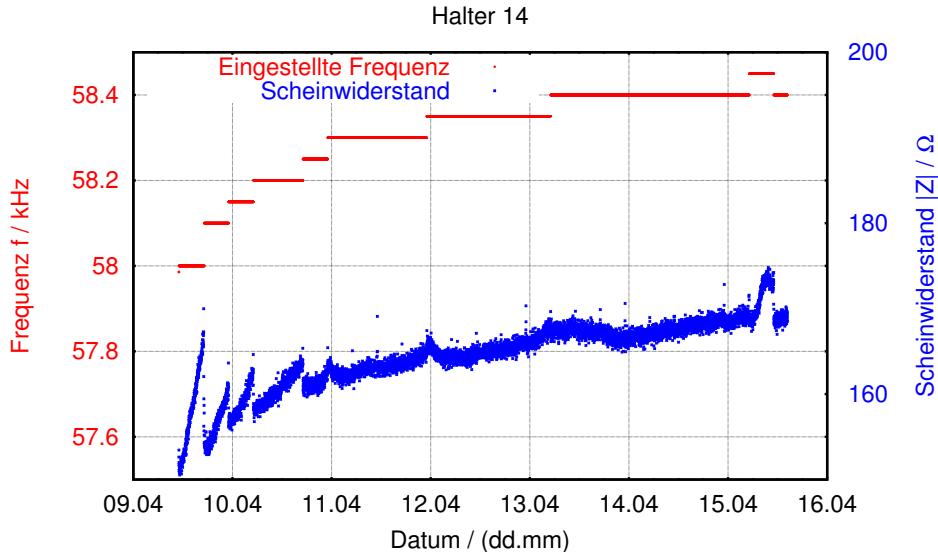
Die Arbeitsfrequenz wurde zu Beginn der Messung mit dem Piezoaktor durch eine Scheinwiderstands-

messung zu 66,5 kHz ermittelt. In Abbildung 4.1.6b ist der Verlauf der automatisch eingestellten Frequenz und des Scheinwiderstands vom 25.03.2013 bis zum 03.04.2013 zu sehen. Das Verhalten der Resonanzfrequenz in den Tagen zuvor ist nicht rekonstruierbar, jedoch lässt der direkte starke Anstieg der automatisch eingestellten Frequenz auf einen stabilen Bereich zwischen  $66650 \pm 3$  Hz und  $66700 \pm 3$  Hz auf eine Erhöhung der Resonanzfrequenz in den ersten Tagen schließen. Grund hierfür könnte sein, dass die Temperatur und damit die Resonanzfrequenz des Piezokristalls im Betrieb zunimmt. Nach einer Ruhephase kühlt sich der Piezoaktor wieder ab, sodass die Ergebnisse aus der Scheinwiderstandsmessung (vgl. Abbildung 3.2.11) wieder den Werten zu Beginn des Piezobetriebs entsprechen. Die Ausreißer in der Scheinwiderstandsmessung in Abbildung 4.1.6b sind eine Folge des AFR, der zu den Zeitpunkten Frequenzen getestet hat, die einen äußerst hohen Scheinwiderstand aufweisen.

#### 4.1.3.2 Die Ergebnisse von Halter 14



(a) Verlauf des Düsendurchmessers mit und ohne Piezobetrieb.



(b) Verlauf der Frequenz und des Scheinwiderstandes bei einem Time-Target des AFR von 4h.

Abbildung 4.1.7: Ergebnisse der Durchflussmessung von Halter 14.

Wie in Abbildung 4.1.7a zu erkennen ist, hat der Halter 14 den Test ebenfalls bestanden. Anders als bei der Durchflussmessung mit Halter 13 wurde die automatische Frequenzregelung mit einem Time-Target von 4 Stunden bereits zu Beginn der Messung unter Verwendung des Piezoaktors eingesetzt. Es kann in Abbildung 4.1.7b der Anstieg der automatisch eingestellten Frequenz von  $58000 \pm 3$  Hz auf  $58400 \pm 3$  Hz in den ersten vier Tagen beobachtet werden. Unterstützend für einen von der Betriebsdauer abhängigen Anstieg der Resonanzfrequenz ist der Verlauf des Scheinwiderstands in den Zeiten in denen der AFR nicht arbeitet. Nach vier Stunden steigt der Scheinwiderstand auf über  $175 \Omega$  an. Nachdem der AFR die Frequenz auf 58,1 kHz hochsetzt, sinkt der Scheinwiderstand wieder auf unter  $155 \Omega$ . Dieser Vorgang wiederholt sich in den ersten vier Tagen. Dabei nimmt die Stärke des Anstiegs in der Zeit ab, in der der AFR nicht arbeitet, sodass sich der Scheinwiderstand und die eingestellte Frequenz einem stabilen Zustand nähern. Zur Kontrolle wurde am Ende des Durchflusstest eine weitere Scheinwiderstandsmessung durchgeführt, die den Anstieg der Resonanzfrequenz bestätigt (vgl. Abbildung A.1.3b).

#### 4.1.3.3 Die Ergebnisse von Halter 16

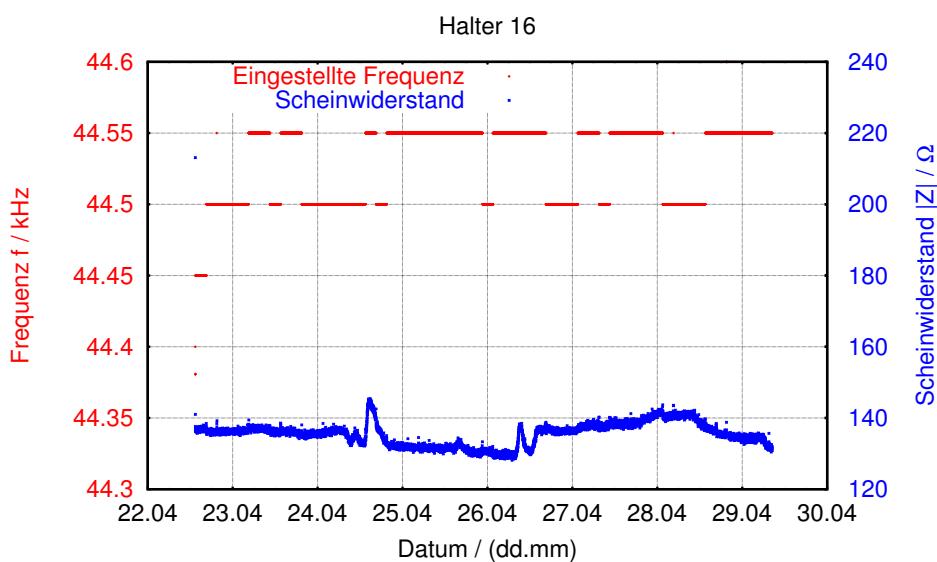
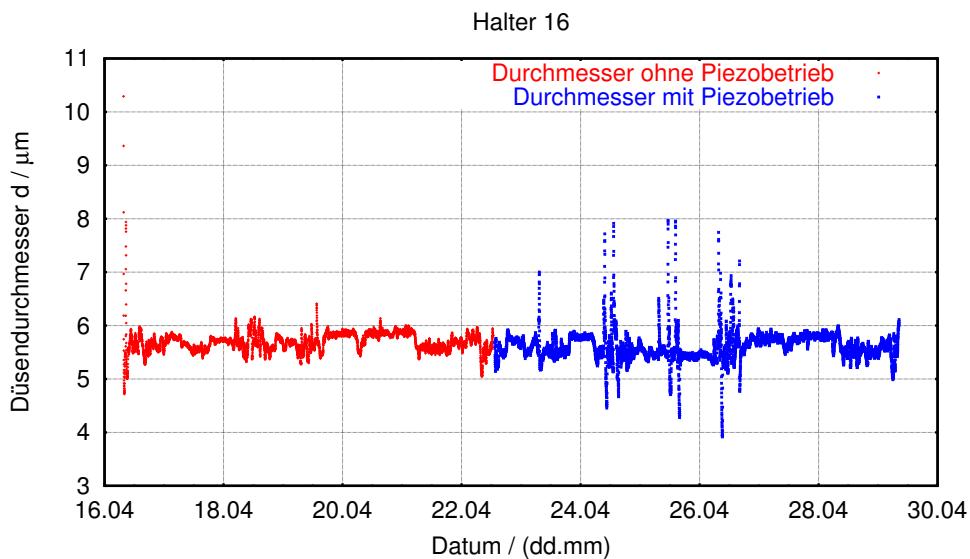
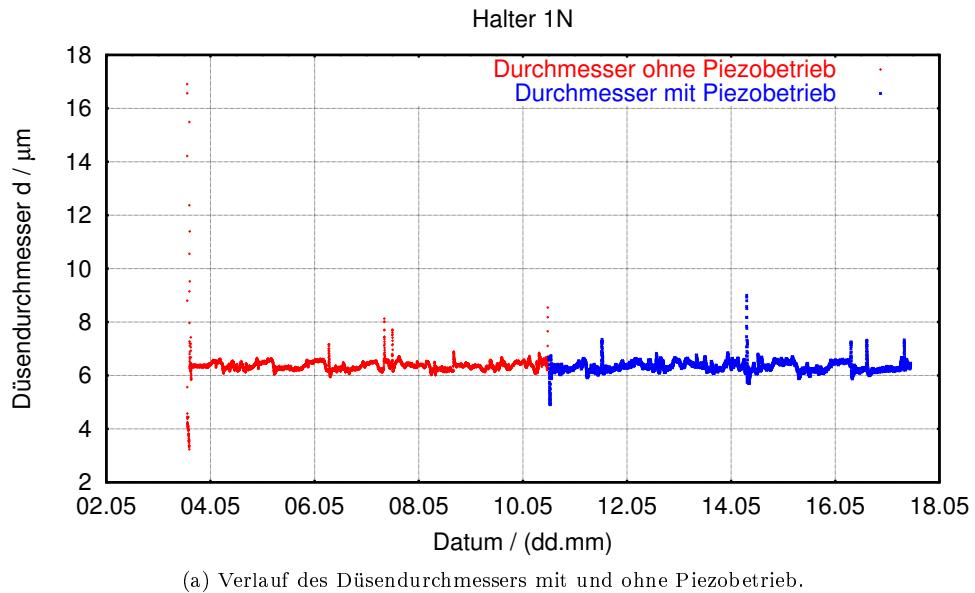


Abbildung 4.1.8: Ergebnisse der Durchflussmessung von Halter 16.

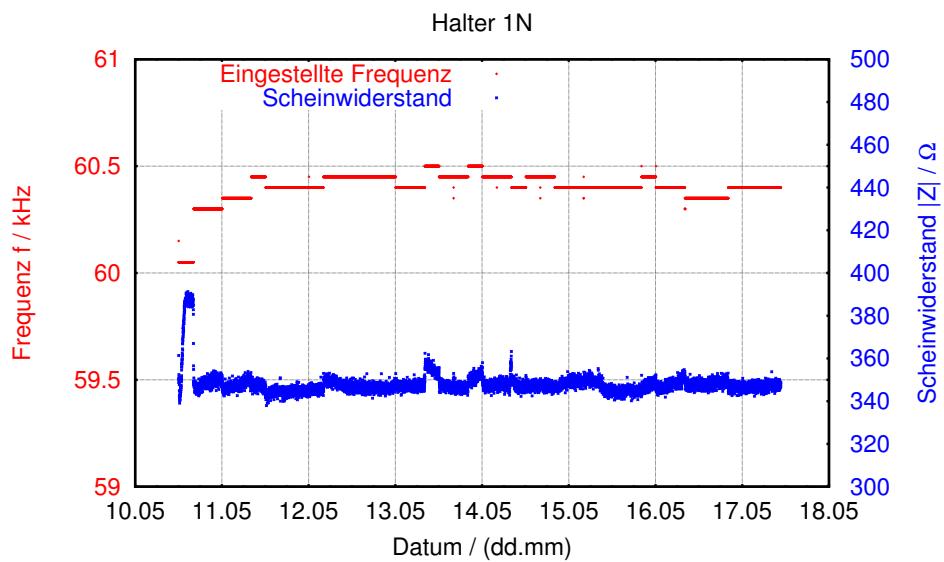
Abbildung 4.1.8a zeigt den zeitlichen Verlauf des Durchmessers von Düse 16. Der Wert fällt zeitweise unter den in LabVIEW gegebenen unteren Grenzwert von  $5,5 \mu\text{m}$ . Da es aber keine abrupte Verkleinerung des Düsendurchmessers gibt und die Düse in den Voruntersuchungen mit einem Mikroskop als frei eingestuft wurde, kann eine Blockierung ausgeschlossen werden.

Bei dieser Düse wurde die erste Resonanzfrequenz bei  $44400 \pm 2 \text{ Hz}$  als Betriebsfrequenz für die Durchflussmessung gewählt. Die automatisch eingestellte Frequenz wechselt innerhalb der ersten vier Stunden auf  $44500 \pm 2 \text{ Hz}$  (vgl. Abbildung 4.1.8b). Das Scheinwiderstandsspektrum in Abbildung A.1.4b bestätigt die vom AFR gefundene Resonanzfrequenz bei  $44500 \pm 2 \text{ Hz}$ . Hier wurde am Ende ebenfalls eine weitere Scheinwiderstandsmessung durchgeführt, die keinen Anstieg der Resonanzfrequenz zeigt (vgl. Abbildung A.1.4b).

## 4.1.3.4 Die Ergebnisse von Halter 1N



(a) Verlauf des Düsendurchmessers mit und ohne Piezobetrieb.

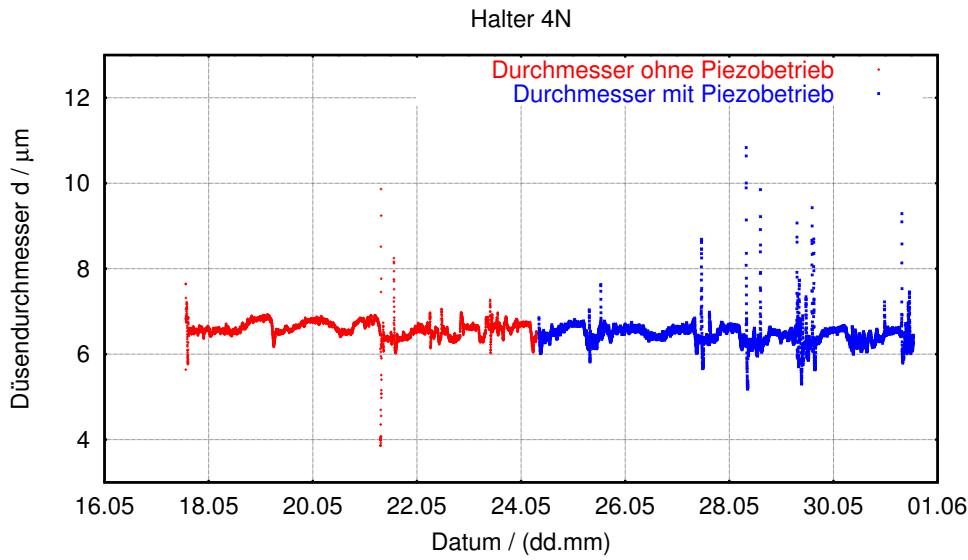


(b) Verlauf der Frequenz und des Scheinwiderstandes bei einem Time-Target des AFR von 4h.

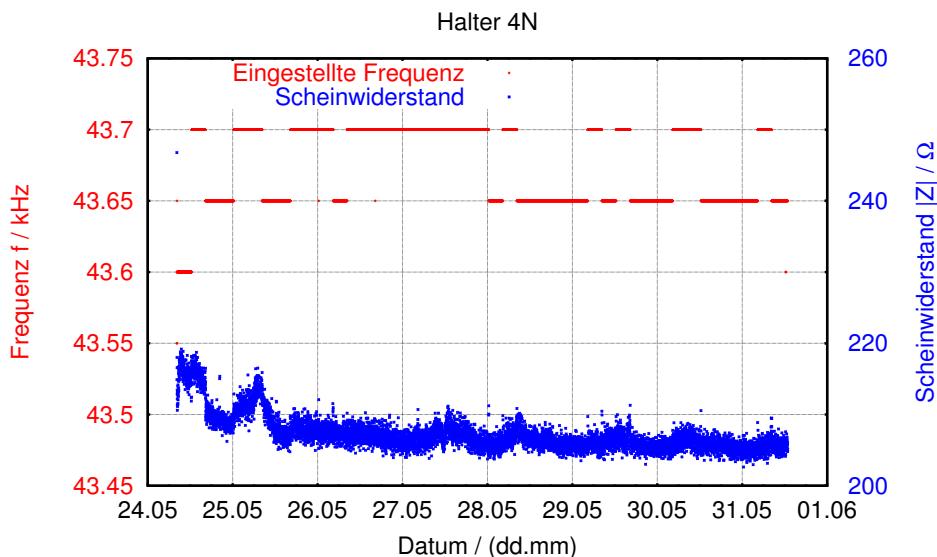
Abbildung 4.1.9: Ergebnisse der Durchflussmessung von Halter 1N.

Auch der Halter 1N hat den Durchflusstest bestanden (vgl. Abbildung 4.1.9a). Die Arbeitsfrequenz wurde zu Beginn auf  $60100 \pm 3$  Hz eingestellt und stabilisierte sich im Verlauf in einem Bereich zwischen  $60350 \pm 3$  Hz und  $60500 \pm 3$  Hz (vgl. Abbildung 4.1.9b). Dabei zeigt der Scheinwiderstand bei  $60400 \pm 3$  Hz einen relativ konstanten und niedrigen Wert. Die anschließende Scheinwiderstandsmessung zeigt, dass die Resonanzfrequenz bei  $60,2 \pm 0,03$  kHz liegt (vgl. Abbildung A.1.5b im Anhang). Die vom AFR eingestellten Frequenzen liegen damit über dem Wert für die Resonanzfrequenz aus der Scheinwiderstandsmessung. Hierbei sollte jedoch beachtet werden, dass die Schwankung des Scheinwiderstands und damit der Bereich, in dem die Resonanzfrequenz liegt, sehr groß sein kann. Das zeigt beispielhaft die Abbildung 4.1.5, in der die Resonanzfrequenz in einem Bereich von 200 Hz liegt.

#### 4.1.3.5 Die Ergebnisse von Halter 4N



(a) Verlauf des Düsendurchmessers ohne und mit Piezobetrieb.



(b) Verlauf der Frequenz und des Scheinwiderstandes bei einem Time-Target des AFR von 4h.

Abbildung 4.1.10: Ergebnisse der Durchflussmessung von Halter 4N.

Der Halter 4N hat den Durchflusstest ebenfalls bestanden (vgl. Abbildung 4.1.10a). Die zu Beginn eingestellte Arbeitsfrequenz bei  $43600 \pm 2$  Hz wurde nach vier Stunden durch den AFR gering auf  $43700 \pm 2$  Hz korrigiert und variierte während der weiteren Messung zwischen  $43650 \pm 2$  Hz und  $43700 \pm 2$  Hz (vgl. Abbildung 4.1.10b). Die anschließende Scheinwiderstandsmessung zeigt ebenfalls keinen signifikanten Anstieg der Resonanzfrequenz bei  $43,6 \pm 0,03$  kHz an.

Insgesamt haben alle Düsen die Durchflussmessung bestanden und können im Pelletttarget eingesetzt werden. Der AFR arbeitet zuverlässig und hat in dem deutlichen Fall von Halter 14 das Wandern der Resonanzfrequenz registriert und die Frequenz korrigiert. Der genauen Bestimmung der Resonanzfrequenz durch den AFR sind Grenzen gesetzt, die durch die Schwankung des Scheinwiderstands entstehen (vgl. Abbildung 4.1.5).

## 4.2 Die Bildung von Droplets

Die Bildung von Tropfen aus einem zylindrischen Strahl ist ausführlich in [Nor04] erklärt und wurde bereits von Lord Rayleigh 1878 berechnet. Lord Rayleigh zeigte, dass das natürliche Aufbrechen des Strahls in einzelne Tropfen bei einem Verhältnis von  $\frac{\lambda}{D_{jet}} \approx 4,5$  erfolgt. Dabei ist  $\lambda$  der Abstand zweier Tropfen und  $D_{jet}$  der Strahlendurchmesser.

Da der Volumenstrom konstant bleibt, müssen das Volumen eines Tropfens mit dem Durchmesser  $D_{droplet}$

$$V_{droplet} = \frac{\pi}{6} D_{droplet}^3 \quad (4.2.1)$$

und das Volumen eines Strahls zwischen zwei Tropfen

$$V_{jet} = \frac{\pi}{4} \lambda D_{jet}^2 \quad (4.2.2)$$

gleich sein. Unter Verwendung von

$$\lambda = \frac{v_{jet}}{f} \quad (4.2.3)$$

mit der Tropfenfrequenz  $f$  und der Strahlengeschwindigkeit  $v_{jet}$  gilt beim Gleichsetzen der Gleichungen (4.2.1) und (4.2.2) für den Droplet durchmesser

$$D_{droplet} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \frac{D_{nozzle}^2 v_{jet}}{f}}. \quad (4.2.4)$$

Hierbei wird angenommen, dass der Strahlendurchmesser  $D_{jet}$  dem Durchmesser am Düsenausgang  $D_{nozzle}$  entspricht.

Die Geschwindigkeit ergibt sich aus der Formel für den Fluss eines Fluids mit der Viskosität  $\eta$  in einem Rohr mit dem Durchmesser  $D_{nozzle}$  und der Länge  $L$

$$v_{jet} = \frac{D_{nozzle}}{32\eta L} \Delta p. \quad (4.2.5)$$

Die Erkenntnisse von Lord Rayleigh lassen sich auf die im Pelletttarget verwendeten Düsen anwenden. So wurden zum Beispiel bei einer Düse mit einem Düsendurchmesser von  $13,5 \mu\text{m}$  bei einer Frequenz von  $40 \text{ kHz}$  Droplets mit einer Geschwindigkeiten von  $18,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  gemessen und nach Gleichung (4.2.4) ein Droplet durchmesser von  $48 \mu\text{m}$  berechnet [Nor04]. Diese Werte ergaben sich für ein Droplet aus flüssigem Wasserstoff im Vakuum. Obwohl bei den Pentanmessungen, die im Folgenden beschrieben werden, andere Bedingungen vorliegen, können die Droplets mit den selben Gleichungen untersucht werden.

## 4.3 Die Pentanmessung

Eine neue Methode zur Untersuchung der Dropletentstehung ist im Zuge dieser Arbeit entwickelt worden. Dabei wird n-Pentan als Ersatzfluid für Wasserstoff gewählt. n-Pentan, im weiteren nur Pentan genannt, hat gegenüber anderen Flüssigkeiten den Vorteil einer geringen Viskosität  $\eta = 0,24 \text{ mPa s}$  (bei 20 °C) und Oberflächenspannung  $\sigma = 16 \frac{\text{mN}}{\text{m}}$  [W+64]. Durch die direkte optische Beobachtung der Dropletentstehung lassen sich Durchmesser und Geschwindigkeit von Droplets bestimmen. Darauf hinaus können durch den Vergleich mit der Scheinwiderstands- und der Mikrofonmessung die Bedeutung von Schwingungsresonanzen und die Aussagekraft der Messmethoden überprüft werden.

### 4.3.1 Der Aufbau der Pentanmessung

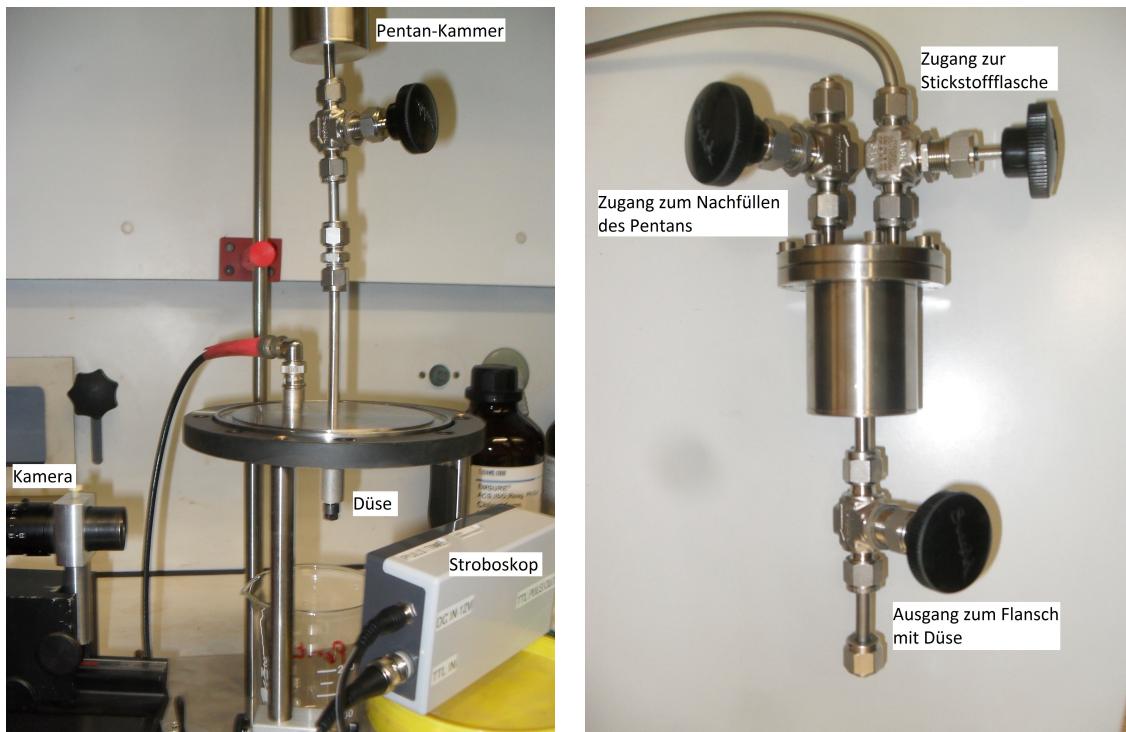


Abbildung 4.3.1: Messaufbau zur Untersuchung der Dropletentstehung mit Pentan.

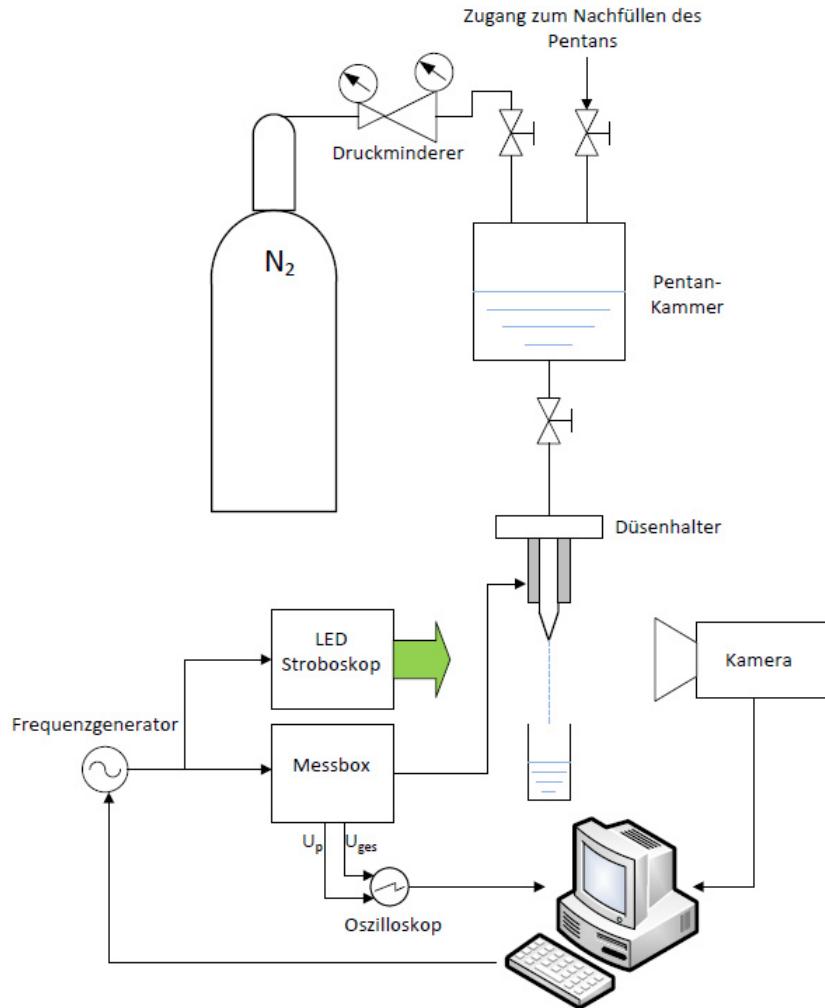


Abbildung 4.3.2: Schaltungsprinzipielle Darstellung zur Pentanmessung. Oben ist der pneumatische Aufbau zu sehen, in dem Pentan mit dem Druck des Stickstoffs ( $\Delta p = 1,5$  bar) aus der Pentankammer durch die Düse gedrückt und von einem Becherglas aufgefangen wird. Unten ist der Messaufbau zu sehen, in dem der Frequenzgenerator sowohl den Piezoaktor als auch das Stroboskop mit der selben Frequenz ansteuert. Zusätzlich können mit der Messbox, die in Abschnitt 3.2.2 erklärt wurde, die Informationen über den Scheinwiderstand des Piezoaktors und mit einer Kamera detaillierte Bilder der Pentandroplets vom Computer aufgenommen werden.

Mit dem Aufbau aus Abbildung 4.3.1a bzw. 4.3.2 wird die Pentanmessung durchgeführt. Sie verläuft ähnlich wie die Mikrofonmessung mit Gasfluss. Anstatt Stickstoff direkt durch die Düse zu leiten, befindet sich allerdings in einer Zwischenkammer ungefähr 50 ml Pentan, das mit dem Druck des Stickstoffs von  $\Delta p = 1,5$  bar Überdruck die Düse verlässt.

Um keinen funktionsfähigen Düsenhalter mit dem Pentan zu beschädigen, wurde der Halter 4 verwendet. Bei diesem ist die Kabeldurchführung undicht, sodass beim Betrieb im Pelletttarget ein Gasleck entsteht. Obwohl der Halter nicht im Targetbetrieb verwendet werden kann, ist er für die Messung mit Pentan geeignet, da diese keine Vakuum-Kammer voraussetzt.

Um die Droplets beobachten zu können, wurde ein LED-Stroboskop entwickelt. Durch die Synchronisation mit dem Frequenzgenerator, der die Betriebsfrequenz des Piezoaktors vorgibt, setzt der Stroboskopeffekt ein, sodass permanent dieselbe Phase der Tropfenbildung beobachtet werden kann. Für die Messungen sind Frequenzen bis ca. 100 kHz relevant, was einem zeitlichen Abstand der Droplets von mindestens 10  $\mu$ s entspricht. Eine Verschmierung der Dropletaufnahmen durch eine zu hohe Belichtungszeit sollte vermieden werden. Aus diesem Grund werden Pulslängen von 100 ns bis 5000 ns

gewählt. Die geringe Belichtungszeit und hohe Frequenz schränkt jedoch die Wahl des Stroboskops ein. Geeignet sind monochromatische LEDs, die eine geringe Impulsweite aufweisen [GeroJ]. Die Wellenlänge von 525 nm wurde gewählt, da die Tropfen mit der Kamera *pixelfly usb* von pco aufgenommen werden, deren größte Sensitivität bei 500 nm liegt [PCO10].

Für genauere Aufnahmen der Tropfen wurde zudem das *Long-Distance Microscope* Objektiv *QM100* von Questar verwendet.

#### 4.3.2 Der Betrieb mit Pentan

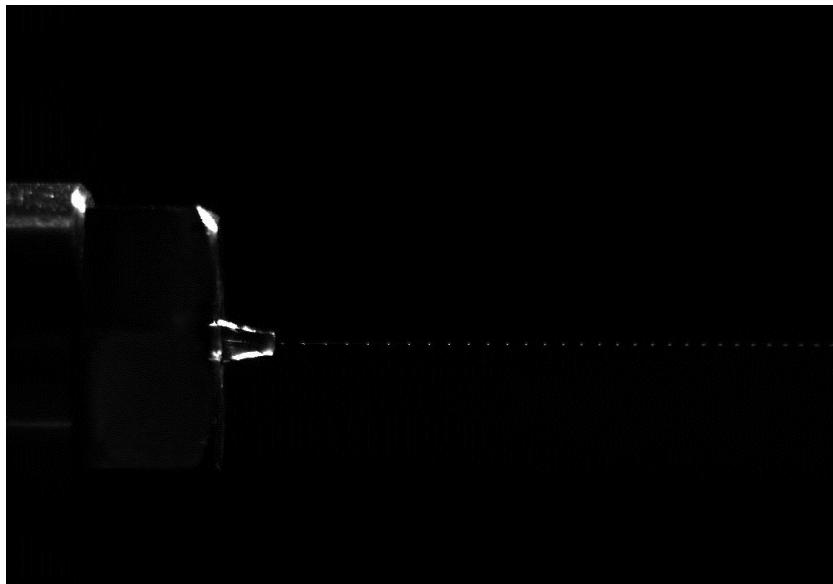


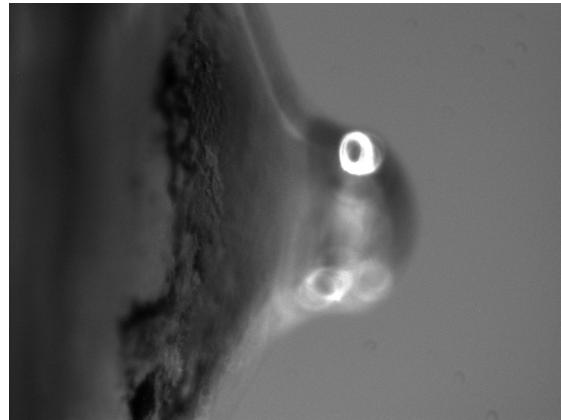
Abbildung 4.3.3: Foto von der Pentanmessung, aufgenommen ohne Long-Distance-Microscope-Objektiv. Zu sehen sind (v.l.n.r) Piezoaktor, Überwurfmutter, Düsen spitze, Pentandroplets bei einer Frequenz von 19,3 kHz.

Das Bild in Abbildung 4.3.3 ist ohne Long-Distance Microscope Objektiv aufgenommen worden und zeigt das Ende des Piezoaktors, die Überwurfmutter, die Düsen spitze und den Pentanstrahl, der bei einer Frequenz von 19,3 kHz in einzelne Droplets aufgebrochen ist.

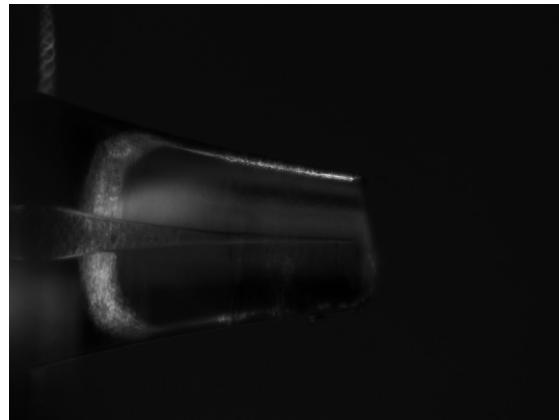
Im Vorfeld wurde die Kammer mit Wasser gefüllt. Anstelle eines Strahls bildeten sich große Tropfen am Düsenausgang, die sich aufgrund der geringen Volumengeschwindigkeit nur langsam füllten, um dann durch die Gewichtskraft abzutropfen. Der Grund dafür liegt in der hohen Viskosität des Wassers von  $\eta = 1,002 \text{ mPa s}$  und der nach Gleichung (4.2.5) geringen Fließgeschwindigkeit [TheoJ]. Durch die Verwendung von Pentan kann ein Strahl erzeugt werden, der mit einer aufgezwungenen Schwingung in Tropfen aufbricht.

Während der Messung fielen gelb-braune Rückstände im Becherglas unter dem Düsenausgang auf. Da Pentan als guter Fettlöser bekannt ist, handelt es sich um Fett, dass entweder erst in den Rohren gelöst wurde oder bereits vor der Messung im Pentan gelöst war und als Rückstand des verdunsteten Pentans im Becherglas übrig geblieben ist. Die genaue Klärung, woher das Fett stammt, bleibt offen, jedoch sollte bei Wiederholung der Tests reinstes Pentan verwendet werden.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>In diesem Fall wurde technisches Pentan mit einem Gehalt >95% verwendet.



(a) Glasdüse von Fett umgeben. An der Spitze ist ein Pentanropfen unscharf zu erkennen.



(b) Glasdüse mit sichtbarer Blockierung in der Düse.

Abbildung 4.3.4: Düse mit Blockierung. Beide Aufnahmen zeigen denselben Bildausschnitt

Am Ende der Messreihe war die Düse blockiert. Wie die Aufnahme in Abbildung 4.3.4a zeigt, hat sich neben dem Rückständen in den dem Becherglas eine Ablagerung um die Düse gebildet. Das Fett ist, wie in Abbildung 4.3.4b zu erkennen, in die Düse gelangt und für die Blockierung verantwortlich. Bis zur Blockierung konnten jedoch eine Reihe von detaillierte Aufnahmen mit dem Long-Distance Microscope Objektiv gemacht werden, die erlauben die Dropleteigenschaften zu beschreiben und die Scheinwiderstands- sowie die Mikrofonmessung mit der Bildung der Droplets zu vergleichen (vgl. Abbildung A.3.1 bis A.3.9 im Anhang).

### 4.3.3 Die Interpretation der Aufnahmen und der Vergleich mit Methoden der Resonanzfrequenzbestimmung

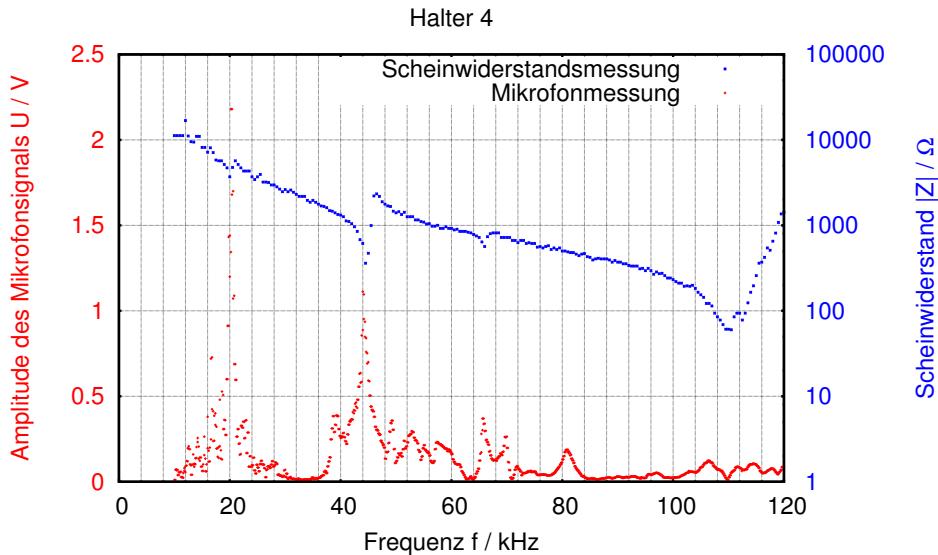


Abbildung 4.3.5: Scheinwiderstands- (blau)- und Mikrofonmessung (rot) von Halter 4. Das Mikrofon befand sich während der Messung in Position b) aus Abbildung 3.3.2.

Die Abbildung 4.3.5 zeigt das Scheinwiderstands- und Amplitudenspektrum von Halter 4. Das Mikrofon befand sich bei der Messung im direkten Kontakt mit dem Piezoaktor, was der Position b) in Abbildung 3.3.2 entspricht. Beide Spektren zeigen die Resonanzfrequenzen  $f_1 = 20,00 \pm 0,14$  kHz,  $f_2 = 44,50 \pm 0,14$  kHz und  $f_3 = 66,00 \pm 0,14$  kHz an. Die Spektren können direkt mit der Dropleterzeugung mit Pentan verglichen werden.

Die Abbildungen A.3.1 bis A.3.9 im Anhang zeigen den Pentanstrahl, der mit dem Long-Distance Microscope Objektiv aufgenommen wurde. Dabei sind die Bilder um  $90^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn gekippt worden. Für eine deutlichere Darstellung wurden die Negative der Aufnahmen durch eine automatische Helligkeits- und Kontrastanpassung mit IrfanView bearbeitet.

Deutlich sind Droplets zu erkennen, die mit der aufgezwungenen Frequenz gebildet werden.

Es fällt auf, dass die Droplets nicht direkt am Düsenausgang entstehen, sondern erst nach einer Strecke von ungefähr 1 mm aufbrechen. Um die Bildung der Droplets bei unterschiedlichen Frequenzen besser beschreiben zu können, wurden die Aufnahmen in drei Klassen unterteilt.

- Klasse I (vgl. Abbildung A.3.1 bis A.3.2 im Anhang): Die erste Klasse beginnt mit der Erzeugung von Droplets bei der Frequenz um 19,8 kHz. Die Droplets, die die Frequenz des Piezoaktors übernehmen, sind deutlich zu erkennen, jedoch erfolgt keine komplette Aufbrechung, sodass eine Pentansäule zwischen den Droplets bestehen bleibt (vgl. Abbildung 4.3.6). Bei Frequenzen oberhalb der Dropleterzeugung zeigen sich zunächst schwache Strukturen von Satelliten (vgl. Abbildung 4.3.7), bis bei einer Frequenz von ungefähr 25,4 kHz wieder nur die Pentansäule zu erkennen ist. Dieser Verlauf wiederholt sich mit einer Dropleterzeugung bei einer Frequenz von 32,1 kHz und endet mit dem Verschwinden der Strukturen bei 35,4 kHz.

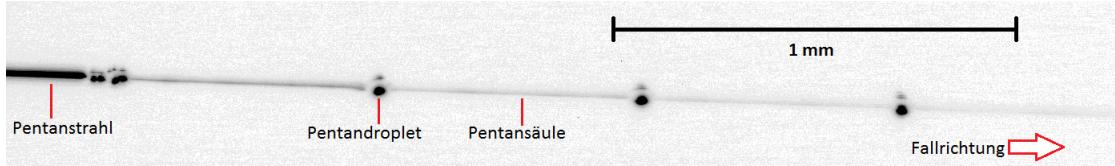


Abbildung 4.3.6: Bei 19,8 kHz (Klasse I) bricht der Pentanstrahl, der in der Aufnahme von links nach rechts verläuft, in Droplets auf. Die Droplets sind durch eine Pentansäule verbunden.

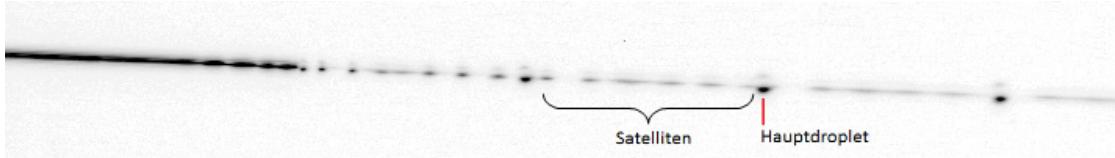


Abbildung 4.3.7: Bei 20,9 kHz (Klasse I) sind schwache Strukturen von Satelliten neben den Hauptdroplets zu erkennen. Die Droplets sind weiterhin durch eine Pentansäule verbunden.

- Klasse II (vgl. Abbildung A.3.3 bis A.3.5 im Anhang): Die Klasse verläuft zu Beginn wieder wie die Klasse I mit der Bildung von Droplets bei einer Frequenz von 42,2 kHz. Allerdings verschwindet die darauffolgende Struktur mit Satelliten und Droplets nicht wieder in der Pentansäule, sondern bricht bei ungefähr 42,6 kHz in klar getrennte Tropfen auf (vgl. Abbildung 4.3.8). Die Zustände, in denen Droplets in der Frequenz des Piezoaktors mit verbindender Pentansäule vorkommen, und die Zustände, in denen die Pentansäule in bis zu fünf einzelne Satelliten aufbricht, wechseln sich bis zu einer Frequenz von ungefähr 63,2 kHz ab. Dabei zeigen die durch die Mikrofon- und Scheinwiderstandsmessung ermittelten Resonanzfrequenzen von  $f_2 = 44,50 \pm 0,14$  kHz und  $f_3 = 66,00 \pm 0,14$  kHz keine Besonderheiten. Auffällig ist, dass die Satelliten eine unterschiedliche Geschwindigkeitsverteilung haben. Die Satelliten holen die Hauptdroplets ein und sind am rechten Bildrand von diesen nicht mehr deutlich zu unterscheiden (vgl. Abbildung 4.3.9).



Abbildung 4.3.8: Bei 42,6 kHz (Klasse II) verschwindet die Pentansäule zwischen den Hauptdroplets und Satelliten.



Abbildung 4.3.9: Bei 44,8 kHz (Klasse II) ist zu erkennen, dass die Satelliten die Hauptdroplets einholen und am rechten Bildrand nicht von ihnen getrennt werden können.

- Klasse III (vgl. Abbildung A.3.6 bis A.3.9 im Anhang): Die letzte Klasse unterscheidet sich von Klasse II dadurch, dass die Anzahl an Satelliten nicht mehr als drei beträgt und ihre Geschwindigkeitsverteilung zur frühen Aufnahme im Hauptdroplet führt. Dadurch entstehen das erste mal klar getrennte Pentantropfen ohne Satelliten bei einer Frequenz von 65,8 kHz (vgl. Abbildung 4.3.10).

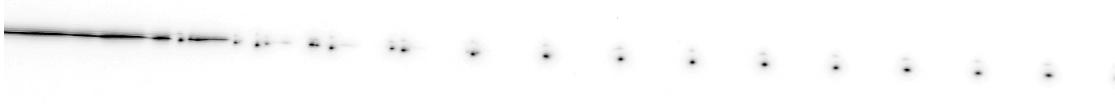


Abbildung 4.3.10: Bei 68,3 kHz (Klasse III) sind die Droplets klar voneinander getrennt. Zudem werden die Satelliten früh von den Hauptdroplets aufgenommen.

Im direkten Vergleich mit der Scheinwiderstands- und Mikrofonmessung zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit der Dropletbildung in den Resonanzfrequenzen. Diese liegen um 20 kHz, im Bereich von 42 kHz bis 46 kHz und von 65 kHz bis 67 kHz sowie oberhalb von 100 kHz. In dem Amplitudenspektrum befinden sich mehr Peaks als im Scheinwiderstandsspektrum. Die zusätzlichen Peaks liegen zum größten Teil in dem Bereich der Klasse II. Dort schwankt die Qualität der Droplets. Ob sich die Schwankungen in dem Amplitudenpektrum widerspiegeln, ist nicht deutlich zu erkennen. So stimmt auf der einen Seite die schlechte Dropletqualität in dem Frequenzbereich  $60,8 \text{ kHz} < f < 63 \text{ kHz}$  mit dem Minimum des Amplitudenspektrums überein. Auf der anderen Seite befinden sich im Amplitudenspektrum bei  $f \approx 39 \text{ kHz}$  und  $f \approx 81 \text{ kHz}$  Peaks, die für die Dropletentstehung nicht von Bedeutung sind. Eine endgültige Aussage über die Qualität der Methoden zur Bestimmung der Resonanzfrequenzen lässt sich daher nicht treffen. Die Klasse III zeigt keine Übereinstimmung mit dem Amplitudenspektrum. Hier sollte noch einmal erwähnt werden, dass nicht bekannt ist, wie sich die Sensitivität des Mikrofons bei hohen Frequenzen verhält (vgl. Abschnitt 3.3.3).

#### 4.3.4 Die Bestimmung der Dropleteigenschaften

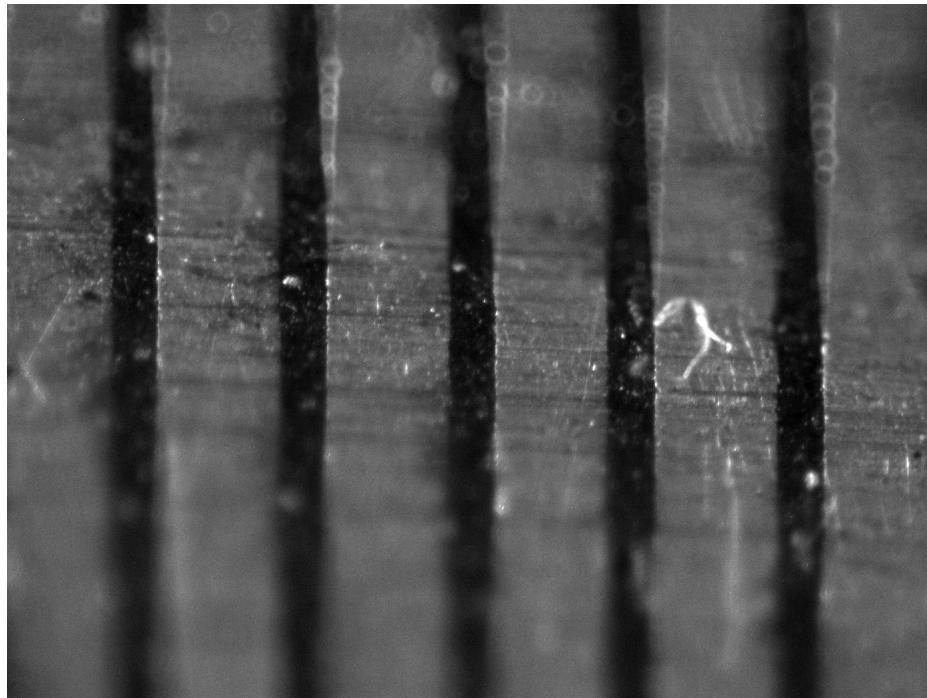


Abbildung 4.3.11: Stahlmaßstab mit einer Skalierung von 0,5 mm. Aufgenommen mit dem Mikroskop Objektiv zur Bestimmung der räumlichen Ausdehnungen.

Um die räumlichen Ausdehnungen zu bestimmen, wurde ein Stahlmaßstab mit einer Skalierung von 0,5 mm aufgenommen (vgl. Abbildung 4.3.11). Über die Anzahl an Pixeln konnten nun Aussagen über die räumlichen Größen getroffen werden. Im Folgenden ergeben sich alle Fehler aus der Standardab-

weichung.

Da die Frequenz bekannt ist, kann der Abstand zweier Droplets benutzt werden, um die Geschwindigkeit nach Gleichung (4.2.3) zu ermitteln. Der Abstand kann direkt mithilfe der Anzahl an Pixeln bestimmt werden. Für die Aufnahmen der Pentandroplets in Abbildung A.3.1 bis A.3.9 im Anhang ergibt sich insgesamt eine durchschnittliche Geschwindigkeit von  $v_{jet} = 12,35 \pm 0,08 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Die Geschwindigkeit der Wasserstoffdroplets am WASA-at-COSY Pelletttarget liegt mit über  $18 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  über der Geschwindigkeit der Pentandroplets [Nor04]. Der Grund dafür liegt in dem Einfluss der geringeren Viskosität von Wasserstoff auf die Geschwindigkeit nach Gleichung (4.2.5).

Die Gleichung (4.2.5) kann umgeschrieben werden zu

$$L = \frac{D_{nozzle}}{32\eta v_{jet}} \Delta p \quad (4.3.1)$$

Nach der Produktion der Düse wurde der Düsendurchmesser durch ein Mikroskop zu  $D_{nozzle} = 13,36 \mu\text{m}$  bestimmt. Der Druckunterschied zwischen Düsenausgang und Pentankammer lag bei  $\Delta p = 1,5 \pm 0,2$  bar. Zusammen mit einer Viskosität von  $0,224 \text{ mPa s}$  und der gemessenen Geschwindigkeit von  $v_{jet} = 12,35 \pm 0,08 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ergibt sich nach Gleichung (4.3.1) eine effektive Rohrlänge von  $L_{eff} = 0,30 \pm 0,04 \text{ mm}$ .

Der Strahldurchmesser am Düsenausgang kann durch die Anzahl an Pixeln gemessen werden. Er ist mit  $22 \pm 4 \mu\text{m}$  deutlich größer als der Düsendurchmesser  $D_{nozzle} = 13,36 \mu\text{m}$ . Der Unterschied kann jedoch darauf zurückgeführt werden, dass in den Aufnahmen aufgrund der Auflösung kein klarer Strahlenrand erkannt werden kann. Mit dem Produkt aus dem Strahldurchmesser und der Geschwindigkeit  $v_{jet} = 12,35 \pm 0,08 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ergibt sich ein Volumenstrom von  $(4,8 \pm 1,7) \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ .

Durch Einsetzen des Düsendurchmessers  $D_{nozzle} = 13,36 \mu\text{m}$  und der Geschwindigkeit  $v_{jet} = 12,35 \pm 0,08 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  können nach Gleichung (4.2.4) die zu erwarteten Droplet durchmesser berechnet werden. Diese liegen zwischen  $D_{droplet} = 30 \pm 5 \mu\text{m}$  bei  $f = 120 \text{ kHz}$  und  $D_{droplet} = 69 \pm 13 \mu\text{m}$  bei  $f = 10 \text{ kHz}$ .

Über die Anzahl an Pixeln, kann der Durchmesser der Droplets direkt gemessen werden. Die Ergebnisse der Aufnahmen liegen in einem Bereich zwischen  $D_{droplet} = 30 \pm 4 \mu\text{m}$  bei  $f = 117 \pm \text{kHz}$  und  $D_{droplet} = 59 \pm 6 \mu\text{m}$   $f = 19,8 \pm \text{kHz}$ . Die gemessenen Werte stimmen insgesamt gut mit den berechneten Werten überein.



## Kapitel 5

# Zusammenfassung und Ausblick

Das vorrangige Ziel der Arbeit bestand in dem Betrieb des Düsenteststands zu Prüfung der Düsenhalter. Im Ergebnis wies keine der Düsen eine Blockierung auf. Zudem zeigen die Scheinwiderstandsspektren einen unauffälligen Verlauf, sodass von einer uneingeschränkten Funktionsfähigkeit der Piezoaktoren ausgegangen werden kann. Insgesamt haben die Düsenhalter 13, 14, 16, 1N und 4N die Tests bestanden und können im Pelletttarget verwendet werden.

Zudem wurden im Zuge dieser Arbeit einige Erweiterungen am Düsenteststand vorgenommen.

Das LabVIEW-Programm bei der Scheinwiderstandsmessung wurde umgeschrieben, sodass der Scheinwiderstand direkt ermittelt und ausgegeben werden kann (vgl. Abschnitt 3.2.3). Das vereinfacht und verkürzt die Bedienung bei der Aufnahme der Scheinwiderstandsspektren und der Bestimmung der Resonanzfrequenzen. Allerdings ist zu beachten, dass die verwendete Subroutine besonders bei kleinen Spannungen eine große Abweichung aufweist. Daher ist zu überlegen, ob ein alternatives Unterprogramm entwickelt werden sollte, dass genauere Werte liefert. In Anlehnung an die alte Methode mit C++ würde es sich zum Beispiel anbieten, innerhalb des LabVIEW-Programms die Spannungssignale mit einer Cosinus-Funktion anzufitten, um mit den Fitparametern für die Amplituden den Scheinwiderstand zu berechnen.

Im Rahmen der Arbeit wurde ein automatischer Frequenzregler (AFR) in die Durchflussmessung integriert, der es ermöglicht, die Arbeitsfrequenz in der Nähe einer Resonanzfrequenz zu halten. Durch den Verlauf der Scheinwiderstände und eingestellten Frequenzen über die Betriebszeit (vgl. Abschnitt 4.1.3.1) sowie durch den direkten Vergleich mit den Scheinwiderstandsspektren (vgl. Abschnitt 3.2.5), die vor und nach der Durchflussmessung aufgenommen wurden, zeigt sich, dass der AFR zuverlässig funktioniert.

Sowohl die Ergebnisse der Scheinwiderstandsmessung als auch der zeitliche Verlauf des Scheinwiderstands während der Durchflussmessung zeigen eine Dynamik der Resonanzfrequenzen während des Betriebs. Daher ist zu überlegen, ob der AFR im Targetbetrieb eingesetzt werden kann. Der AFR kann dort das Auseinanderdriften der eingestellten Frequenz und Resonanzfrequenz verhindern und macht eine manuelle Korrektur überflüssig.

Der Aufbau der Mikrofonmessung wurde verändert, um zu überprüfen, ob die Ergebnisse einer Mikrofonmessung mit Gasfluss im Vergleich zu den Ergebnissen der bisherigen Mikrofonmessungen ohne Gasfluss Unterschiede aufweisen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Da dies nicht der Fall war, bietet die Mikrofonmessung mit Gasfluss bei der Bestimmung von Resonanzfrequenzen keinen Vorteil gegenüber der bisherigen Messung ohne Gasfluss.

Zusätzlich zu dem Amplitudenspektrum wurde ein Leistungsspektrum des Mikrofonsignals aufgenommen. Es zeigt sich, dass die Schwingung des Düsenhalters neben der Grundfrequenz Oberwellen aufweist. Die Vermutung, dass die Oberwellen verstärkt auftauchen, wenn der Düsenhalter in seiner Resonanz schwingt, kann nicht bestätigt werden (vgl. Abschnitt 3.3.4). Damit ist der Nachweis von Resonanzfrequenzen durch das Vorhandensein von Oberwellen im Leistungsspektrum nicht möglich.

Zuletzt wurde im Zuge der Arbeit eine neue Methode entwickelt, die Dropletentstehung zu beobachten. Dabei wurde Pentan aufgrund der geringen Viskosität als Ersatzfluid für den am Pelletttarget verwendeten Wasserstoff gewählt (vgl. Abschnitt 4.3.1). Um eine Blockierung zu verhindern, sollte in Zukunft darauf geachtet werden, reinstes Pentan zu verwenden. Die Messung verliefen bis zur Blockierung der Glasdüse erfolgreich. Die Dropletentstehung konnte mit einem Mikroskop Objektiv und einem Stroboskop detailliert aufgenommen werden. Zudem konnten einige Eigenschaften der Pentandroplet bestimmt und ein erster Vergleich mit der Mikrofon- und Scheinwiderstandsmessung vorgenommen werden (vgl. Abschnitt 4.3.3 und 4.3.4). Die bisherigen Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Mikrofonmessung die Dropletentstehung besser beschreibt. Während die Scheinwiderstandsmessung nur die Resonanzfrequenzen anzeigt, reagiert das Mikrofon in einem Bereich, der der Phase II bei der Dropletentstehung entspricht. Ob bei den einzelnen Peaks im Amplitudenspektrum tatsächlich Droplets entstehen, muss jedoch mit weiteren Messungen untersucht werden. Bestätigt sich dies, so ist die Mikrofonmessung eine besserer Nachweis für Arbeitsfrequenzen.

Die Pentanmessung bietet eine Reihe von Möglichkeiten, die Dropletentstehung weiter zu untersuchen. So kann durch das Einbringen eines veränderlichen Phasenunterschiedes zwischen dem Piezoaktor und dem Stroboskop der zeitliche Verlauf der Dropletentstehung genauer beobachtet werden. Es kann ebenfalls getestet werden, ob bei einer höheren Spannung außerhalb der Resonanzen Droplets entstehen können.

# Anhang A

## A.1 Die Scheinwiderstandsmessung

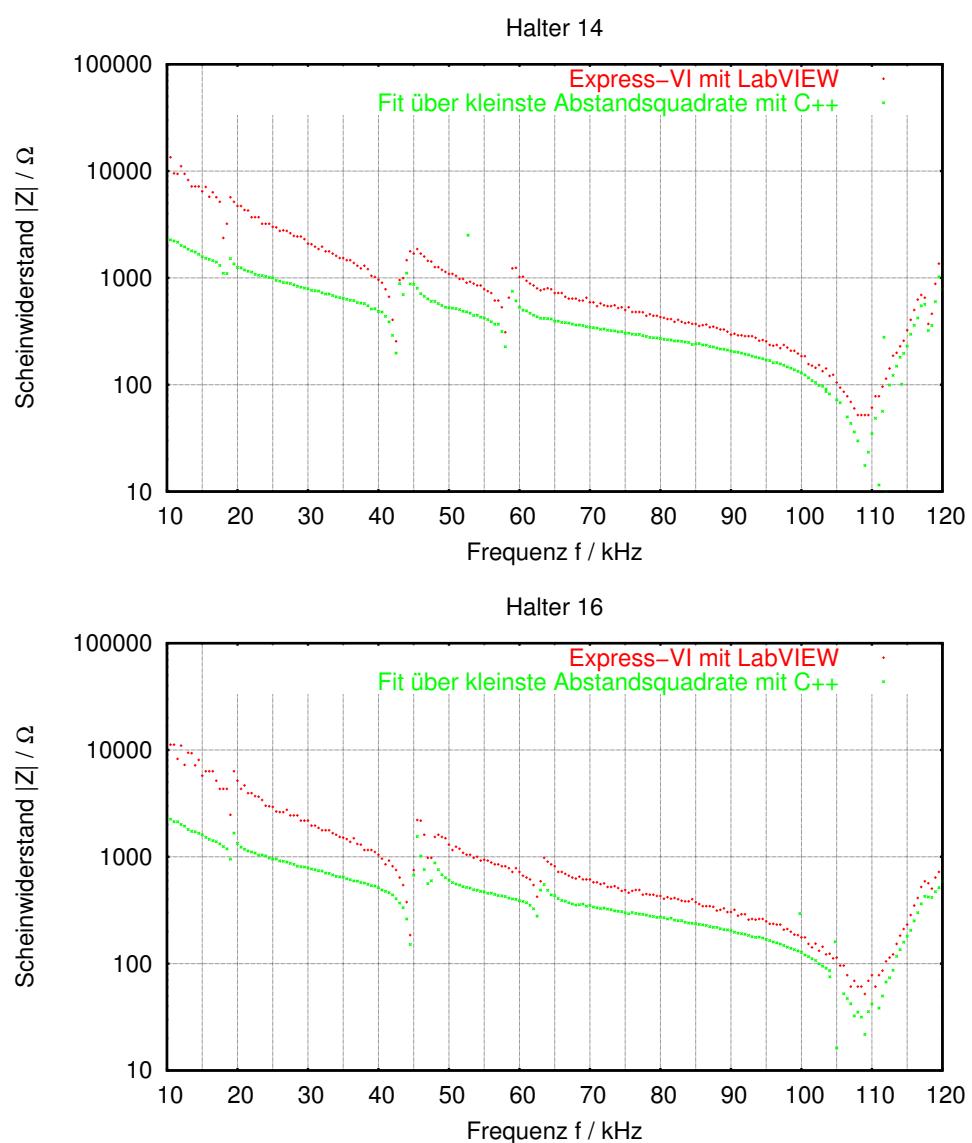


Abbildung A.1.1: Vergleich der Scheinwiderstandsspektren von Halter 14 und 16 mit der bisherigen (C++) und neuen (LabVIEW) Methode.

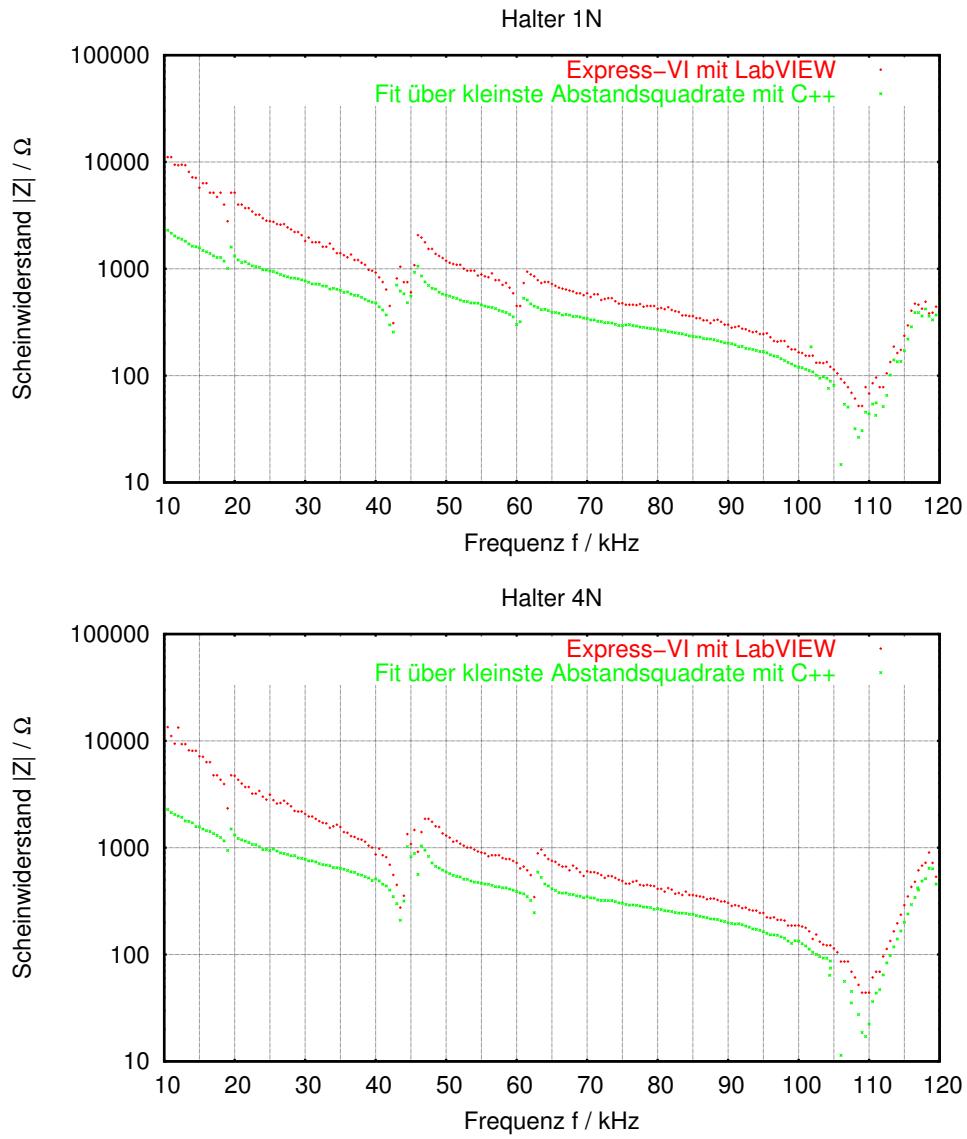
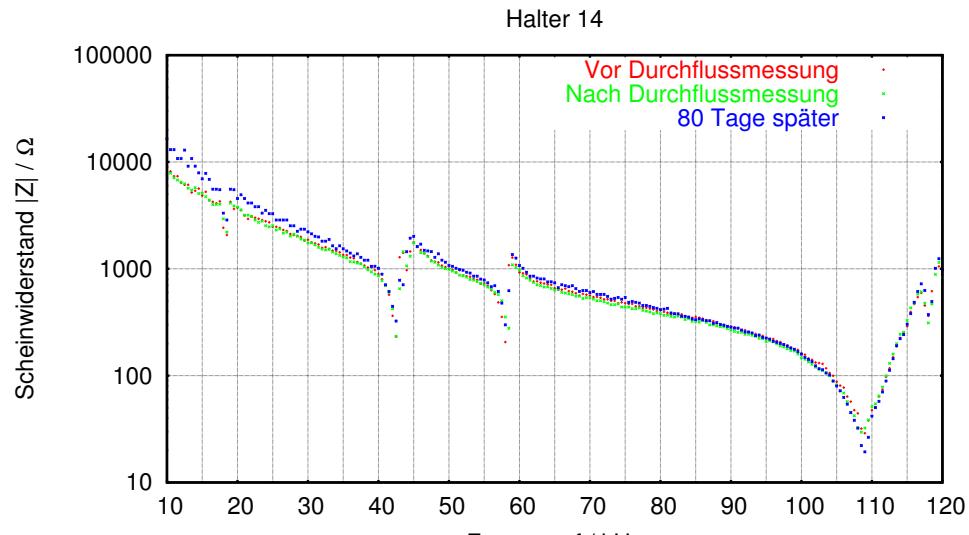


Abbildung A.1.2: Vergleich der Scheinwiderstandsspektren von Halter 1N und 2N mit der bisherigen (C++) und neuen (LabVIEW) Methode.



(a) Spektren bei einer Schrittweite von 500 Hz.

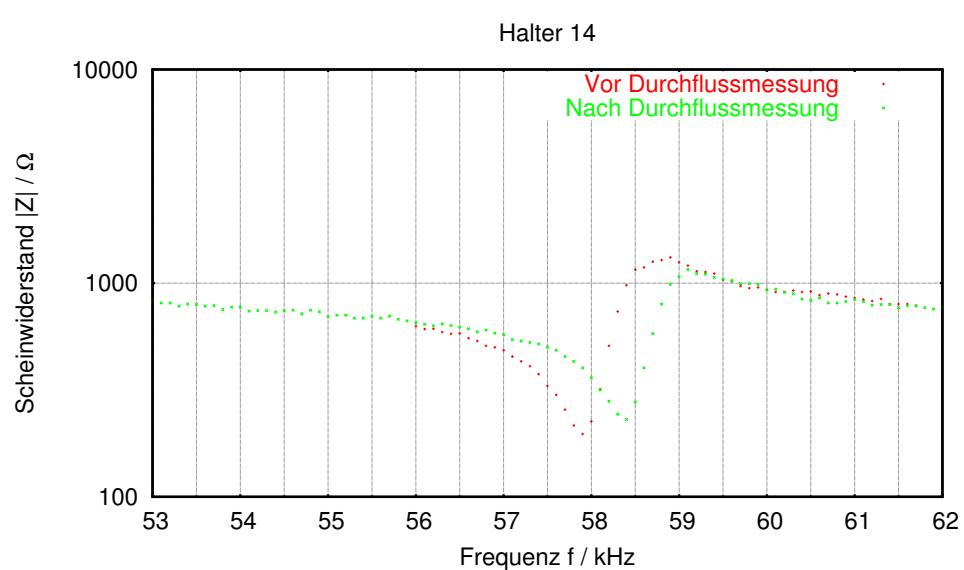
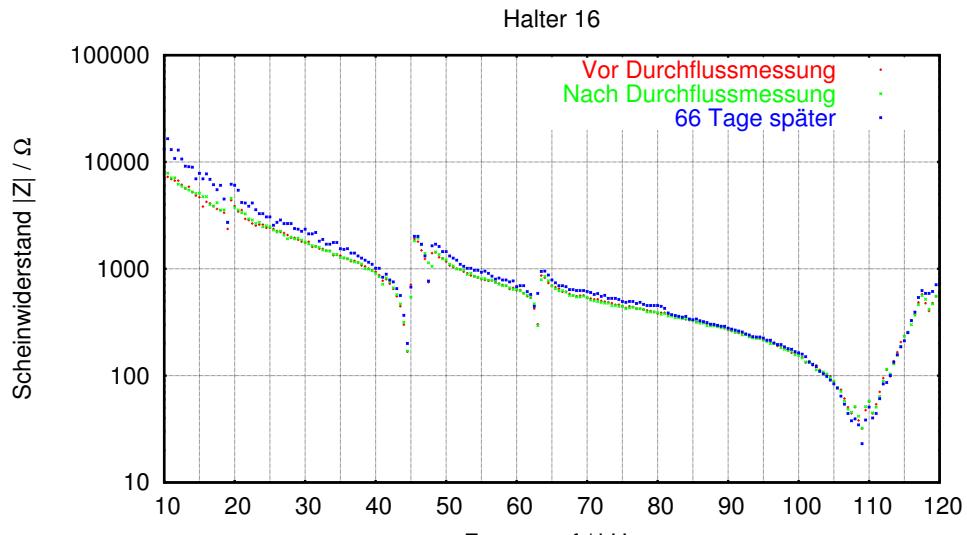
(b) Resonanzfrequenz  $f_3$  bei einer Schrittweite von 100 Hz.

Abbildung A.1.3: Vergleich der Scheinwiderstandsspektren von Halter 14 vor der Durchflussmessung, nach der Durchflussmessung sowie 80 Tage später.



(a) Spektren bei einer Schrittweite von 500 Hz.

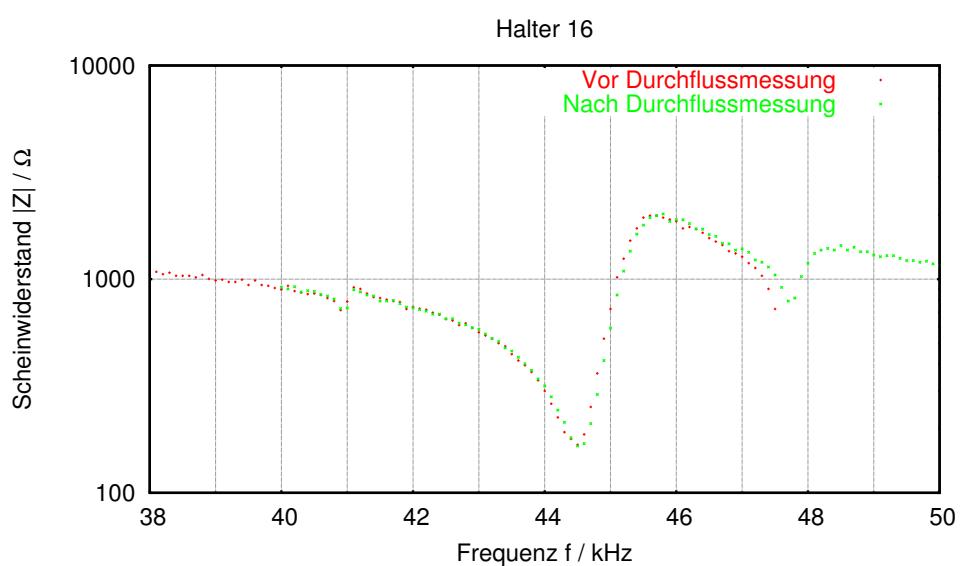
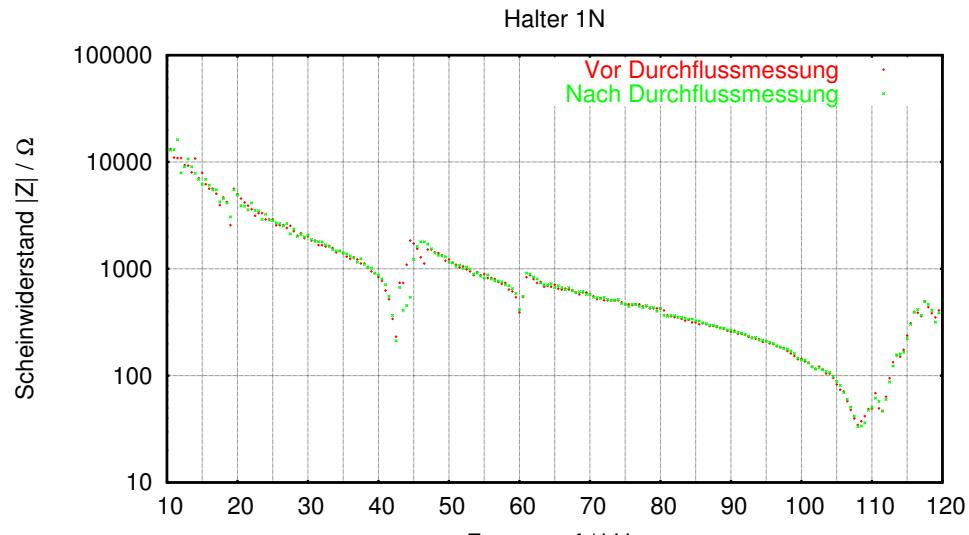
(b) Resonanzfrequenz  $f_2$  bei einer Schrittweite von 100 Hz.

Abbildung A.1.4: Vergleich der Scheinwiderstandsspektren von Halter 16 vor der Durchflussmessung, nach der Durchflussmessung sowie 66 Tage später.



(a) Spektren bei einer Schrittweite von 500 Hz.

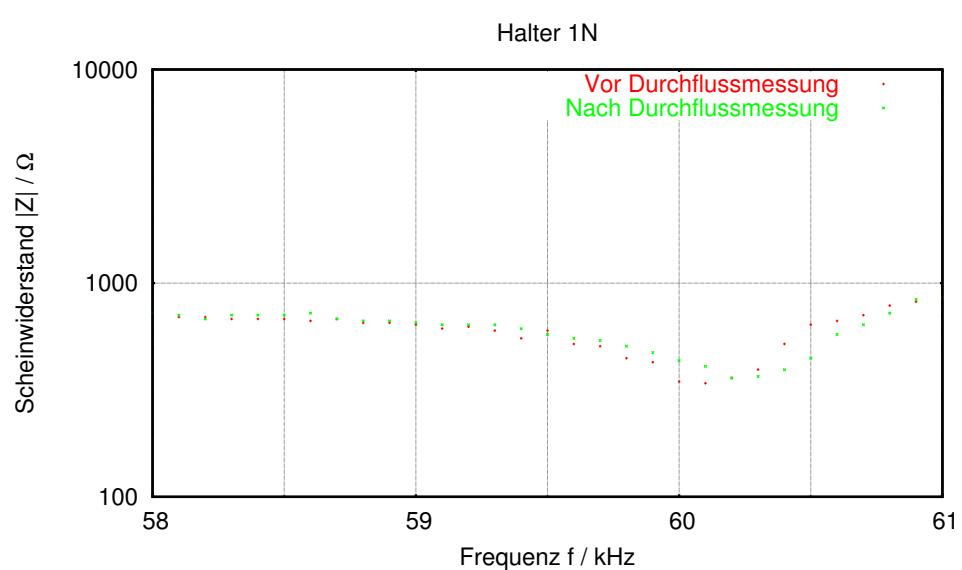
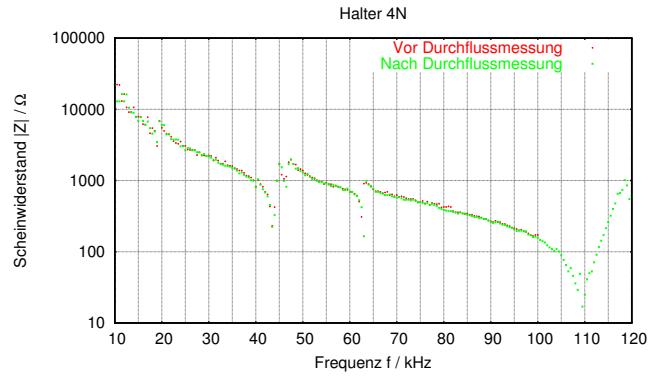
(b) Resonanzfrequenz  $f_3$  bei einer Schrittweite von 100 Hz.

Abbildung A.1.5: Vergleich der Scheinwiderstandsspektren von Halter 1N vor und nach der Durchflussmessung.



(a) Spektren bei einer Schrittweite von 500 Hz.

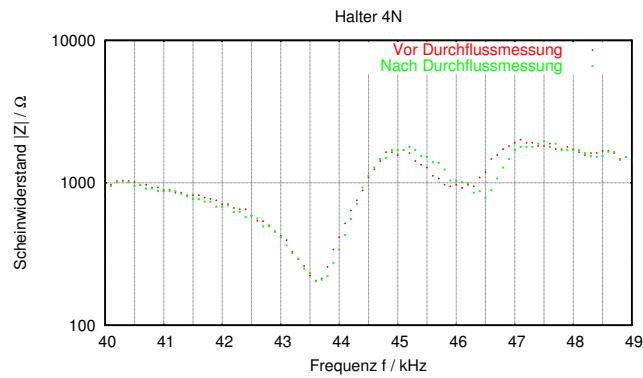
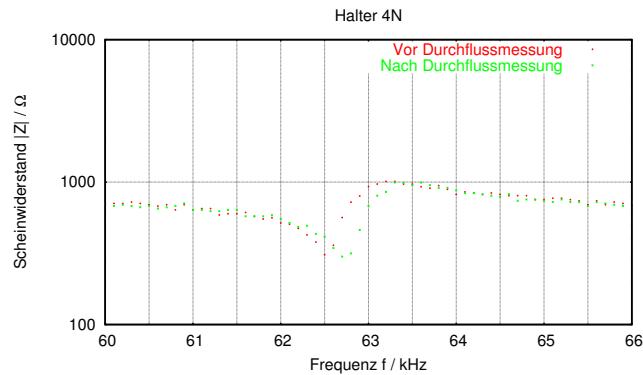
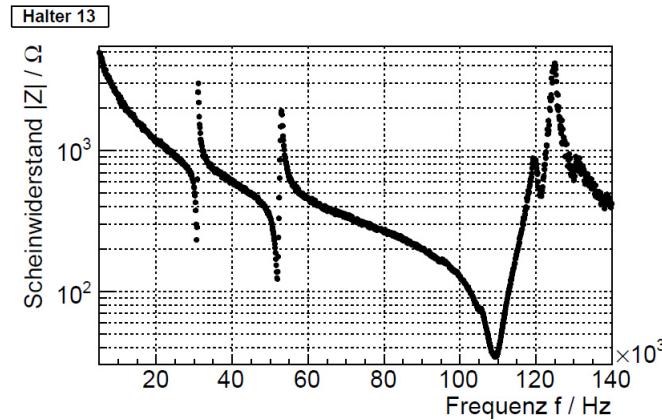
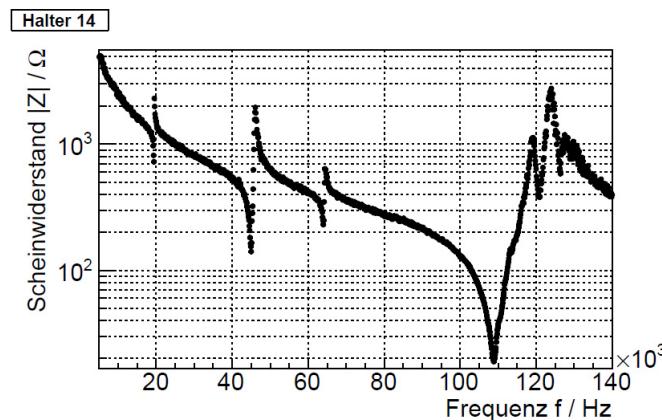
(b) Resonanzfrequenz  $f_2$  bei einer Schrittweite von 100 Hz.(c) Resonanzfrequenz  $f_3$  bei einer Schrittweite von 100 Hz.

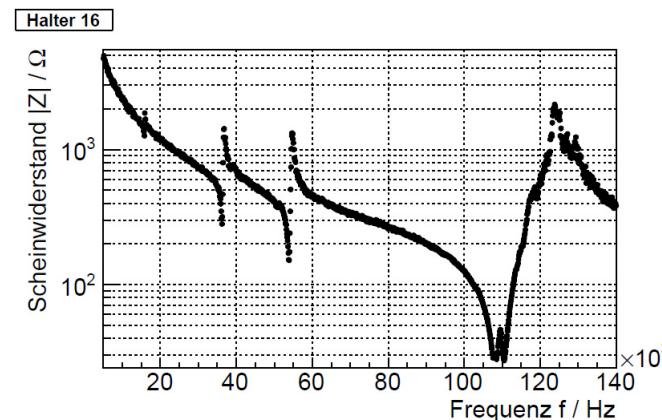
Abbildung A.1.6: Vergleich der Scheinwiderstandsspektren von Halter 4N vor und nach der Durchflussmessung.



(a) Spektrum von Halter 13 als Spektrum der Kategorie II.



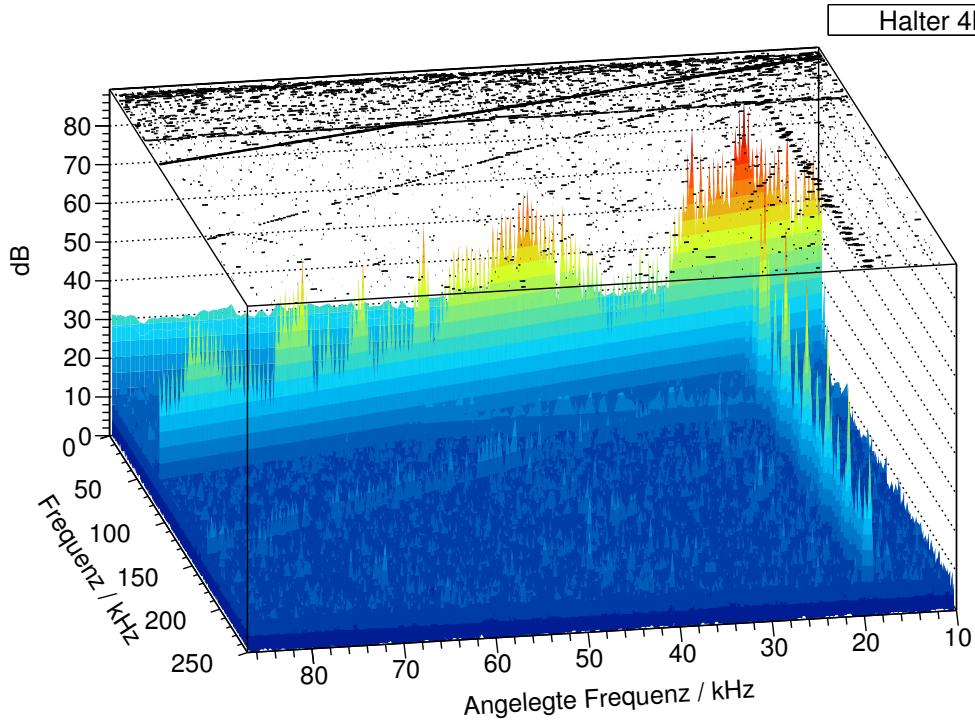
(b) Spektrum von Halter 14 als Spektrum der Kategorie I.



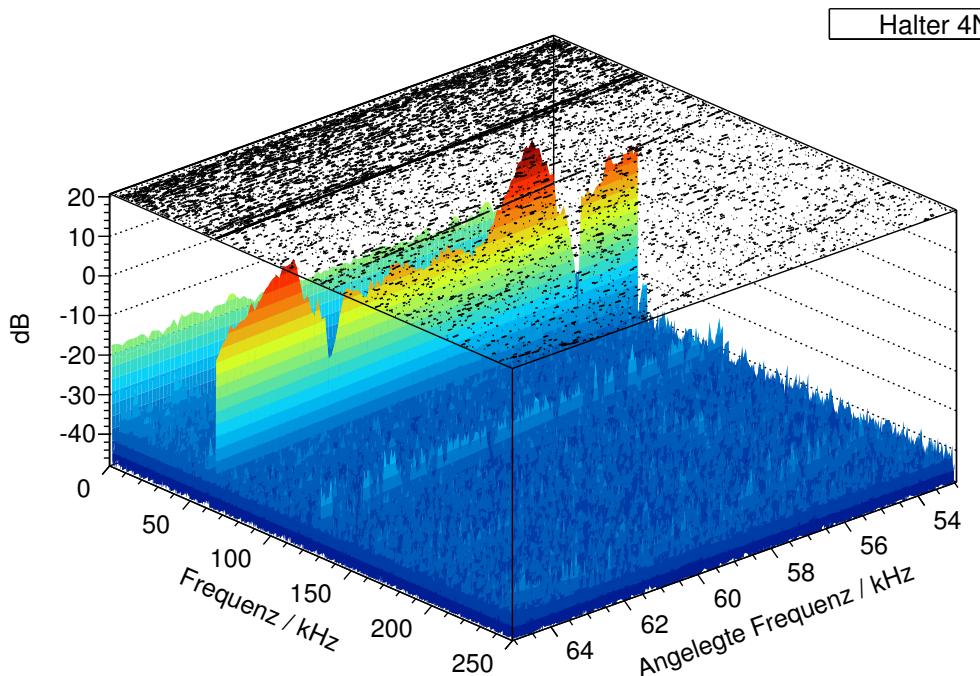
(c) Spektrum von Halter 16 als Spektrum der Kategorie II.

Abbildung A.1.7: Die von F. Schäpers berechneten Scheinwiderstandsspektren zum Vergleich [Sch13b].

## A.2 Die Mikrofonmessung



(a) Leistungsspektrum von Halter 4N. Zur Übersichtlichkeit sind die Werte mit 48 dB addiert und das Minimum auf 0 dB gesetzt worden.



(b) Leistungsspektrum von Halter 4N im Bereich von 60 kHz. Zur Übersichtlichkeit ist das Minimum auf -48 dB gesetzt worden.

Abbildung A.2.1: Leistungsspektren von Halter 4N mit Contour-Plot an der Oberseite. Das Mikrofon befand sich bei der Aufnahme in Kontakt mit dem Piezoaktor.

### A.3 Die Pentanmessung

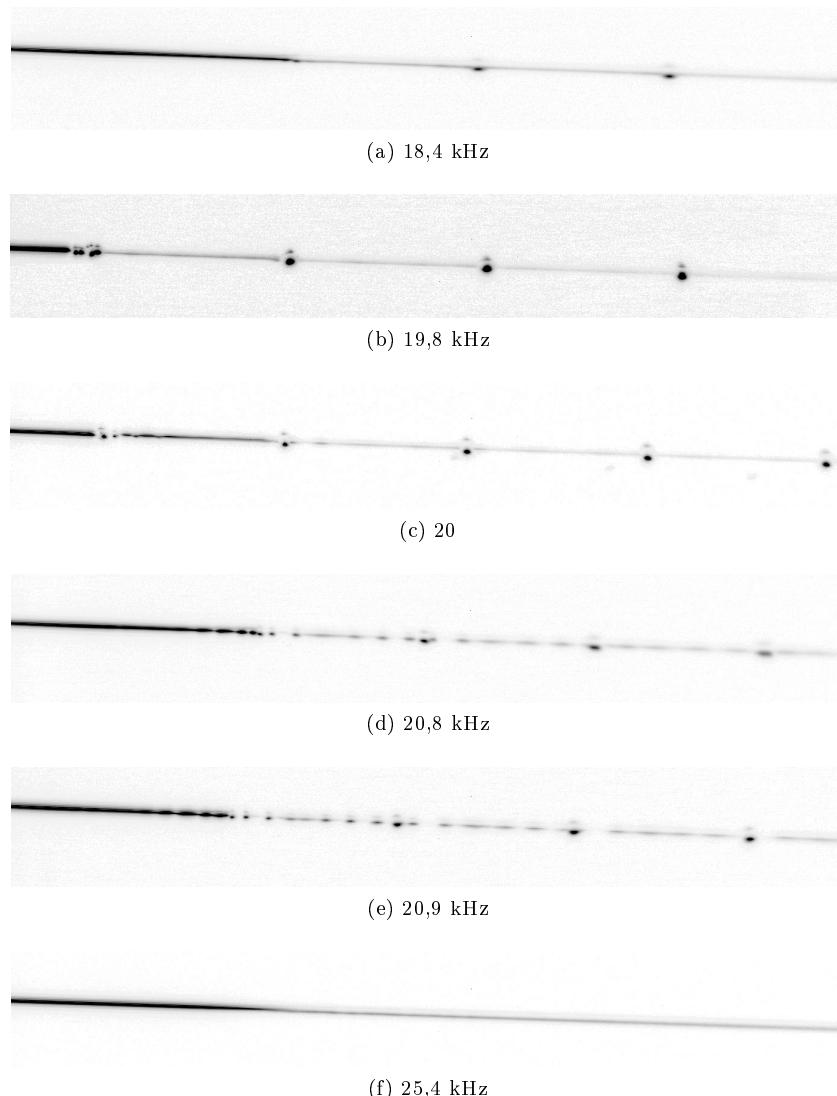


Abbildung A.3.1: Aufnahme der Klasse I von 18,4 kHz bis 25,4 kHz mit dem Long-Distance Microscope Objektiv.

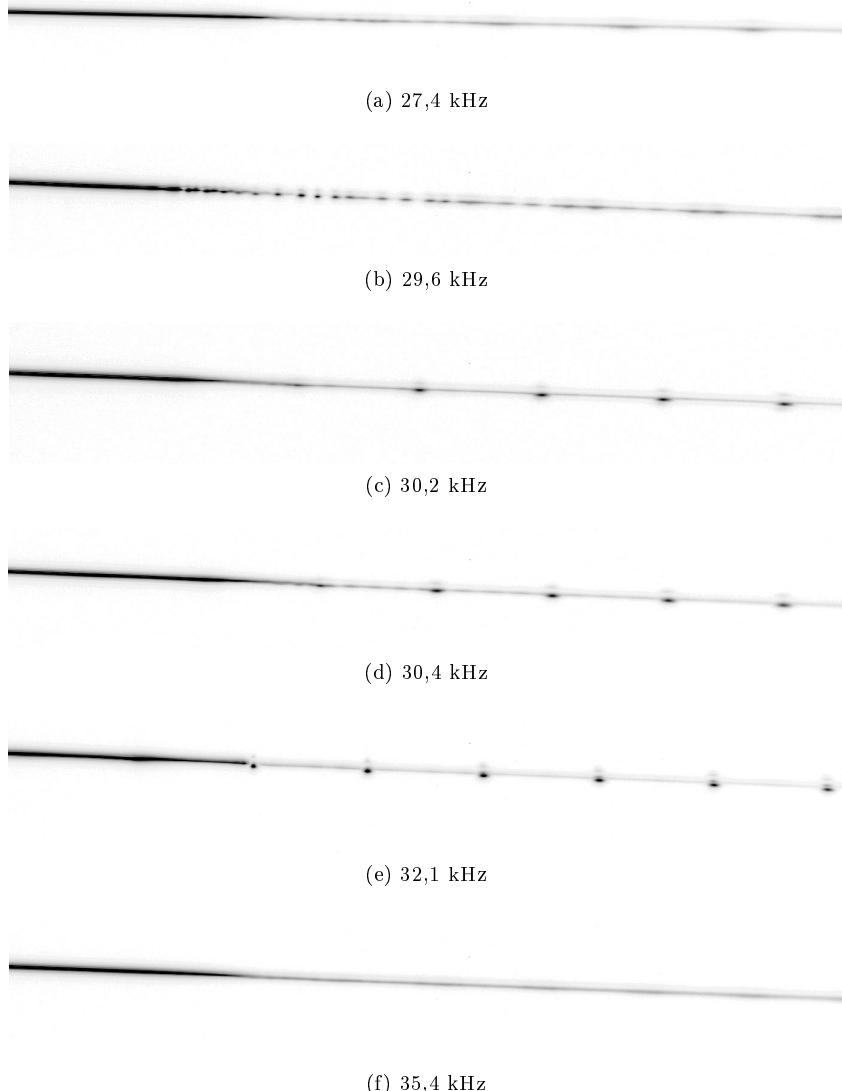


Abbildung A.3.2: Aufnahme der Klasse I von 27,4 kHz bis 35,4 kHz mit dem Long-Distance Microscope Objektiv.

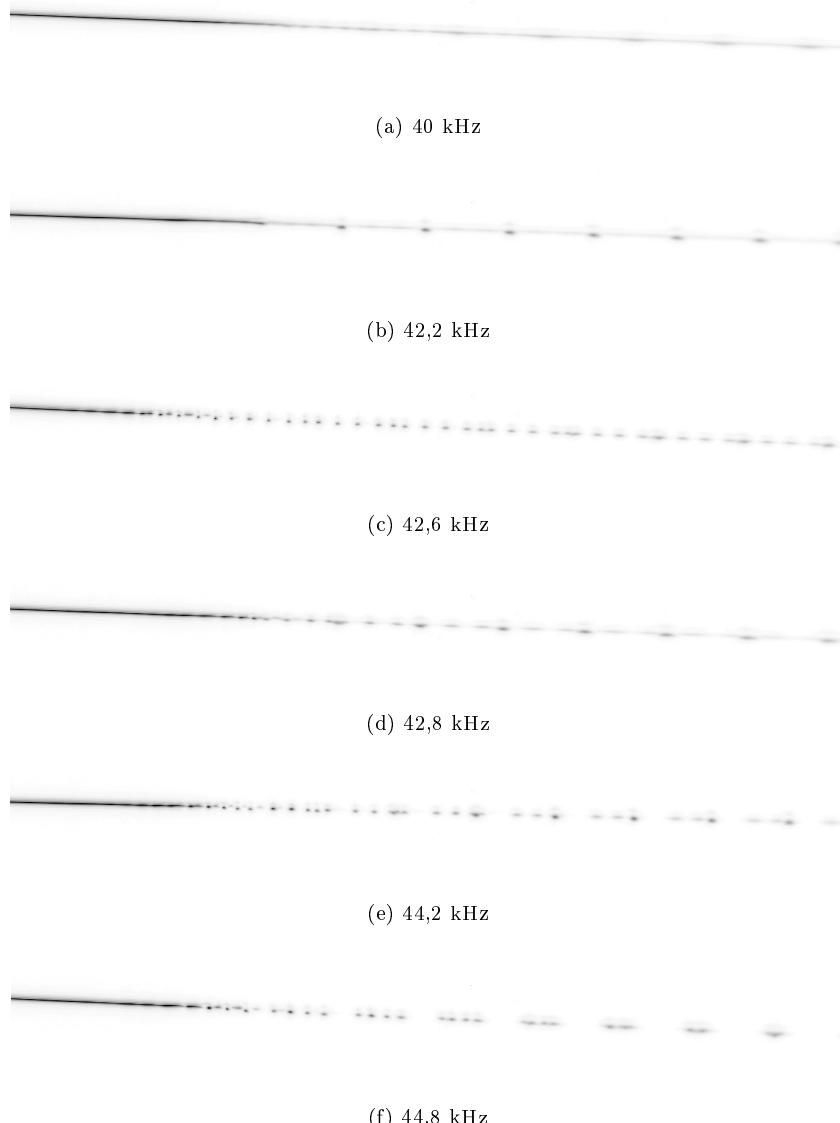


Abbildung A.3.3: Aufnahme der Klasse II von 40 kHz bis 44,8 kHz mit dem Long-Distance Microscope Objektiv.

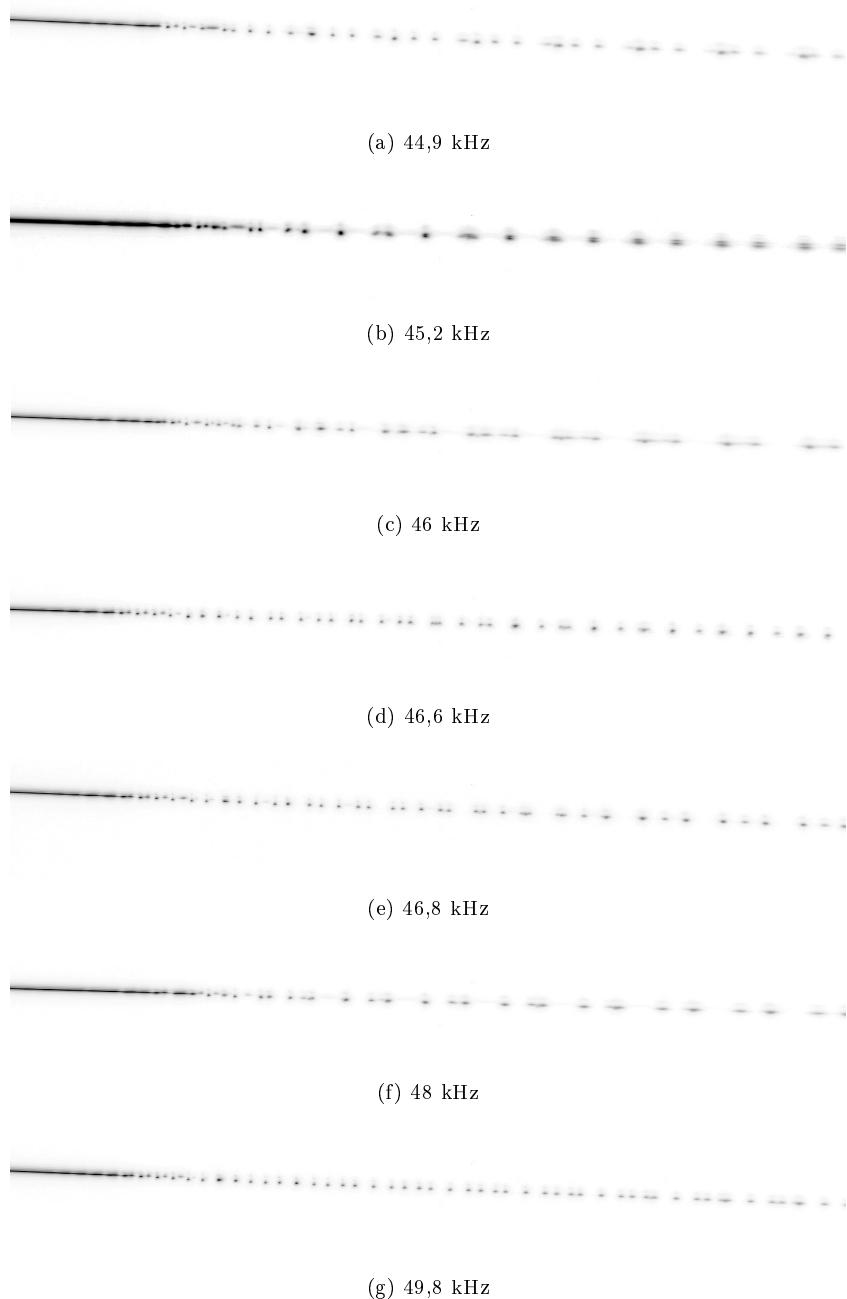


Abbildung A.3.4: Aufnahme der Klasse II von 44,9 kHz bis 49,8 kHz mit dem Long-Distance Microscope Objektiv.

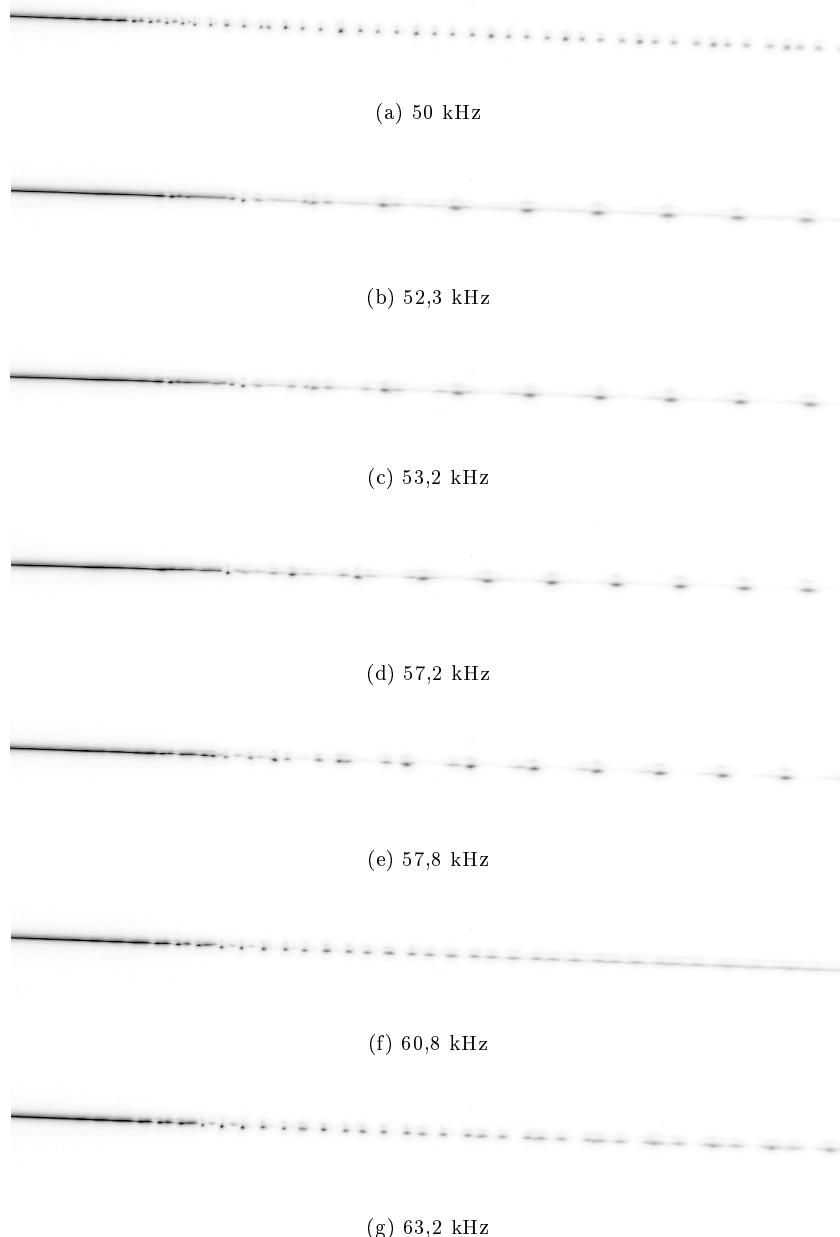


Abbildung A.3.5: Aufnahme der Klasse II von 50 kHz bis 63,2 kHz mit dem Long-Distance Microscope Objektiv.

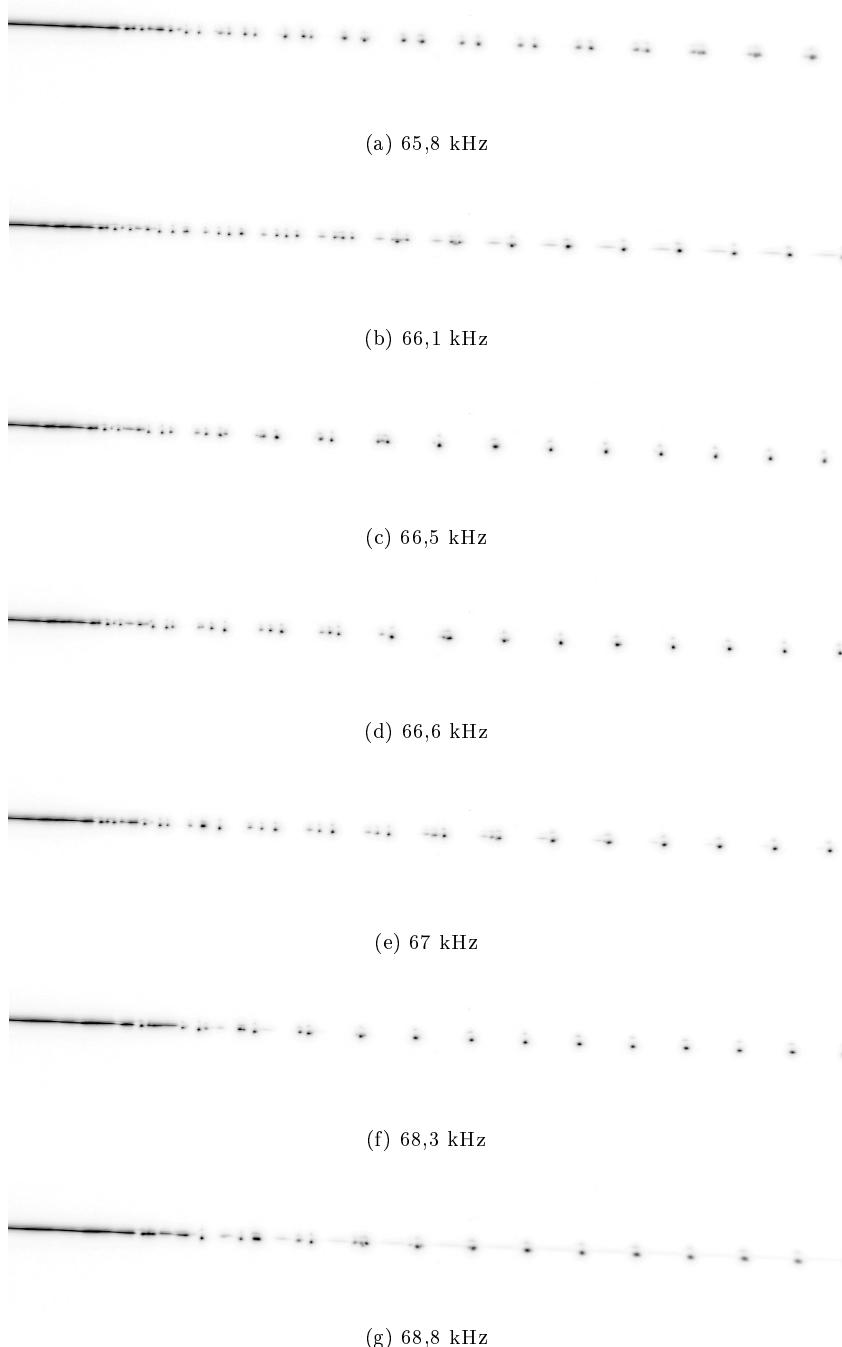


Abbildung A.3.6: Aufnahme der Klasse III von 65,8 kHz bis 68,8 kHz mit dem Long-Distance Microscope Objektiv.

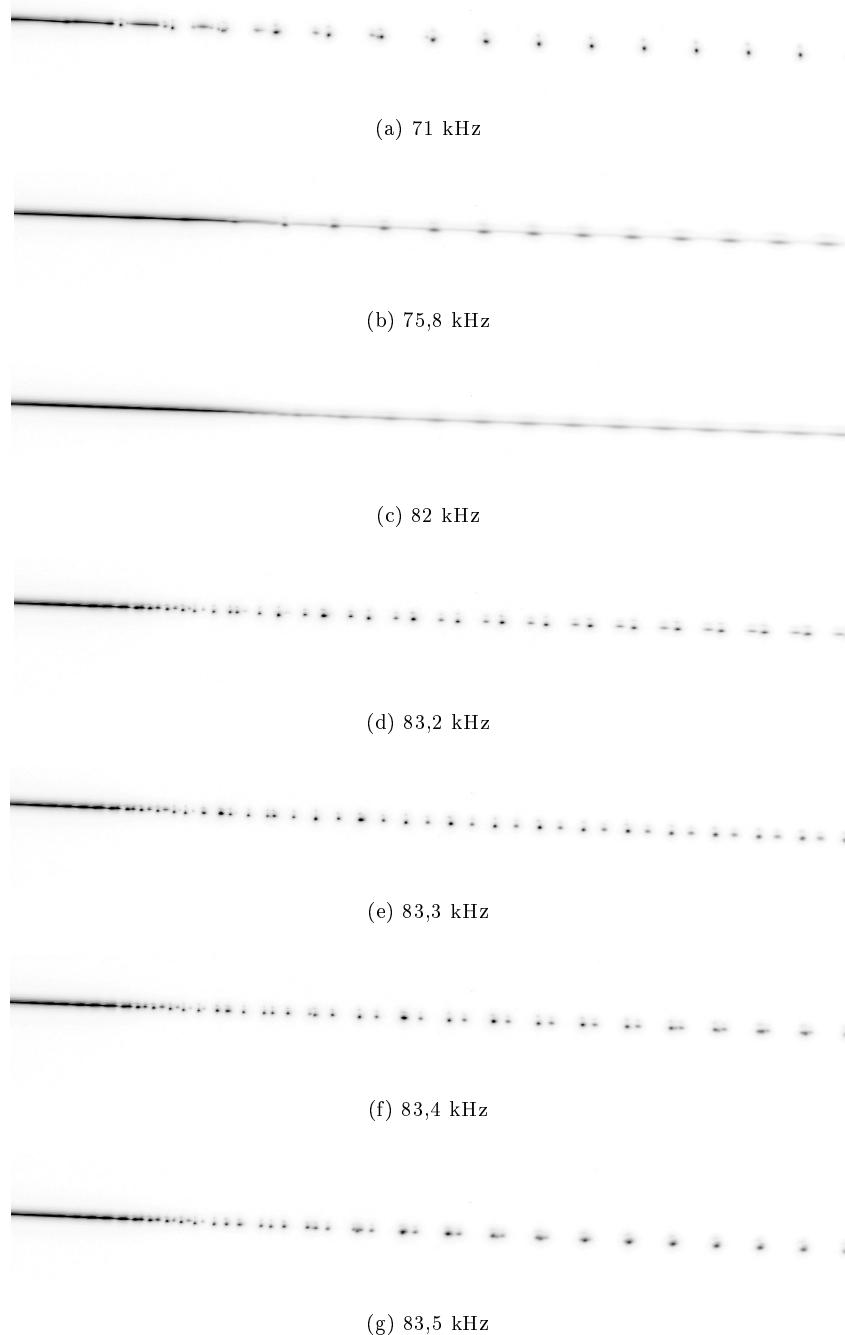


Abbildung A.3.7: Aufnahme der Klasse III von 71 kHz bis 83,5 kHz mit dem Long-Distance Microscope Objektiv.

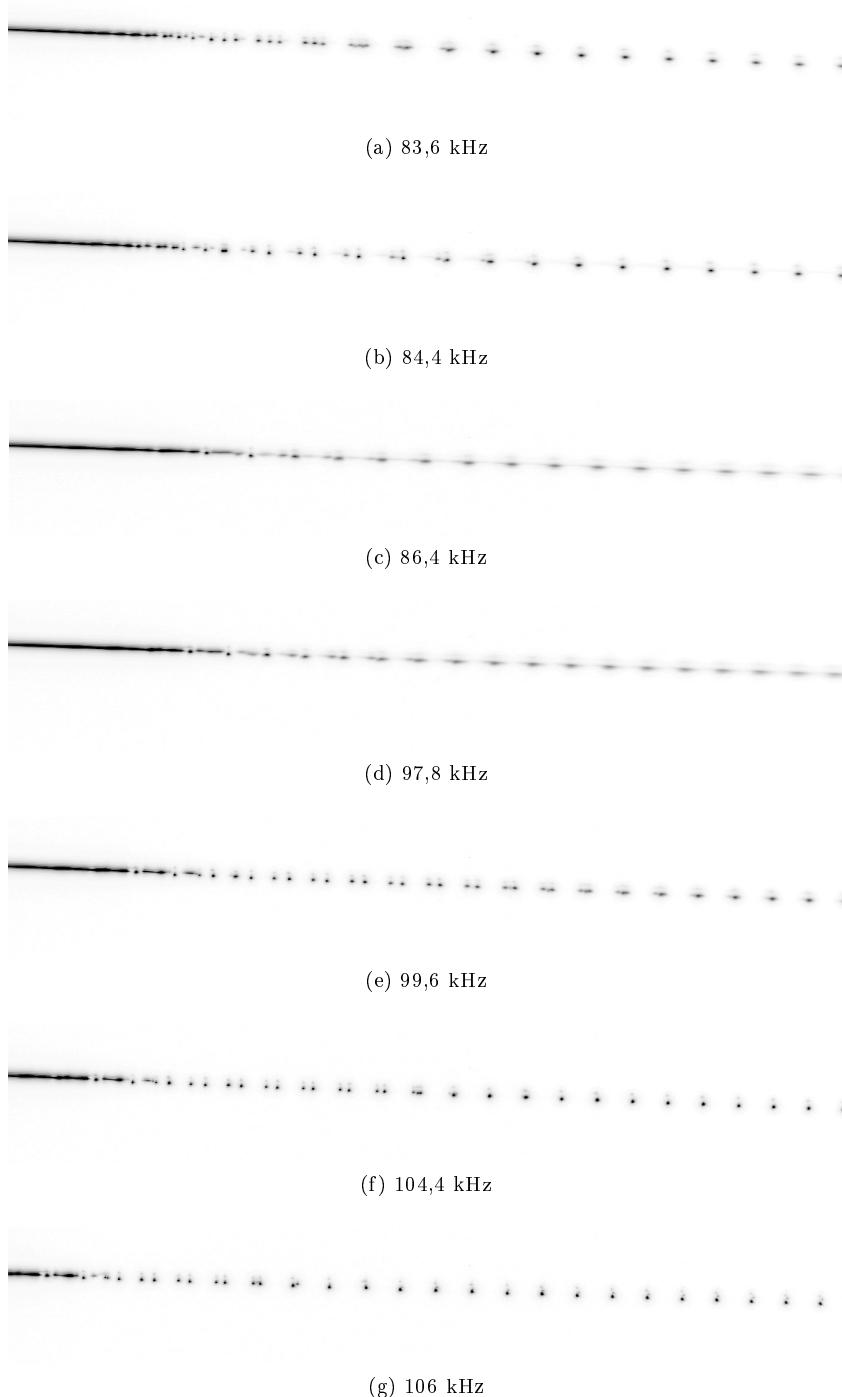


Abbildung A.3.8: Aufnahme der Klasse III von 83,6 kHz bis 106 kHz mit dem Long-Distance Microscope Objektiv.

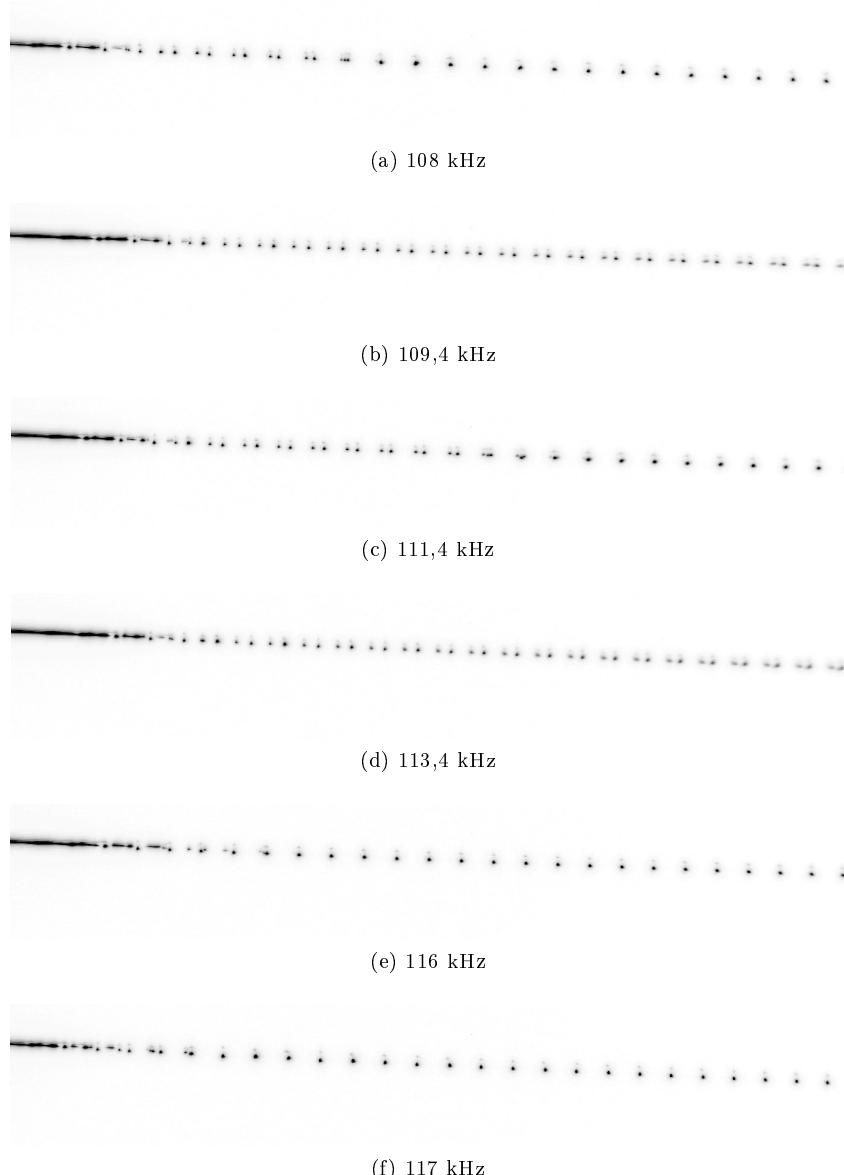


Abbildung A.3.9: Aufnahme der Klasse III von 108 kHz bis 117 kHz mit dem Long-Distance Microscope Objektiv.



# Literaturverzeichnis

[A<sup>+</sup>04] ADAM, H.-H. u. a.: *Prosposal for the Wide Angle Shower Apparatus (WASA) at COSY-Jülich "WASA at COSY"*. Jülich, 2004

[B<sup>+</sup>08] BERGMANN, Florian u. a.: *The WASA-at-COSY pellet target*. Jülich/Münster, 2008. – IKP Jülich Annual Report 2008

[Dem13] DEMMICH, Kay: *Energiekalibrierung des Vorwärtsdetektors an WASA-at-COSY unter besonderer Berücksichtigung der Reaktion p + d →<sup>3</sup> He + η'*. Münster, 2013 (Masterarbeit)

[Deu13] DEUTSCHES ELEKTRONEN SYNCHROTRON DESY: *Teilchenphysik*. Hamburg, 2013. – <http://www.teilchenphysik.de>, Stand 17.07.2013

[E<sup>+</sup>96] EKSTRÖM, Kurt u. a.: *Hydrogen pellet targets for circulating particle beams*. Uppsala, 1996. – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 371

[EfuoJ] EFUNDA: *Piezoelectric Impedance*. o.O., o.J.. – [http://www.efunda.com/materials/piezo/electronics/elec\\_impedance.cfm](http://www.efunda.com/materials/piezo/electronics/elec_impedance.cfm), Stand 18.07.2013

[GeroJ] GERMER, Rudolf: *Farbige LED Blitze für Stroboskopische Videographie*. Berlin, o.J.

[Han09] HANS CALÉN AND KJELL FRANSSON AND ELIN HELLBECK: *Design Ideas for pellet tracking systems for PANDA and WASA*. Uppsala, 2009

[Hej13] HEJNY, Volker: *WASA at COSY*. o.O., 2013. – <http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/wasa/index.shtml>, Stand 01.08.2013

[Hus12] HUSMANN, Christina: *Untersuchungen zur Optimierung der Dropleterzeugung innerhalb des Pellettargets des Experimentaufbaus WASA-at-COSY*. WWU Münster, 2012 (Diplomarbeit)

[Ins11] INSTITUT FÜR KERNPHYSIK: *Annual Report 2011*. Jülich, 2011

[Kay04] KAYSER, Rainer: *Die Entdeckung der Atome*. o.O., 2004. – <http://www.weltderphysik.de/gebiete/atome/geschichte/atomentdeckung/>, Stand 2.8.2013

[KesoJ] KESSLER, Robert: *Simulation der Dynamik eines Piezoelements, Frequenzbereich, Zeitbereich, Aufstellen des Ersatzschaltbildes*. Karlsruhe, o.J.. – [http://www.home.hs-karlsruhe.de/\\_kero0001/piezo/piezo4.pdf](http://www.home.hs-karlsruhe.de/_kero0001/piezo/piezo4.pdf), Stand 18.07.2013

[Mai97] MAIER, Rudolf: *Cooler Synchrotron - performance and perspective*. Jülich, 1997. – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 390

[MieoJ] MIETKE, Detlef: *Funktionsweise von Kondensatormikrofonen*. o.O., o.J.. – [http://www.elektroniktutor.de/akustik/c\\_mikro.html](http://www.elektroniktutor.de/akustik/c_mikro.html), Stand 15.08.2013

[MKS96] MKS INSTRUMENTS: *MKS Baratron Type 122A Absolute Pressure Gauge*. o.O., 1996

[Mor07] MORGAN ELECTRO CERAMICS: *Piezoelectric Brochure - Piezoelectric Ceramics*. o.O., 2007. – <http://www.morganelectroceramics.com/resources/literature/>, Stand 18.07.2013

[MoroJa] MORGAN ELECTRO CERAMICS: *Guide to Piezoelectronic and Dielectric Ceramic*. o.O., o.J.. – <http://www.morganelectroceramics.com/resources/guide-to-piezoelectric-dielectric-ceramic/>, Stand 18.07.2013

[MoroJb] MORGAN ELECTRO CERAMICS: *Piezoelectric Standard Tubes*. o.O., o.J.. – <http://www.morganelectroceramics.com/products/piezoelectric/piezoelectric-standard-tubes/>, Stand 18.07.2013

[Nat11] NATIONAL INSTRUMENTS: *Power Spectrum VI*. o.O., 2011. – [http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361H-01/lvanls/power\\_spectrum\\_sxx/](http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361H-01/lvanls/power_spectrum_sxx/), Stand 12.08.2013

[Nat12] NATIONAL INSTRUMENTS: *Amplitude and Level Measurements Express VI*. o.O., 2012. – [http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361J-01/lvexpress/amp\\_and\\_level\\_measurements/](http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361J-01/lvexpress/amp_and_level_measurements/), Stand 12.08.2013

[Nor04] NORMAN, Gunnar: *Pellet Target Documentation*. Jülich, 2004. – technischer Bericht, internes Dokument

[Oer96] OERLIKON LEYBOLD VACUUM: *Total Pressure Gauges Vacuum Gauges and Control Instruments  $10^{-12}$  – 2000 mbar ( $10^{-12}$  Torr) Calibration Service*. o.O., 1996. – Excerpt from the Oerlcon Leybold Vacuum full line Catalog 2010 Product Section C16

[PCO10] PCO: *User manual- pco.pixelfly usb*. Kelheim, 2010

[Pea11] PEAKTECH: *PeakTech 4055 Bedienungsanleitung DDS Funktionsgenerator*. o.O., 2011

[Sch13a] SCHEPERS, Florian: o.O., 2013. – Private Kommunikation (Email)

[Sch13b] SCHEPERS, Florian: *Untersuchungen zum Düsensystem des WASA-at-COSY Pelletttargets*. Münster, 2013 (Bachelorarbeit)

[T+11] TÄSCHNER, Alexander u. a.: *High density cluster jet target for storage ring experiments*. Münster, 2011

[TekoJ] TEKTRONIX: *Serie TDS1000B und TDS2000B Digitalspeicher-Oszilloskope Benutzerhandbuch*. Beaverton, o.J.

[The07] THE ENGINEERING TOOLBOX: *Chemical, Physical and Thermal Properties of Nitrogen - N<sub>2</sub>*. o.O., 2007. – [http://www.engineeringtoolbox.com/nitrogen-d\\_1421.html](http://www.engineeringtoolbox.com/nitrogen-d_1421.html), (stand 18.08.2013)

[TheoJ] THE ENGINEERING TOOLBOX: *Water - Dynamic and Kinematic Viscosity*. o.O., o.J.. – [http://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d\\_596.html](http://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html), (stand 29.08.2013)

[V+07] V., Gostishchev u. a.: *INTERNAL TARGET EFFECTS IN THE ESR STORAGE RING WITH COOLING*. Bad Kreuznach, 2007

[W+64] WEAST, Robert C. u. a.: *Handbook of Chemistry and Physics*. Cleveland, 1964

[WAW82] WUTZ, Maximilian ; ADAM, Hermann ; WALCHER, Wilhelm: *Theorie und Praxis der Vakuumtechnik*. Wiesbaden, 1982