

# ENTWICKLUNG UND INBETRIEBNAHME EINES GASSYSTEMS ZU UNTERSUCHUNG EINER CBM-TRD KAMMER UNTER GASFLUSS

Bachelorarbeit im Fach Physik

Institut für Kernphysik

WWU Münster

Luisa Faber

betreut von

CHRISTIAN KLEIN-BÖSING

und

ANTON ANDRONIC

29. November 2021

Erster Gutachter: Apl. Prof. Dr. Christian Klein-Bösing

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Anton Andronic

# Inhaltsverzeichnis

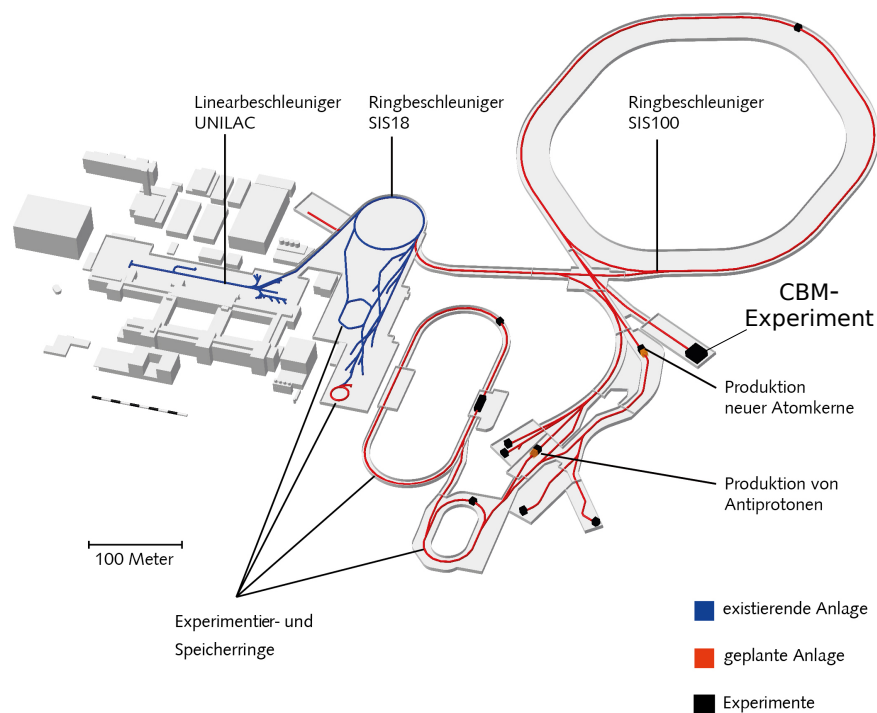
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Übergangsstrahlungsdetektoren . . . . .	5
2.2	Die TRD-Kammer . . . . .	7
2.3	Der CBM-TRD und das Gassystem . . . . .	8
2.4	Elektrotechnische Grundlagen . . . . .	10
2.5	Gasfluss . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Aufbau</b>	<b>13</b>
3.1	Einzelkomponenten . . . . .	13
3.1.1	Differenzdrucksensor . . . . .	15
3.1.2	Flussmessgerät . . . . .	16
3.1.3	Flussregler . . . . .	17
3.1.4	Sauerstoffsensor . . . . .	17
3.1.5	Arduino . . . . .	17
3.1.6	Ventil und Pneumatische Steuereinheit . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Schaltung</b>	<b>21</b>
4.1	Steuerung des Ventils . . . . .	21
4.2	Schaltung zur Digitalisierung der Messwerte . . . . .	23
4.3	Gesamte Schaltung . . . . .	26
4.4	Auslese und Steuerung . . . . .	28
4.5	Testen und optimieren der Schaltung . . . . .	30
4.5.1	Flussmessgerät . . . . .	30
4.5.2	Drucksensoren . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Methoden, Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>41</b>
5.1	Dichtigkeitsmessung . . . . .	41
5.1.1	Methoden . . . . .	41
5.1.2	Ergebnisse . . . . .	41
5.2	Messung der Auswölbung . . . . .	43
5.2.1	Methoden . . . . .	43
5.2.1.1	Methode 1 . . . . .	45
5.2.1.2	Methode 2 . . . . .	46

5.2.1.3	Vergleich der beiden Methoden . . . . .	46
5.2.1.4	Auslenkung der Carbon-Leisten . . . . .	48
5.2.2	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	50
5.3	Überdruckabbau in der Dummykammer . . . . .	62
5.3.1	Methoden . . . . .	62
5.3.2	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	62
5.3.3	Umgang mit der Undichtigkeit . . . . .	67
5.4	Messung des Druckverlusts . . . . .	70
5.4.1	Methoden . . . . .	70
5.4.2	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>77</b>
<b>A</b>	<b>Unsicherheitsbetrachtung</b>	<b>81</b>
A.1	Digitalisierung . . . . .	81
A.2	Auswölbung . . . . .	82
A.3	Überdruckabbau . . . . .	84
<b>B</b>	<b>Anhang</b>	<b>85</b>
B.1	Digitalisierung . . . . .	85
B.1.1	Testen und Optimieren der Messung mit dem Flussmessgerät . . . . .	85
B.1.2	Testen und Optimieren der Messung mit den Differenzdrucksensoren . . . . .	86
B.2	Auswölbungsmessung . . . . .	94
B.2.1	Messwerte der Sensoren . . . . .	94
B.2.2	Gemessene Auslenkungen . . . . .	106
B.2.3	Parabelfits . . . . .	121
B.2.4	Maximale Auslenkungen . . . . .	142
B.3	Messung des Druckverlusts . . . . .	144
B.3.1	Messwerte der Sensoren . . . . .	144
B.4	Messung zum Überdruckabbau . . . . .	169
B.4.1	Sättigungsdrücke . . . . .	169
	<b>Literatur</b>	<b>173</b>



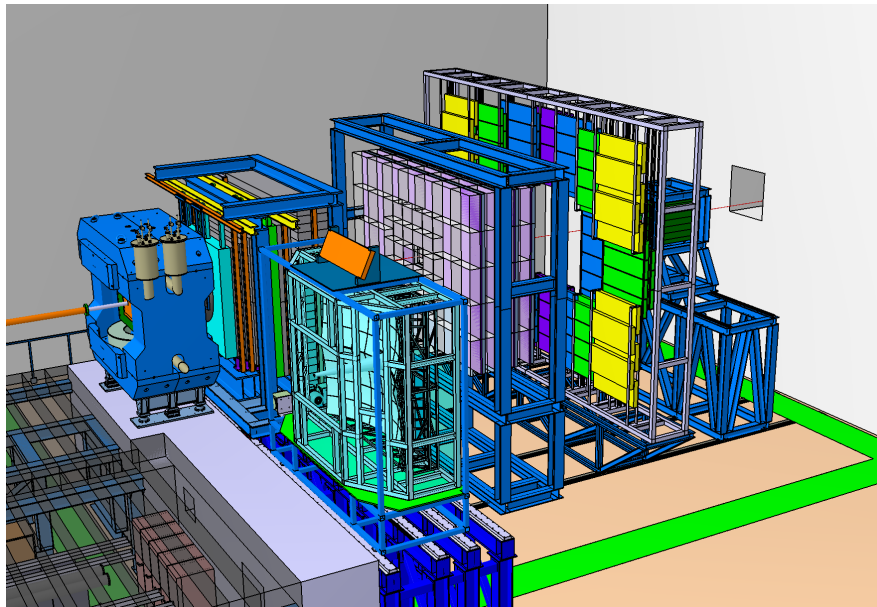
# 1 Einleitung

Am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt wird eine neue Beschleunigeranlage gebaut. Das neue Beschleunigerzentrum, Facility for Antiproton and Ion Research in Europe (kurz: FAIR), erweitert vorhandene Anlagen der GSI. Ein Komplex mit einem Linear- und dem vorhandenen Ringbeschleuniger SIS18 dient als Vorbeschleuniger für den neuen Ringbeschleuniger, den SIS100. Die Anordnung ist in Abbildung 1.1 zu sehen. Durch die Beschleunigung von Ionen und Antiprotonen auf bis zu 99 % der Lichtgeschwindigkeit sollen damit Teilchenstrahlen hoher Intensität und Qualität erzeugt werden. Die Teilchenstrahlen werden in neu entstehenden Experimenten genutzt. Außerdem werden zur Speicherung und Mehrfachverwendung von Teilchen mehrere Speicher-, sowie Experimentierringe angebaut [1].



**Abbildung 1.1:** Die Facility for Antiproton Research in Europe (FAIR) ist ein Beschleunigerkomplex. Dort werden an einen vorhandenen Linear- und einen Ringbeschleuniger ein weiterer Ringbeschleuniger, Experimentier-, sowie Speicherringe und Experimente gebaut. Das Experiment unter dem Ringbeschleuniger ist das CBM-Experiment. Entnommen aus [1].

Eines der entstehenden Experimente ist das Compressed-Baryonic-Matter-Experiment (kurz: CBM-Experiment). In Abbildung 1.1 ist dieses unterhalb des SIS100 zu sehen. Es handelt sich um ein Fixed-Target-Experiment, welches mit Teilchenstrahlen des SIS100 versorgt wird. Hochenergetische Kern-Kern- und Proton-Kern-Kollisionen dienen der Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas (kurz: QGP). Dies soll Aufschlüsse über einen bestimmten Bereich des Phasendiagramms der starken Wechselwirkung geben. In diesem Bereich zeichnet sich die Kernmaterie durch ihre hohe Baryonen-Dichte und niedrige Temperatur, verglichen mit anderen Kollisionsexperimenten, aus. Unter anderem wird erhofft, den Materiezustand im Kern von Neutronensternen charakterisieren zu können. Für die Statistik in der Untersuchung seltener Ereignisse („rare probes“) sollen Reaktionsraten von bis zu 10 MHz erreicht werden, weswegen der experimentelle Aufbau hoher Strahlenbelastung Stand halten muss [2]. Der Aufbau des Experiments ist in Abbildung 1.2 zu sehen. Dazu gehören acht Detektoren, die in und hinter einem Dipolmagneten platziert werden. Im Dipolmagneten befindet sich das Target. Das Magnetfeld dient der Impulsmessung elektrisch geladener Teilchen. Die Detektoren erfüllen unterschiedliche Aufgaben, wie zum Beispiel die Flugzeitbestimmung, oder die Identifizierung und Spurverfolgung unterschiedlicher Teilchen. Einer der Detektoren ist der Transition-Radiation-Detektor (kurz: TRD). Dieser befindet sich 4,1 m bis 5,9 m hinter dem Target und dient der Teilchenbahnbestimmung, sowie der Unterscheidung von Elektronen und Pionen mit Impulsen von mindestens  $1,0 \frac{\text{GeV}}{c}$ . In Abbildung 1.2 ist er in violett eingezeichnet [3].



**Abbildung 1.2:** Zu sehen ist der Aufbau des CBM-Experiments. Mehrere Detektoren werden im Strahlengang hinter dem Target platziert. Einer davon ist der Transition-Radiation-Detektor, der in violett eingezeichnet ist. Dieser dient im Wesentlichen der Identifizierung und Spurverfolgung von Elektronen und Pionen. Entnommen aus [2].

Der TRD besteht aus mehreren Vieldraht-Proportional-Kammern. Diese werden von Gas durchströmt. In dieser Arbeit werden die Gasflusseigenschaften durch die Detektorkammern untersucht, insbesondere werden die Druckwiderstände bei Anreihung von Kammern untersucht. Zusätzlich wird auch das Zeitverhalten der Kammern infolge von äußerer Druckänderung untersucht

Diese Untersuchungen sind auf Grund der Entwicklung neuer Gasanschlüsse an den Kammern, sowie einer Umstellung des Schlauchinnendurchmessers von 4 mm auf 8 mm notwendig. Sie werden an im Rahmen dieser Arbeit gebauten Testkammern durchgeführt, die zu diesem Zweck gemäß neuer Auslegung angefertigt wurden.

Außerdem soll die Verformung der Folie, die das Eintrittsfenster der Kammer bildet, abgeschätzt werden. Dies dient der Überprüfung der Einhaltung von Betriebsvorgaben, welche zur zuverlässigen Rekonstruktion von Ereignissen aufgestellt worden sind. Anhand dieser Untersuchungen wird überprüft, Überdrücke welcher Höhe in der Kammer herrschen dürfen.

Die Auswirkungen der neuen Bauteile und die Auslenkung werden untersucht. Anhand der Ergebnisse werden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Anforderungen Einschränkungen des Intervalls der möglichen Gasflüsse, mit denen die Kammer durchströmt wird, vorgenommen. Dies ist von essenzieller Bedeutung für die Auslegung des Gassystems des TRDs.



## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Übergangsstrahlungsdetektoren

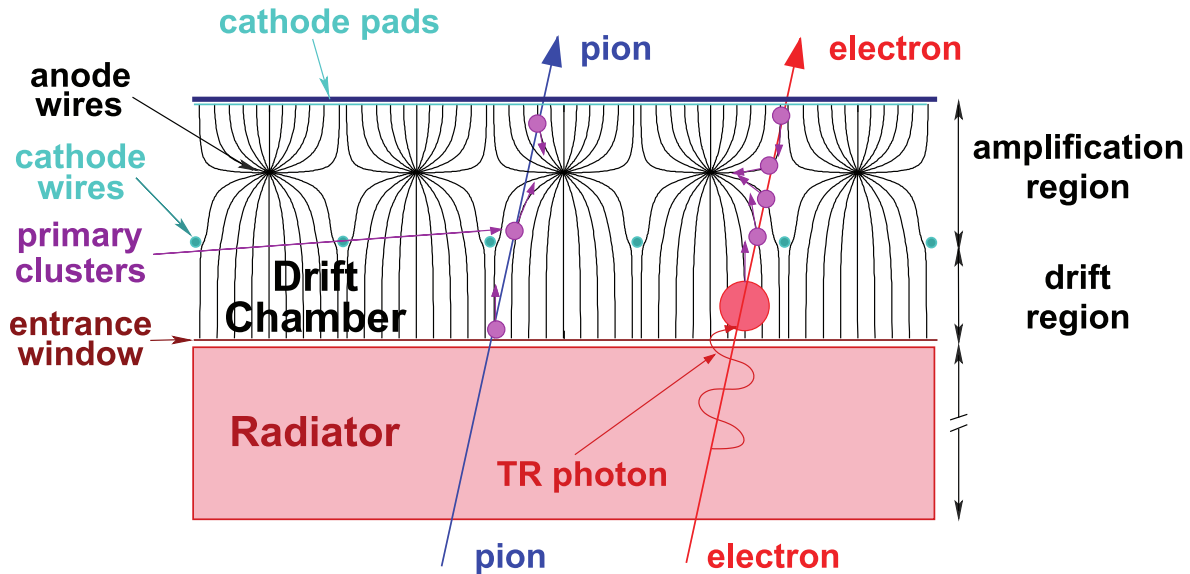
Übergangsstrahlungsdetektoren, wie der hier beschriebene CBM-TRD, nutzen Übergangsstrahlung, um hochrelativistische Teilchen zu charakterisieren [4].

Übergangsstrahlung entsteht beim Übergang eines Teilchens zwischen zwei Medien mit unterschiedlicher Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$ . Im Medium wird eine Spiegelladung erzeugt, die gemeinsam mit dem geladenen Teilchen einen elektrischen Dipol bildet. Vom Dipol emittierte Photonen bilden die Übergangsstrahlung. Deren Intensität ist abhängig vom Lorentz-Faktor  $\gamma = \frac{p}{mv}$  des Teilchens. Dadurch können Teilchen mit gleichem Impuls aber unterschiedlicher Masse anhand der Intensität der Übergangsstrahlung unterschieden werden [5, S. 7]. Praktisch geht es vor allem um die Unterscheidung von Teilchen mit Erzeugung von Übergangsstrahlung von solchen ohne. Anhanddessen werden im CBM-Experiment hochrelativistische Elektronen und Positronen, welche Übergangsstrahlung erzeugen von geladenen Pionen, welche keine Übergangsstrahlung erzeugen, unterschieden.

Die Übergangsstrahlung wird in einem Radiator erzeugt, in dem die Teilchen sich durch Materialien unterschiedlicher Dielektrizität bewegen. Zur Detektion der TR-Photonen wird im CBM-Experiment eine Vieldrahtproportionalkammer (engl.: Multi-Wire-Proportional-Chamber, kurz: MWPC) verwendet. Der Aufbau aus einer MWPC hinter einem Radiator ist in Abbildung 2.1 zu sehen [2, S. 35].

In einer MWPC sind mittig zwischen zwei Kathodenplatten Anodendrähte angebracht. Der Bereich zwischen den beiden Kathodenplatten wird Verstärkungsbereich genannt. Hier handelt es sich um eine Drift-MWPC. Bei dieser ist zusätzlich einseitig eine Schicht aus Kathodendrähten angebracht. Dadurch wird das Volumen der Kammer in zwei Bereiche unterteilt. Den Driftbereich und den Verstärkungsbereich [6, S. 26 f.]. In dem Volumen der Kammer befindet sich neben den Drähten eine Gasmischung aus einem Edelgas und einem Löschgas [7, Kapitel 12.1].

Durch das Eintrittsfenster eintretende geladene Teilchen ionisieren Gasmoleküle durch Stoßionisation. Die Ionisation resultiert in Elektronen-Ionen-Paare. Weiterhin entstehen durch



**Abbildung 2.1:** Dargestellt ist ein Übergangsstrahlungsdetektor. Bei Durchgang der Strahlung durch den Radiator entsteht Übergangsstrahlung. Eine Vieldrahtproportionalkammer dient zur Detektion der Strahlung. Entnommen aus [2].

die Absorption der TR-Photonen im Driftbereich Elektronen-Ionen-Paaren. Durch das elektrische Feld, welches in der Kammer herrscht, werden im Verstärkungsbereich die Elektronen zu den Anodendrähten und die Ionen zu den Kathoden hin beschleunigt. Die durch die Beschleunigung erhöhte kinetische Energie der Elektronen führt zu sekundären Ionisationsprozessen. Dabei entstehende Elektronen werden wieder beschleunigt, so dass sie weitere Gasatome ionisieren können. Dieser Effekt wird als die Entstehung einer Lawine bezeichnet. Die Verstärkung wird mit einem Verstärkungsfaktor charakterisiert [7, Kapitel 4].

Die durch die Lawinen entstehenden elektrischen Signale werden als induzierte Spiegelladung an einer der Kathodenplatten gemessen. Zur Ortsauflösung wird die Kathodenplatte zusätzlich in einzelne Pads unterteilt. Eine weitere Möglichkeit ist die Messung des elektrischen Signals an den Anodendrähten [7, Kapitel 5].

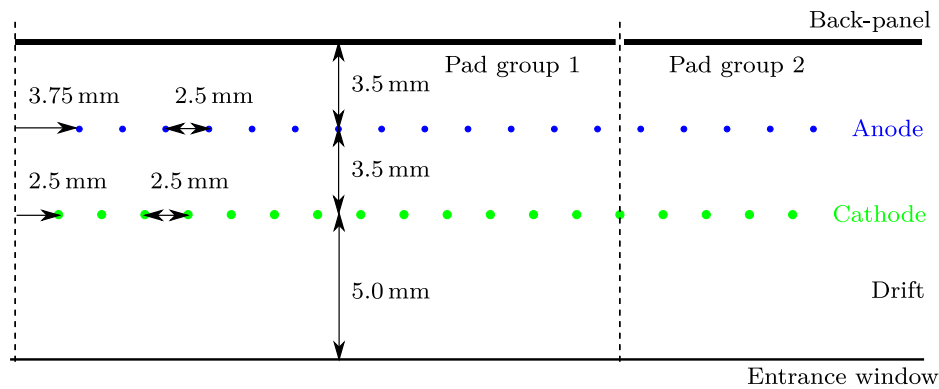
In Abbildung 2.1 ist eine Ionisation durch ein geladenes Teilchen am Beispiel eines Pions, welches die primären Ionen erzeugt, als *primary cluster* eingezeichnet. Die Stärke eines solchen im Detektor gemessenen Signals hängt mit dem Energieverlust des Teilchens zusammen. Dieser liefert Informationen über die Ladung des Teilchens, welches die primäre Ionisation ausgelöst hat. Das ermöglicht die Verwendung der MWPC zur Detektion von Pionen, sowie Elektronen niedrigerer Impulse und dient der Identifikation nuklearer Fragmente. Bei hochrelativistischen Elektronen werden zusätzlich TR-Photonen erzeugt, welche detektiert werden. Anhanddessen können Elektronen und Pionen unterschieden werden [2, S. 36].

## 2.2 Die TRD-Kammer

Im TRD des CBM-Experiments werden MWPCs hinter Radiatoren verbaut. Die technische Realisierung der Kammern wird hier spezifiziert.

Im Wesentlichen wird die Realisierung durch mehrere Anforderungen bestimmt. Dazu gehört die Vermeidung der Entstehung sekundärer Teilchen. Zudem soll die Absorption, sowie Ablenkung der Teilchen von ihren Trajektorien vermieden werden. Deswegen soll das Materialbudget des TRD und somit der einzelnen Kammern gering sein [2, S. 16]. Außerdem muss zur Stabilität der Rekonstruktion der ausgelesenen Daten der Verstärkungsfaktor konstant gehalten werden. Nur Schwankungen von deutlich unter  $\pm 10\%$  können durch geeignete Kalibrierung herausgerechnet werden [2, S. 71]. Eine hohe Gasdichtigkeit der Kammer wird zur Vermeidung von Verunreinigungen und Gasverlust benötigt.

Es handelt sich um zuvor beschriebene Drift-MWPCs. Der zusätzliche Driftbereich einer Länge von 5 mm erhöht die Reaktionswahrscheinlichkeit der eintretenden Teilchen und die Stabilität des elektrischen Feldes gegenüber Verformung des Eintrittsfensters. In Abbildung 2.2 ist die Anordnung der Elektroden veranschaulicht, so dass ein Driftbereich, sowie ein Verstärkungsbereich der Länge  $2 \times 3,5$  mm entstehen. Die Kathode wird in Pads unterteilt, um die in Abschnitt 2.1 beschriebene Ortsauflösung zu ermöglichen.

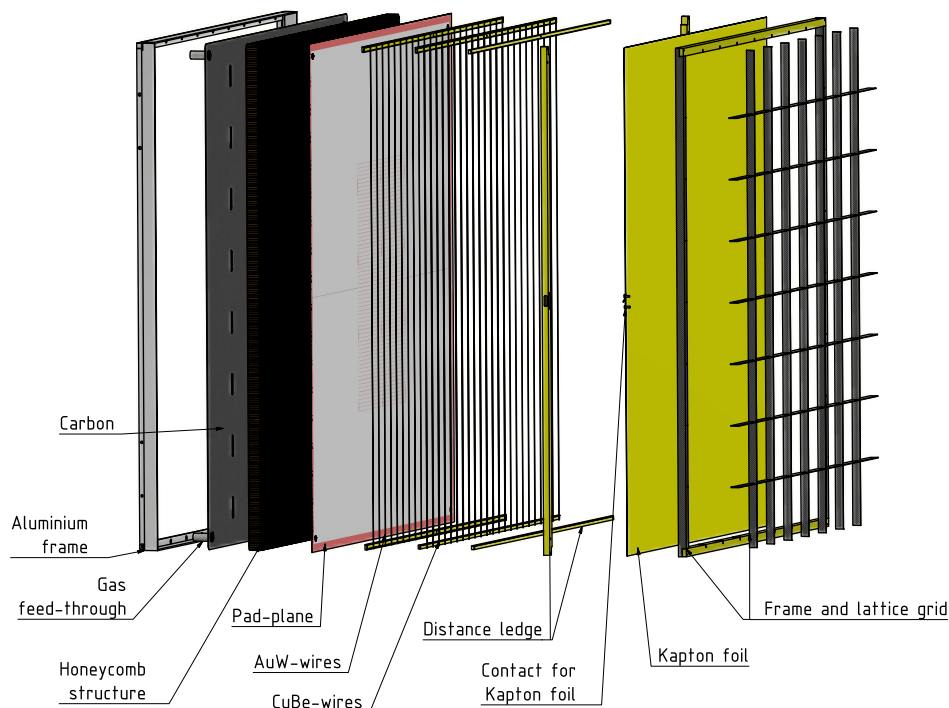


**Abbildung 2.2:** Zu sehen ist die Anordnung der Drähte und Kathodenplatten, die in den für den TRD gebauten MWPCs realisiert wird. Das Back-Panel, welches eine Kathode bildet, wird in Pads unterteilt, um eine Ortsauflösung zu ermöglichen. Entnommen aus [2].

Aufgebaut wird die Kammer aus Materialien mit möglichst geringem Materialbudget. Der Aufbau ist in Abbildung 2.3 zu sehen. In einen Aluminiumrahmen wird eine Carbon-Platte, sowie eine Honeycomb-Struktur eingesetzt, auf der die Padplane platziert ist. Alle drei haben Durchlässe für die Gasanschlüsse zur Versorgung der Kammer mit Gas. In der Kammer werden Abstandsleisten eingebaut, Drahtebenen gespannt und in der in Abbildung 2.2 gezeigten Anordnung angebracht. Eine  $25\ \mu\text{m}$  dicke Kapton Folie bildet das Eintrittsfenster der

Kammer. Auf der Innenseite ist sie mit einer Aluminium-Schicht der Dicke  $0,05\,\mu\text{m}$  versehen. Befestigt ist sie an einem Fiberglas-Rahmen und zur Stabilität werden Carbon-Leisten aufgeklebt. Diese bilden ein Gitter, welches wiederum Fenstersegmente definiert. Die Folie ist gasdicht und dient als Driftkathode [2].

Da das Eintrittsfenster die Kathode bildet, hat eine Verformung die Veränderung des elektrischen Feldes zur Folge. Veränderungen des elektrischen Feldes im Verstärkungsbereich führen zu einer Veränderung des Verstärkungsfaktors. Simulationen haben ergeben, dass lokale Auslenkungen der Folie unter etwa  $\pm 1\text{ mm}$  gehalten werden müssen, um die Gasverstärkung innerhalb der erlaubten Toleranz zu halten [2, S. 71]. Zur Erhaltung des elektrischen Feldes wird eine Grenze von  $\pm 1\text{ mbar}$  für die Druckdifferenz zur Umgebung angegeben [2, S. 58].

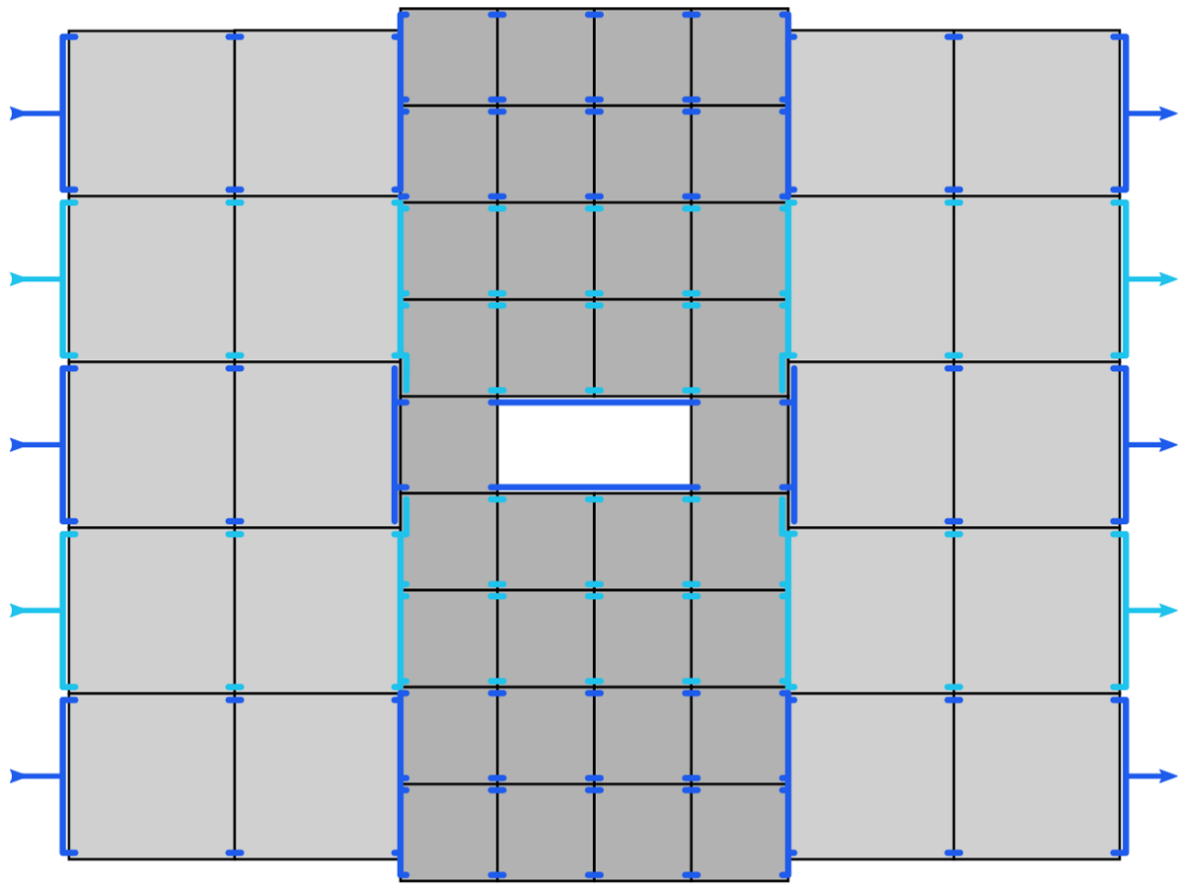


**Abbildung 2.3:** Zu sehen ist der Aufbau der Kammern, die im TRD verbaut werden. Entnommen aus [2].

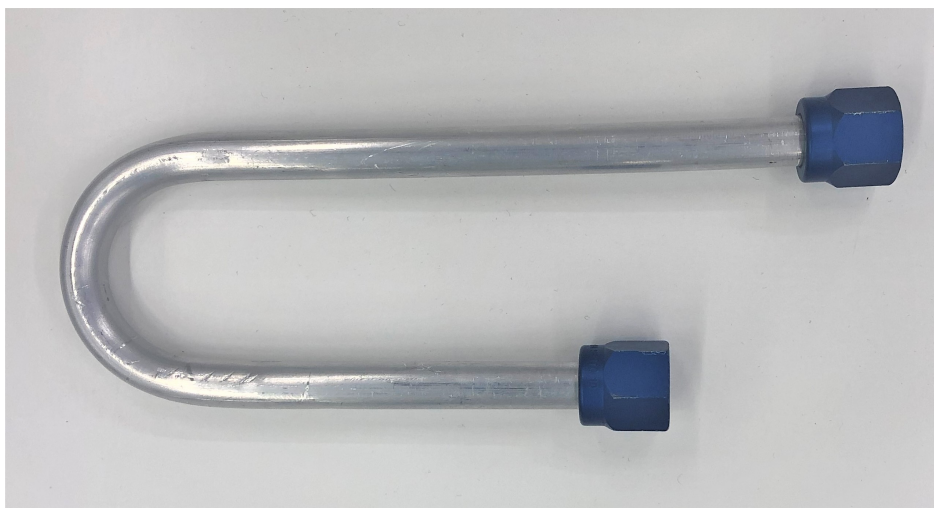
## 2.3 Der CBM-TRD und das Gassystem

Im Detektor werden mehrere dieser Kammern verbaut. Er besteht aus vier Schichten. In jeder befinden sich 20 Kammern der Größe  $99 \times 99\text{ cm}$  und 34 Kammern der Größe  $56 \times 56\text{ cm}$ . Die Anordnung einer einzelnen Schicht ist in Abbildung 2.4 zu sehen. Die Detektorkammern der jeweiligen Schichten sind dabei für die Ortsauflösung in einer zweiten Dimension um  $90^\circ$  gegeneinander verdreht. Die Gasversorgung einer Schicht wird über fünf Gasleitungen





**Abbildung 2.4:** Die Ansicht der Rückseite einer von vier Schichten des Detektors zeigt die Gasversorgung der einzelnen Kammern. Fünf unabhängige Gaslinien versorgen verschiedene Höhenbereiche. Wechselnde Blautöne kennzeichnen die unterschiedlichen Gaslinien. Entnommen aus[8].



**Abbildung 2.5:** Zu sehen ist eines der U-förmigen Aluminiumrohre, mit denen die Kammern im finalen Aufbau verbunden werden. Anhand der blauen Muttern, die auch aus Aluminium sind, kann es an die Gasanschlüsse der Kammern angeschlossen werden.

ermöglicht. Jede Höhe wird von einer eigenen Gasleitung versorgt, wobei die jeweiligen Reihen der vier Schichten auf gleicher Höhe nach passiver Flussaufteilung parallel versorgt werden. Dafür hat jede Kammer zwei Gasanschlüsse, durch die Gas eintritt und zwei weitere an denen es austritt. Durch das Gas in einer großen Kammer werden zwei kleine versorgt. Diese haben wieder jeweils zwei Ein- und Ausgänge [8, S. 5].

Die Gasanschlüsse der Kammer wurden neu entwickelt und haben einen durchgehenden Innendurchmesser von 8 mm. Die Auswirkung der Veränderung auf Flusswiderstand und Druckverlust soll in dieser Arbeit untersucht werden [8, S. 11]. Als Detektorgas wird ein Gemisch aus 85 % Xenon und 15 % CO<sub>2</sub> verwendet. Auf Grund der kürzesten Absorptionslänge im Bereich der TR-Strahlung einer Energie von 3 bis 15 keV, die im Experiment zu erwarten ist, ist Xenon am besten geeignet [4, S. 7]. Im Rahmen dieser Arbeit wird *Sagox 18* verwendet. Ein Gasgemisch aus 82 % Argon und 18 % CO<sub>2</sub>.

Verbunden werden die Kammern mit U-förmigen Rohren bestehend aus der Aluminium-Legierung AlMgSi0,5. Ein solches ist in Abbildung 2.5 abgebildet und wird in der Arbeit als U-förmiges Aluminiumrohr bezeichnet. Es hat einen Außendurchmesser von 10 mm, eine Wandstärke von 1 mm und wiegt etwa 20 g [8, S. 5].

Das Gassystem dient dazu, das verwendete Gas in einem Kreislauf zu leiten. Dafür hat das Gassystem mehrere Komponenten. Diese dienen der Regulierung, sowie der Aufbereitung des Gases im Kreislauf. Dabei soll die Verunreinigung durch O<sub>2</sub> unter 100 ppmVb gehalten werden. Außerdem wird ein Fluss von 15  $\frac{1}{h}$  angestrebt, von dem die Kammern durchströmt werden [8].

## 2.4 Elektrotechnische Grundlagen

Um die Messwerte verwendeter Sensoren auszulesen, wird in dieser Arbeit ein Arduino verwendet. Die Verwendung des Arduinos erfordert die Konzeption eines Schaltkreises. Dafür werden hier einige elektrotechnische Grundlagen eingeführt.

In elektrischen Leitern fließt ein Strom  $I$ . Durch eine Potentialdifferenz, eine angelegte Spannung  $U$ , wird Kraft auf die freien Ladungsträger ausgeübt. Experimentelle Beobachtungen zeigen, dass für Ohmsche Leiter eine Proportionalität des Stroms  $I$  und der Spannung  $U$  besteht. Diese wird mit dem Ohmschen Gesetz

$$U = R \cdot I \tag{2.1}$$

beschrieben. Dabei ist  $R$  der Ohmsche Widerstand [9, Kapitel 3].

Das Verhalten dieser Größen in Stromkreisen wird im Wesentlichen durch die Kirchhoffschen Regeln beschrieben. Die erste ist die Knotenregel, die besagt, dass an einem Knotenpunkt

die Summe der Ströme null ist. Fließt ein Strom der Stärke  $I$  zu einer Zweigstelle, einem Knoten, hin, fließt aus dem selben Knoten auch ein Strom der Stärke  $I$  ab. Die zweite Kirchhoffsche Regel ist die Maschenregel. Nach dieser ist die Summe der Spannungen auf einem geschlossenen Weg, einer Masche, null [10, S. 322 f.].

## 2.5 Gasfluss

In dieser Arbeit wird ein Gassystem konzipiert, anhanddessen eine TRD-Kammer untersucht wird. Für die Einordnung und Verarbeitung der Messwerte werden einige Annahmen gemacht, die sich auf theoretische Grundlagen stützen, welche hier erläutert werden.

Strömungen in einem geraden Kreisrohr mit Radius  $R$  und der Länge  $l$  werden mit dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz beschrieben. Es gilt für laminare Strömungen von Newtonschen Fluiden. Bei einer laminaren Strömung treten keine Turbulenzen auf. Newtonsche Fluide weisen eine Proportionalität zwischen Schergeschwindigkeit und Scherspannung auf [11, S. 3, 160].

Das Gesetz gibt den Volumenstrom, also das Volumen, welches das Rohr pro Zeit durchfließt, an. Es lautet

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot R^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{l}. \quad (2.2)$$

Dabei ist  $\eta$  die Viskosität des strömenden Fluids. Gase haben wegen ihrer hohen Fließfähigkeit eine niedrige Viskosität.  $\Delta p$  ist der Druckabfall im Rohr. Wird weder die Zusammensetzung des Gases, noch die Geometrie des Gassystems verändert, ist  $\frac{\pi \cdot R^4}{8\eta l}$  konstant. Dann kann von einem linearen Zusammenhang zwischen dem Volumenstrom und dem Differenzdruck ausgegangen werden [11, S. 156].

Experimentelle Beobachtungen haben gezeigt, dass für Gase bei einer hohen Verdünnung das Boyle-Mariottesche Gesetz gilt. Dieses lautet

$$\frac{pV}{N} = K. \quad (2.3)$$

$p$  ist der Druck,  $V$  das zur Verfügung stehende Volumen,  $N$  die Teilchenzahl und  $K$  eine Konstante. Da  $K$  temperaturabhängig ist, kann die Gleichung zur Zustandsgleichung des idealen Gases

$$pV = Nk_B T \quad (2.4)$$

umgeformt werden.  $T$  ist dabei die Temperatur und  $k_B = 1,3805 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$  die Boltzmannkonstante [12, Kapitel 1.4.1]. Bei konstanter Temperatur besteht eine indirekte Proportionalität zwischen dem Volumen  $V$  und dem Druck  $p$  [13, S. 20]. Da es sich bei dem im Experiment genutzten Gas um eines mit hohem Edelgasanteil handelt, wird dieses als ideal angenommen.

Außerdem kann während einer Messung von einer konstanten Temperatur ausgegangen werden. Diese Proportionalität kann also verwendet werden.

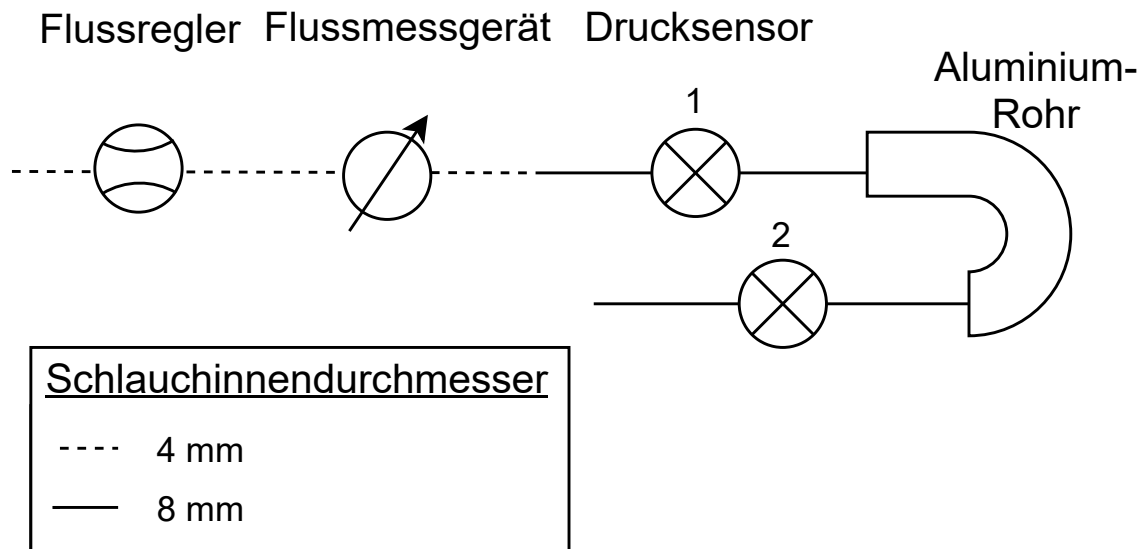
## 3 Aufbau

Um das Verhalten des Drucks im Detektor zu bestimmen, wurde ein Aufbau konzipiert, an dem auch Messungen zur Auswölbung der Folie des Eintrittsfensters durchgeführt werden können. Um den Differentialdruckverlust über den gesamten Detektor des späteren Experiments abzuschätzen, werden dessen Einzelkomponenten auf ihren Beitrag zum Druckverlust untersucht. Die Einzelteile sind eine Dummy-Kammer der Größe 99x99 cm, sowie ein U-förmiges Aluminium-Rohr, das im finalen Aufbau benachbarte Kammern miteinander verbindet.

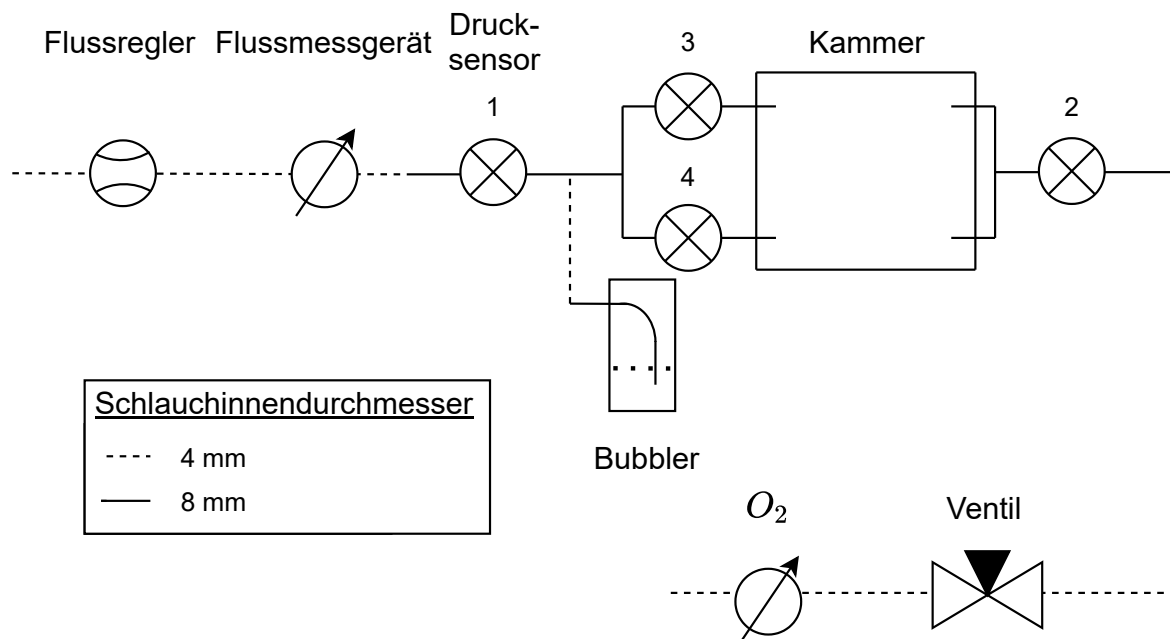
Zur Bestimmung des Druckverlusts durch das Bauteil wird ein Drucksensor vor und hinter dem Bauteil benötigt. Der Druckverlust soll für verschiedene Flüsse gemessen werden. Ein Flussregler dient der Variation des Flusses. Ein Flussmessgerät wird zusätzlich eingebaut, um bestimmten Flüssen Druckverluste zuzuordnen. Für das Aluminium-Rohr ist dieser Aufbau in Abbildung 3.1 abgebildet. Es werden Schläuche unterschiedlicher Durchmesser verwendet, um Bauteile mit unterschiedlichen Anschlüssen einzusetzen. Bei der Kammer gibt es zwei Ein- und Ausgänge. Zum Erreichen dieser wird der Gasfluss mittels eines T-Stücks aufgeteilt. An diesen Gabelungen soll untersucht werden, ob sich die Differenzdrücke an den beiden Abzweigen unterscheiden. Dafür werden zusätzlich zwei Differenzdrucksensoren vor der Kammer eingebaut. Der Aufbau ist in Abbildung 3.2 zu sehen. Zusätzlich ist noch ein Ventil eingebaut, um das Aufstauen von Gas zu simulieren. Ein Sauerstoffsensor dient der Bestimmung des Sauerstoffgehalts, um eine Dichteprüfung der Kammer und ihrer Anschlüsse durchzuführen. Die Verwendung eines Blasen Zählers dient zur Vermeidung von Überdrücken über 1 mbar in der Kammer.

### 3.1 Einzelkomponenten

Die zuvor eingeführten Einzelkomponenten werden in ihrer Funktion und Handhabung im Folgenden erläutert.



**Abbildung 3.1:** Zu sehen ist ein Flussplan zur Bestimmung des Druckverlusts an einem Aluminium-Rohr, welches im späteren Experiment benachbarte Kammern verbinden wird. Zur Bestimmung des Druckverlusts sind Drucksensoren vor und hinter dem Rohr eingebaut. Ein Flussregler dient zur Variation des Flusses. Anhand eines Flussmessgeräts kann der Fluss gemessen und zugeordnet werden.



**Abbildung 3.2:** Im finalen Aufbau soll eine Dummy-Kammer untersucht werden. Zur Variation des Flusses wird ein Flussregler eingebaut und zudem ein Flussmessgerät, um den Fluss zu messen. Vor und hinter der Kammer sind Drucksensoren, um den Druckverlust zu bestimmen. Vor der Kammer werden an der Gabelung zwei Sensoren angebracht, um zu überprüfen, ob sich beide Abzweigungen gleich verhalten. Die Sensoren sind durchnummeriert, um Messwerte im Folgenden eindeutig zuzuordnen. Ein Ventil ist eingebaut, um das Gas aufzustauen. Zudem kann die Kammer mit einem Sauerstoffsensor einer Dichtigkeitsprüfung unterzogen werden. Ein Blasenähler dient der Vermeidung von Überdrücken über 1 mbar.

### 3.1.1 Differenzdrucksensor

Um den Differenzdruck zu bestimmen, werden zwei unterschiedliche Differenzdrucksensoren verwendet. Dabei handelt es sich um Sensoren der Marke *First Sensor AG* mit den Modellbezeichnungen SQ223-18093 und CTEM7N010GQ4.

Beide funktionieren nach dem selben Prinzip. Anhand der Verformung einer Silizium-Membran im Sensor wird die Druckdifferenz zur Umgebung bestimmt [14]. Der Anschluss an den Aufbau erfolgt mittels eines T-Stücks. Das ist in Abbildung 3.3 zu sehen.



**Abbildung 3.3:** Zu sehen ist einer der verwendeten Drucksensoren. Links sind Kabel angeschlossen, anhand derer das Signal ausgelesen werden kann. Der Drucksensor wird auf einen Schlauchinnendurchmesser von 10 mm adaptiert und mit dem T-Stück in den Aufbau gebaut.

Die Messwerte zwischen  $-10$  und  $10$  mbar werden als Strom zwischen  $4$  und  $20$  mA ausgegeben. Die Sensoren müssen mit einer Versorgungsspannung zwischen  $9$  und  $32$  V versorgt werden [15], [16].

Die Unsicherheiten der Sensoren sind in [15] und [16] angegeben. Dabei sind solche für den Messbereich und solche für einen Offset angegeben. Die Abweichungen im Offset werden in der Analyse der Messdaten vernachlässigt, da diese durch eine vorgenommene Nullmessung kompensiert werden. Für temperaturabhängige Einflüsse bei Abweichungen von  $25^\circ\text{C}$  ist eine Unsicherheit von  $\pm 0,008 \frac{\text{mbar}}{^\circ\text{C}}$  angegeben. Die Temperatur wird während der Messungen nicht aufgezeichnet. Als Abschätzung für eine obere Grenze der Temperaturabweichung werden hier  $5^\circ\text{C}$  angenommen. Auch die Abweichung von einer idealen Spannungsversorgung mit  $15$  V resultiert in einer Unsicherheit von  $\pm 0,016 \frac{\text{mbar}}{\text{V}}$ . Hier wird eine Spannungsversorgung mit  $12$  V verwendet. Außerdem sind noch Unsicherheiten für Nicht-Linearität und Hysterese angegeben. Da die Sensoren nur für einen geringen Wertebereich zwischen  $0$  und  $1$  mbar verwendet werden, kann diese vernachlässigt werden. Auch die Langzeitunsicherheit wird hier vernachlässigt, da der Messzeitraum weit unterhalb eines Jahres liegt. Etwaige Abweichungen werden zudem von der schon erwähnten Nullmessung erfasst und kompensiert. Für die Wiederholbarkeit ist eine Unsicherheit von  $\pm 0,2\%$  des gesamten Wertebereichs angegeben,

was 0,04 mbar entspricht. Zudem ist auf Grund des Rauschens des Ausgangssignals eine Unsicherheit von  $\pm 0,2\%$  des gesamten Wertebereichs angegeben. Das entspricht 0,02 mbar.

Das resultiert in einer Unsicherheit von

$$u(p_{\text{diff}}) = \sqrt{(0,008 \frac{\text{mbar}}{^\circ\text{C}} \cdot 5^\circ\text{C})^2 + (0,016 \frac{\text{mbar}}{\text{V}} \cdot 3 \text{ V})^2 + (0,04 \text{ mbar})^2 + (0,02 \text{ mbar})^2} \\ = 0,077 \text{ mbar}.$$

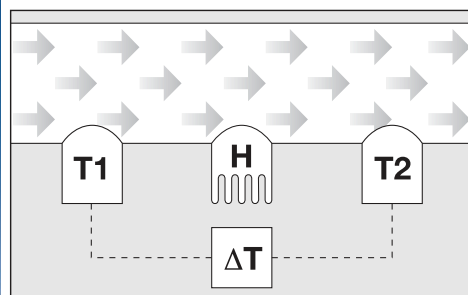
### 3.1.2 Flussmessgerät

Zur Messung des Gasflusses wird ein GFM 17 Mass Flow Meter der Firma *Aalborg* verwendet. Ein solches ist in Abbildung 3.4a zu sehen. Der Messbereich liegt zwischen  $0 \frac{1}{\text{h}}$  und  $100 \frac{1}{\text{h}}$ . Das Gerät ist auf 82 % Argon und 18 %  $\text{CO}_2$  kalibriert.

Das Flussmessgerät teilt das es durchströmende Gas in zwei laminare Ströme gleichen Flusses auf. Das durch ein Sensorrohr fließende Gas wird anhand einer Heizspule erwärmt, wobei die Temperaturdifferenz zwischen zwei Punkten bestimmt wird. Dieser Vorgang ist in Abbildung 3.4b skizziert. Der Wärmetransport des Gases erlaubt Rückschlüsse auf den Fluss [17]. Das Gerät gibt ein Signal zwischen 4 und 20 mA aus. Dieses kodiert den Fluss im Messbereich des Messgeräts. Hier wird dieses Signal mit Hilfe eines Arduinos digitalisiert. Die Unsicherheit bei Auslesen des analogen Signals zur Bestimmung des Flusses ist mit  $\pm 1\%$  des gesamten Messbereichs angegeben [18]. Das entspricht einer Unsicherheit von  $\pm 1 \frac{1}{\text{h}}$ .



(a) Entnommen aus [17].



(b) Entnommen aus [19].

**Abbildung 3.4:** Zu sehen ist in a) ein Flowmeter der Firma *Aalborg* und in b) ist die Funktion eines solchen skizziert. Nachdem der Gasfluss im Flowmeter in zwei laminare Ströme aufgeteilt wurde, wird der eine in einem Sensorrohr erhitzt. Die Messung des Temperaturunterschieds ermöglicht die Bestimmung des Gasflusses.



#### 3.1.3 Flussregler

Es wird ein mechanischer Flussregler der Marke *Kobold* verwendet. Der Gasdurchfluss wird mit einem Nadelventil reguliert. Das Gas fließt von unten nach oben durch den Flussregler und ein Schwebekörper zeigt den Durchfluss an [20]. Da die Skala auf dem Flussmessgerät unpassend begrenzt und auf ein anderes Gas kalibriert ist, wird zur Bestimmung des Flusses das Flussmessgerät verwendet. Dafür wird das Flussmessgerät so angebracht, dass die digitale Anzeige vom Flowmeter aus sichtbar ist.

#### 3.1.4 Sauerstoffsensor

Zur Messung des Sauerstoffgehalts wird eine Orbisphere 510 der Firma *Hach* verwendet. Daran ist ein elektrochemischer Sensor angeschlossen. Durch eine Membran eintretende Sauerstoffmoleküle werden in diesem Sensor mittels Elektrolyse gespalten. Der daraus resultierende Strom zwischen den beiden Elektroden ist proportional zum Sauerstoffgehalt [21].

Messwerte werden in ppmVb angegeben [21]. Auf Grund einer Kalibration des Sensors sind Messwerte unter 20 ppmVb nicht belastbar. Messwerte in diesem Bereich genügen nur für eine qualitative Einordnung in einen niedrigen Messbereich.

#### 3.1.5 Arduino

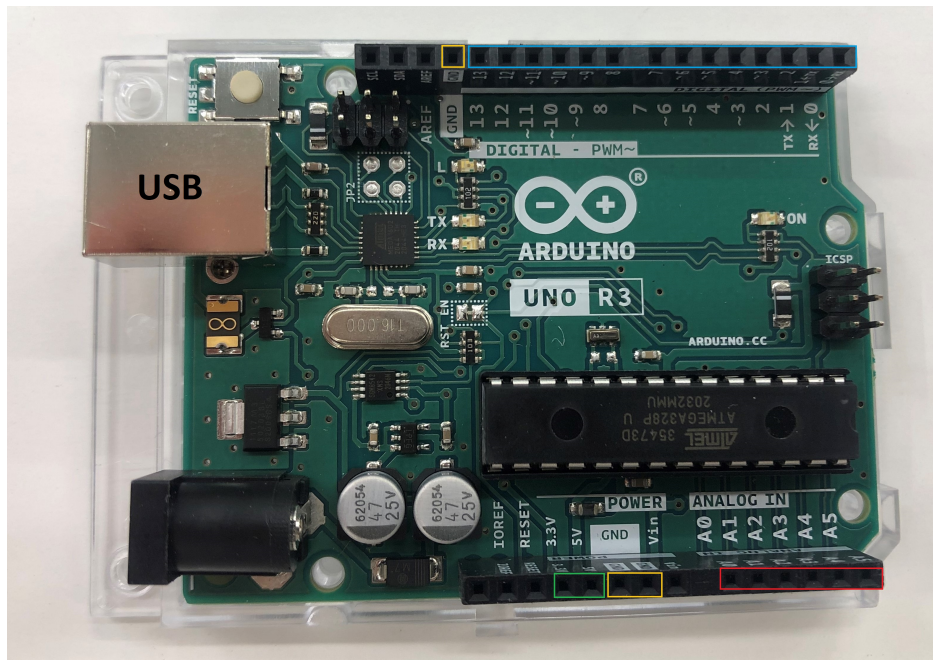
Zur Digitalisierung der Daten, sowie zum Steuern des Ventils, wird jeweils ein Arduino Uno R3, wie er in Abbildung 3.5 zu sehen ist, verwendet. Anhand eines USB-Kabels kann der Arduino über eine serielle Schnittstelle mit dem Computer verbunden werden. Diese serielle Schnittstelle kann zur Kommunikation mit dem Arduino verwendet werden. Unter Verwendung der zugehörigen Software, der *Arduino IDE*, kann der Arduino programmiert werden. Durch diese Programmierung wird unter Anderem die Verarbeitung erhaltener Befehle, sowie das Senden von Daten an die serielle Schnittstelle gesteuert. Zur Spannungsversorgung gibt es neben dem USB-Port einen weiteren Anschluss, an dem eine Eingangsspannung zwischen 7 und 12 V angelegt werden kann [22].

Der Arduino besitzt einen 10-Bit-Analog-zu-Digital-Konverter, der zur Digitalisierung der Daten verwendet wird. Eingangsspannungen zwischen 0 und 5 V an den analogen Pins werden in 1024 Kanälen abgetastet. Diese sind von 0 bis 1023 nummeriert. Es gibt sechs analoge Pins, die in der Abbildung rot hervorgehoben sind [23].

Digitale Pins am Arduino können als Input oder Output verwendet werden. An Outputpins kann die Spannung auf 0 V, oder 5 V gesetzt werden [24].

Zudem gibt es noch zwei Output-Pins an denen die Spannung konstant auf 5 V und 3,3 V

gesetzt ist, die zur Spannungsversorgung verwendet werden, sowie drei Ground-Pins. Diese Pins sind in der Abbildung mit grün und gelb markiert.

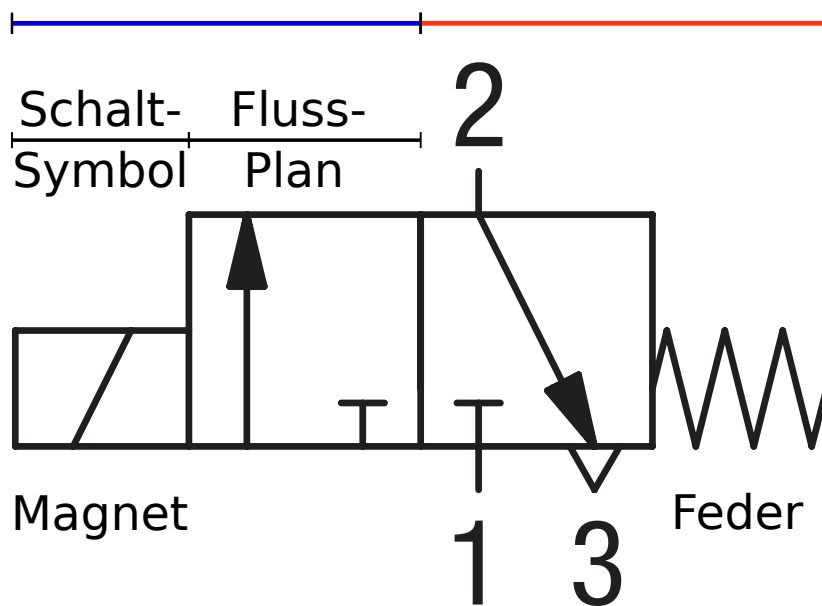


**Abbildung 3.5:** Zu sehen ist ein Arduino Uno R3. Der Arduino kann am Anschluss links unten mit einer Eingangsspannung zwischen 7 und 12 V versorgt werden. Mittels eines USB-Anschlusses wird er über eine serielle Schnittstelle zum Senden und Empfangen von Daten mit dem Computer verbunden. Die relevanten Pins für die im Folgenden beschriebenen Verwendungen sind markiert. Dazu gehören die drei Ground-Pins in gelb, sowie zwei grün markierte Pins mit einer konstanten Ausgangsspannung von zum Einen 5 V und zum Anderen 3,3 V. Außerdem gibt es sechs analoge Pins, die hier in rot dargestellt sind, sowie digitale Pins, die blau markiert sind.

### 3.1.6 Ventil und Pneumatische Steuereinheit

Als Ventil wird ein Faltenbalgventil der Marke *Swagelok* verwendet. Dabei handelt es sich um eines, welches mit einer pneumatischen Steuereinheit gesteuert werden kann. Das Ventil mit der Modellnummer *SS-6BK-MM-1C* ist im normalen Zustand, wenn kein Druck anliegt, geschlossen. Bei Anlegen von Druckluft mit Drücken zwischen 2,7 und 10,3 bar öffnet es sich [25].

Zur Steuerung der Druckluft wird ein weiteres Ventil verwendet, der pneumatische Steuerkopf. Dieser ist von der Firma *AVS Roemer* und hat die Modellnummer *EAV-211-C15-1/8B*. Es handelt sich um ein 3/2-Wege-Magnetventil, ein Ventil mit drei Anschlüssen und zwei möglichen geschalteten Wegen [26].



**Abbildung 3.6:** Zu sehen ist die Funktion eines 3/2-Wegeventils, welches hier als Steuerkopf für ein anderes Ventil dient. Es handelt sich um ein Ventil mit drei Anschlüssen, an dem zwei Wege freigeschaltet werden können. Die zwei Wege sind auf den beiden Hälften skizziert, die hier in blau und rot dargestellt sind. Auf jeder Seite ist ein Flussplan, sowie ein Schaltsymbol für die entsprechende Schaltung, was auf der linken Hälfte hervorgehoben ist. Geschaltet wird anhand einer Feder in Nullstellung und durch ein magnetisches Feld. Der Eingang für Druckluft, 1, ist in Nullstellung zu. 1 ist ein geschlossener Eingang, es tritt keine Druckluft aus. 2 ist auf 3 geschaltet. Bei angeschlossener Wechselspannung ist der Weg zwischen 1 und 2 freigeschaltet. Bei 1 eintretende Druckluft tritt bei 2 aus. Entnommen aus [26].

In Abbildung 3.6 ist die Funktion eines solchen Ventils skizziert. Die beiden möglichen Wege unterteilen die Abbildung in zwei Hälften, die hier in blau und rot gekennzeichnet sind. Auf jeder Hälfte ist eine Box mit dem Flussplan des Ventils und außen ein Schaltsymbol, was auf der linken Hälfte exemplarisch gekennzeichnet ist.

Die Symbole können anhand der Funktionsweise des Ventils erklärt werden. In dem Ventil befindet sich eine Feder, die einen Anker in einer Position, der Nullstellung, hält. Dabei ist

der erste Weg geöffnet. Durch Anschluss einer Wechsellspannung wird der Anker durch ein magnetisches Feld in eine andere Position bewegt und der zweite Weg wird geöffnet. Ohne Spannungsversorgung wird der Anker bei anliegender Druckluft durch die Feder immer wieder in die Nullstellung bewegt. Das Symbol am linken Rand zeigt, dass die Stellung durch das magnetische Feld bestimmt ist. Der linke Flussplan entspricht also dem Weg bei Spannungsversorgung. Das rechte Symbol zeigt, dass die Feder die Position des Ankers bestimmt, was für den zugehörigen Flussplan gilt.

In den Flussplänen sind drei Anschlüsse eingezeichnet. Diese sind im rechten Teil durchnummeriert und im linken Teil an den gleichen Positionen. An 1 wird die Druckluftquelle angeschlossen und an 2 der Eingang des Ventils. In Nullstellung ist 2 auf 3 geschaltet. Anschluss 3 ist lediglich durch einen Staubfilter von der Umgebung getrennt. Der Eingang 1 ist geschlossen und es tritt keine Druckluft aus. Bei Spannungsversorgung ist 1 auf 2 geschaltet, das bedeutet, dass die am Eingang 1 eintretende Druckluft an 2 austritt.

Für das Ventil, welches mit dem Steuerkopf gesteuert wird, bedeutet dies, dass es geöffnet ist, während der Steuerkopf mit Spannung versorgt ist. Die Farbkodierung wird im Folgenden beibehalten, weswegen dem offenen Ventil die Farbe blau zugeordnet wird. In der Nullstellung des Steuerkopfes ist das Ventil hingegen geschlossen. Dem geschlossenen Ventil wird rot zugeordnet.

## 4 Schaltung

Um den Arduino zur Digitalisierung der Daten und zur Steuerung des Ventils zu verwenden, wurde eine Schaltung konzipiert. Bevor die gesamte Schaltung erläutert wird, werden die einzelnen Teile und Konzepte der Schaltungen erklärt, sowie der Prozess der Auswertung des Signals.

### 4.1 Steuerung des Ventils

Zur Steuerung des Ventils muss der pneumatische Steuerkopf beschaltet werden. Das wird mit einer auf 3,3 V basierten Steuereinheit für 230 V-Wechselstrom umgesetzt. Diese Steuereinheit hat bei Versorgung mit einer Spannung von 3,3 V eine Ausgangsspannung von 230 V, sonst liegt keine Spannung an. Das Ventil ist geöffnet, wenn Druckluft anliegt. Es wird durch den pneumatischen Steuerkopf mit Druckluft versorgt, wenn eine Spannung an diesem anliegt. Das ist der Fall, wenn an der Steuereinheit eine Spannung von 3,3 V anliegt. Es ist also bei Versorgung der Steuereinheit geöffnet und sonst geschlossen.

Der Arduino hat wie in Abschnitt 3.1.5 beschrieben einen Output, an dem dauerhaft eine Spannung von 3,3 V anliegt. Es wird zusätzlich ein Schalter benötigt. Als Schalter wird ein 4-Kanal-Relais verwendet. Die Funktion kann am besten an einem 1-Kanal-Relais erklärt werden. Und auch in Schaltskizzen wird es im Folgenden zur Übersichtlichkeit als 1-Kanal-Relais eingezeichnet, da nur einer der vier Kanäle verwendet wird.

Das Relais hat zwei Schaltstellungen, die über einen Steuerstromkreis geschaltet werden. In Abbildung 4.1 ist die Funktion eines Relais skizziert. Das Relais muss mit einer Eingangsspannung von 5 V versorgt werden und hat einen Ground-Eingang zur Erdung. Zusätzlich gibt es einen Eingang, an dem entweder eine Spannung anliegen kann, oder nicht. Dieser dient als Schalter. Bei Stromversorgung wird eine Spule versorgt und es bildet sich ein magnetisches Feld. Dadurch wird ein Anker bewegt, der als mechanischer Schalter dient und so einen anderen Stromkreis schließt [27].

**Abbildung 4.2:** Das Ventil wird anhand eines pneumatischen Steuerkopfes gesteuert. Um an diesem die Druckluft ein- und auszuschalten wird eine auf 3,3 V basierte Steuereinheit für 230 V-Wechselstrom verwendet. Um die Versorgung der Steuereinheit durch den dauerhaften Ausgang von 3,3 V am Arduino zu steuern wird ein Relais als Schalter eingebaut. Dieses kann wiederum mit einem digitalen Pin des Arduinos geschaltet werden. Ist der digitale Pin auf HIGH gesetzt, also eine Spannung von 5 V, ist das Ventil zu. Liegt keine Spannung an, also der digitale Pin auf LOW, ist das Ventil auf.

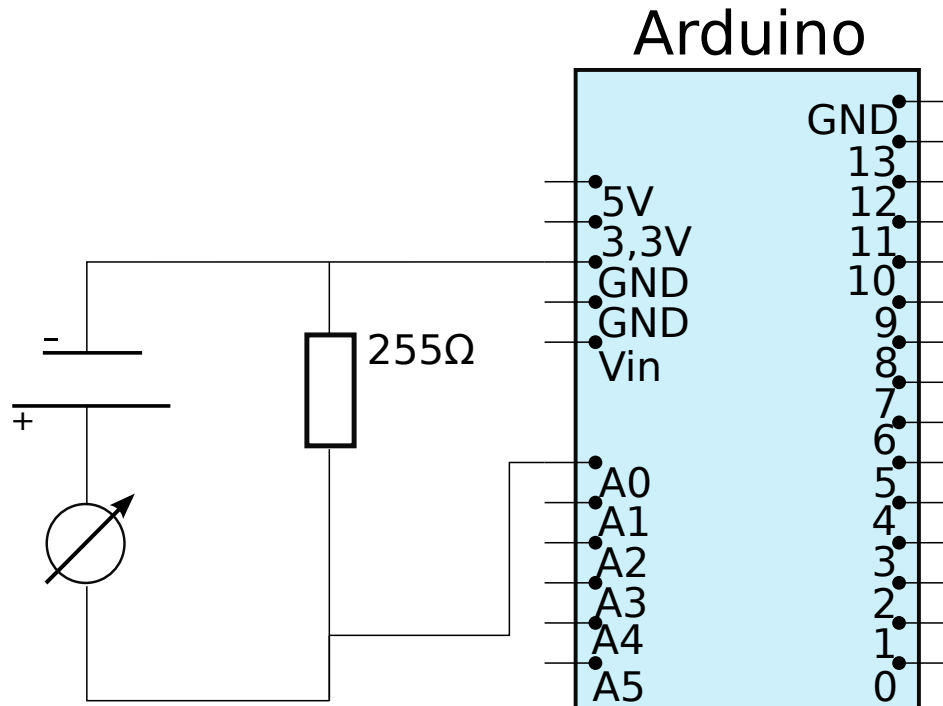
Das Relais hat drei weitere Pins. Diese sind hier von 1 bis 3 nummeriert. In Abbildung 4.1 ist links zu sehen, dass bei fehlender Eingangsspannung die Pins 1 und 2 verbunden sind. Bei Spannungsversorgung am Eingang sind die Pins 2 und 3 verbunden, wie rechts in der Abbildung zu sehen. Mit dem Steuerstromkreis kann also geschaltet werden, welcher der beiden anderen Pins mit Pin 2 verbunden ist.

Das Relais wird, wie in Abbildung 4.2 zu sehen ist, zwischen Steuereinheit und Arduino geschaltet, um die Versorgung ein- oder auszuschalten. Dabei wird an den Eingang ein digitaler Pin angeschlossen, der auf 0 V, LOW, oder 5 V, HIGH, eingestellt werden kann. Gleichzeitig wird der 3,3 V-Ausgang des Arduinos auf 2 und die Steuereinheit auf 1 gelegt. Im ersten Fall, LOW, sind Pin 1 und 2 verbunden, also der 3,3 V-Ausgang des Arduinos und die Steuereinheit. An der Steuereinheit liegen 3,3 V an. Das Ventil ist offen. Im zweiten Fall sind Pin 2 und 3 verbunden, das Ventil ist zu.

## 4.2 Schaltung zur Digitalisierung der Messwerte

Für die Messungen werden Sensoren verwendet, deren Messwerte als Strom zwischen 4 und 20 mA übertragen werden. Zur Digitalisierung dieses analogen Signals wird ein Arduino Uno R3 verwendet. Dafür wird für einen Sensor die Schaltung in Abbildung 4.3 realisiert. Die Spannungsversorgung ist optional. Das für den Aufbau verwendete Flussmessgerät hat eine externe Spannungsversorgung, im Stromkreis wird also keine benötigt. Für die Drucksensoren muss die Spannungsquelle, wie im Schaltplan zu sehen ist, in Reihe geschaltet werden.

Über den Widerstand mit  $R = 255 \Omega$  fällt nach Gleichung (2.1) eine Spannung zwischen 1,02 V und 5,1 V ab. Nach der in Abschnitt 2.4 beschriebenen Maschenregel liegt zwischen Ground und analogem Pin des Arduinos die Spannung an, die auch über den Widerstand abfällt. Spannungen zwischen 0 und 5 V können durch die analogen Pins des Arduinos digitalisiert werden. Optimal wäre ein Widerstand mit  $R = 250 \Omega$  an dem für den maximalen Strom von 20 mA eine Spannung von 5 V gemessen werden würde. Auf Grund der Verfügbarkeit werden für den Aufbau aber Widerstände mit  $255 \Omega$  verwendet. Da weder Drücke, noch Flüsse am oberen Rand des Messbereichs erwartet werden, stellt die Verschiebung der Spannungswerte kein Problem dar.



**Abbildung 4.3:** Schaltung zur Digitalisierung des 4 bis 20 mA-Signals eines Sensors. Über einen Widerstand von  $R = 255 \Omega$  fällt nach Gleichung (2.1) eine Spannung ab, die durch die Parallelschaltung eines analogen Pins der Arduino digitalisiert werden kann. Das Ergebnis sind digitale Werte des Arduinos zwischen 0 und 1023.

Die Spannungsquelle ist in dieser Schaltung optional. Für Sensoren, die bereits an eine Spannungsversorgung angeschlossen sind, wird keine Spannungsquelle in den Stromkreis geschaltet.

Der Arduino sortiert gemessene Spannungen zwischen 0 und 5 V in 1024 Kanäle, die ab 0 nummeriert werden. Mit

$$U = \frac{\text{Kanal}}{1023} \cdot 5 \text{ V} \quad (4.1)$$

lassen sich die gemessenen Spannungen berechnen. Die Auflösung ist durch den Analog-Digital-Wandler des Arduinos begrenzt. Die so entstehende Unsicherheit der Messwerte entspricht dem Abstand der möglichen Messwerte mit

$$u(U) = 0,0049 \text{ V}.$$

Durch Umstellen von Gleichung (2.1) kann der Strom mit

$$I = \frac{U}{R} \quad (4.2)$$



bestimmt werden. Für die unterschiedlichen Sensoren kann der Strom anhand der Herstellerangaben des Messbereichs in die Messwerte umgerechnet werden. Für diesen Versuchsaufbau werden ein Flussmessgerät und mehrere Drucksensoren benötigt.

**Drucksensor:** Für den Drucksensor entsprechen 4 mA einem Differenzdruck von  $-10$  mbar und 20 mA einem Differenzdruck von 10 mbar. Also errechnet sich der Differenzdruck zur Umgebung  $p_{\text{diff}}$  aus dem Strom  $I$  in mA mit

$$p_{\text{diff}} = \frac{I - 4 \text{ mA}}{16 \text{ mA}} \cdot 20 \text{ mbar} - 10 \text{ mbar}. \quad (4.3)$$

Einsetzen von Gleichung (4.2) und Gleichung (4.1) liefert den Differenzdruck in Abhängigkeit der Kanäle des Arduinos. Man erhält

$$p_{\text{diff}} = \frac{\frac{\text{Kanal}}{255 \cdot 1023} \cdot 5 \text{ V} \cdot 1000 - 4 \text{ mA}}{16 \text{ mA}} \cdot 20 \text{ mbar} - 10 \text{ mbar}. \quad (4.4)$$

**Flussmessgerät:** Für das Flussmessgerät entsprechen 4 mA einem Fluss  $F$  von  $0 \frac{1}{\text{h}}$  und 20 mA einem Fluss von  $100 \frac{1}{\text{h}}$ . Der Fluss kann also in Abhängigkeit des Stroms  $I$  mit

$$F = \frac{I - 4 \text{ mA}}{16 \text{ mA}} \cdot 100 \frac{1}{\text{h}} \quad (4.5)$$

bestimmt werden. Durch einsetzen von Gleichung (4.2) und Gleichung (4.1) erhält man den Fluss in Abhängigkeit der Kanäle des Arduinos. Es ergibt sich

$$F = \frac{\frac{\text{Kanal}}{255 \cdot 1023} \cdot 5 \text{ V} \cdot 1000 - 4 \text{ mA}}{16 \text{ mA}} \cdot 100 \frac{1}{\text{h}}. \quad (4.6)$$

**Unsicherheiten:** Die aus der begrenzte Auflösung resultierende Unsicherheit gilt auch für alle Werte die aus der gemessenen Spannung berechnet werden. Sie entspricht dem Abstand zum nächsten möglichen Messwert, also Kanal. Die Messung des Differenzdrucks ist mit einer Unsicherheit von

$$u(p_{\text{diff}}) = 0,024 \text{ mbar} \quad (4.7)$$

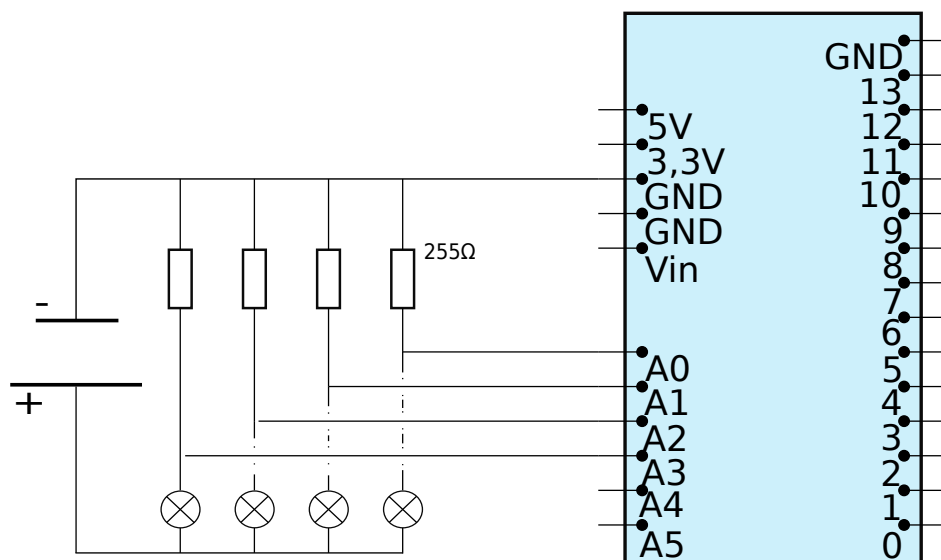
behaftet. Die des Flusses mit

$$u(\Phi) = 0,12 \frac{1}{\text{h}}. \quad (4.8)$$

### 4.3 Gesamte Schaltung

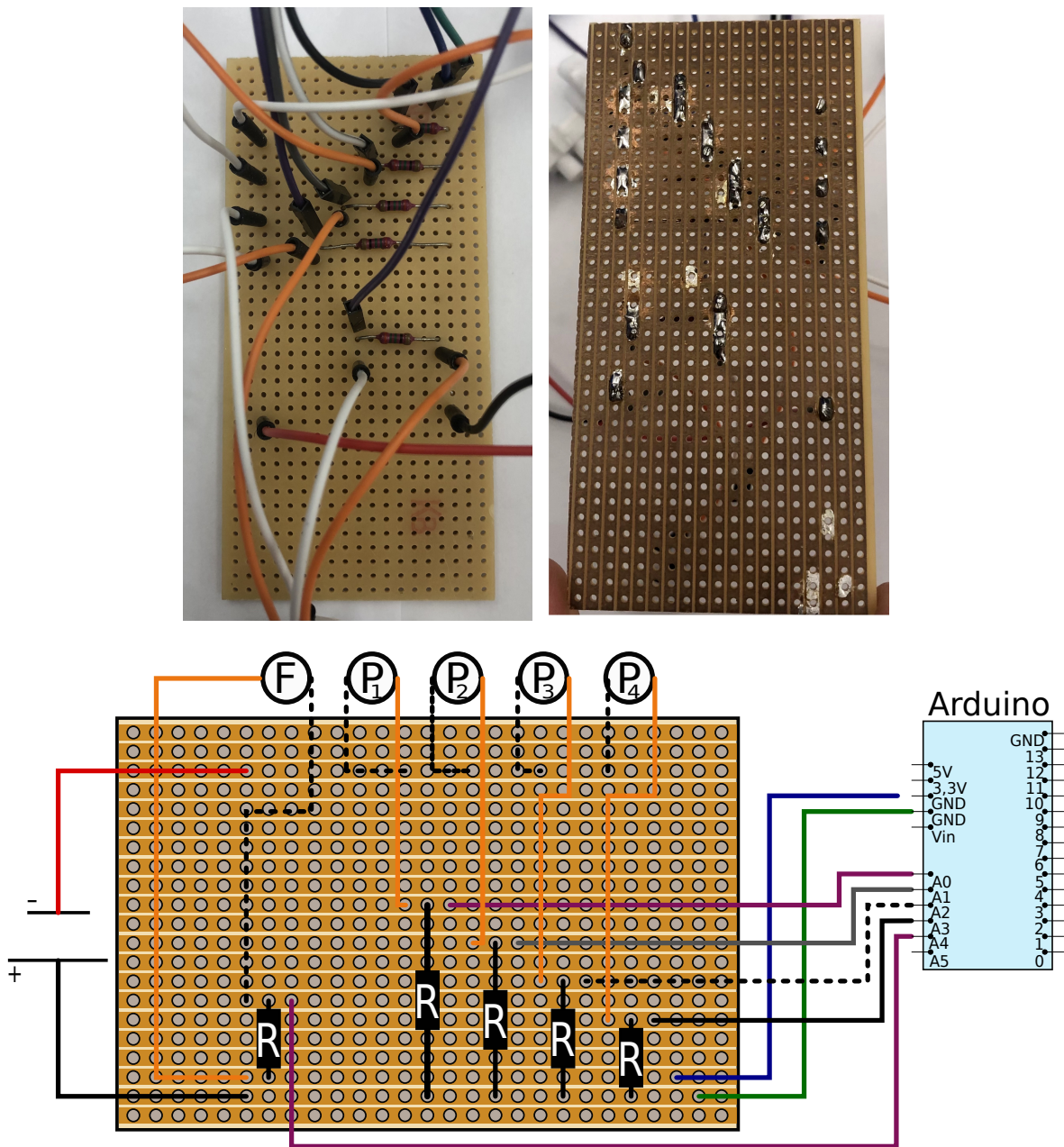
Im gesamten Aufbau müssen ein Flussmessgerät und vier Drucksensoren ausgelesen werden. Zudem soll ein Ventil mit Hilfe der zugehörigen Steuereinheit und des 4-Channel-Relais gesteuert werden. Da ein Arduino über sechs analoge Pins verfügt, können alle fünf Sensoren mit einem Arduino ausgelesen werden. Für die Steuerung des Ventils wird ein zweiter Arduino verwendet, an dem die Schaltung aus Abschnitt 4.1 realisiert wird.

Das Flussmessgerät hat bereits eine Spannungsversorgung, für die Differenzdrucksensoren muss zusätzlich eine Spannungsquelle in Reihe geschaltet werden. Damit nicht jeder Drucksensor einzeln versorgt werden muss, werden die vier Sensoren parallel mit einer Spannungsquelle versorgt, was in Abbildung 4.4 gezeigt ist. Als Spannungsquelle dient ein Linearnetzteil mit einer Ausgangsspannung von 12 V. Die Digitalisierung funktioniert nach dem in Abschnitt 4.2 beschriebenen Prinzip. Die über einen Widerstand abfallende Spannung wird für jeden Sensor an einem analogen Pin in einen digitalen Wert umgewandelt.



**Abbildung 4.4:** Vier Drucksensoren werden parallel mit Spannung versorgt. Die Digitalisierung des Signals wird mit einem Arduino realisiert. Durch die Parallelschaltung jeweils eines analogen Pins und des Ground-Pins zu einem Widerstand, können die Messwerte der einzelnen Sensoren ausgelesen werden.

Die Widerstände, die für die Schaltung benötigt werden, sind auf eine Streifenrasterplatine gelötet. Zusätzlich dazu sind auch Kabel an die Platine gelötet, an die die Sensoren, die Spannungsquelle, sowie der Arduino angeschlossen werden können. Die gesamte Schaltung, inklusive der Platine, ist in Abbildung 4.5 zu sehen und wird in der Bildunterschrift erklärt.



**Abbildung 4.5:** Die Schaltung zur Auslese des Flussmessgeräts und der vier Drucksensoren ist auf eine Platine gelötet. Unten ist die gesamte Schaltung zu sehen. Links oben ist die Rückseite der Platine abgebildet. Die zugehörigen Lötstellen auf der anderen Seite der Platine sind rechts oben abgebildet. Die Farben in der Skizze sind passend zu denen auf der Platine gewählt. Dabei werden weiße Kabel durch schwarz gestrichelte Linien ersetzt.

Es sind fünf Widerstände aufgelötet. Einer davon ist zur Auslese des Flowmeters F, welches in Reihe geschaltet ist. Parallel dazu sind der analoge Pin A4 mit einem lilanen Kabel und ein Ground-Pin mit einem grünen Kabel geschaltet, so dass die Schaltung aus Abbildung 4.3 realisiert wird. Die vier Drucksensoren  $P_1$  bis  $P_4$  werden parallel mit einer Spannungsquelle versorgt. Die Sensoren werden jeweils mit einem weißem und einem orangenen Kabel in Reihe mit dem jeweiligen Widerstand und der Spannungsquelle geschaltet. Um die Schaltung aus Abbildung 4.4 zu erhalten, sind 4 analoge Pins parallel zu jeweils einem Widerstand geschaltet, während sie sich einen Ground-Pin teilen.

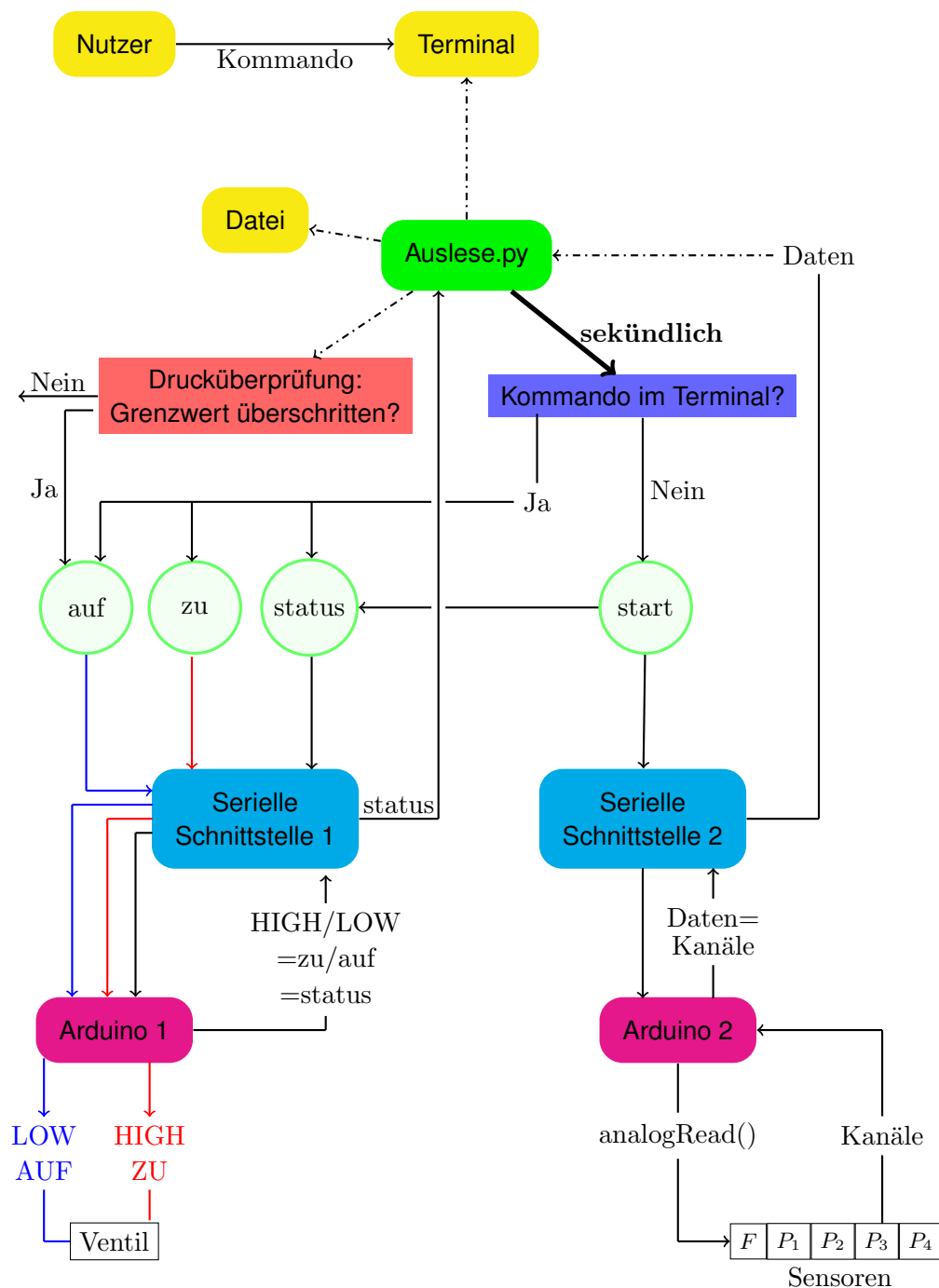
## 4.4 Auslese und Steuerung

Zur Auslese und Steuerung werden mit der Arduino IDE erstellte Programme auf die beiden Arduinos geladen. Die Arduinos können Daten an die serielle Schnittstelle senden und von dort lesen, also empfangen. Von Seiten des Computers läuft die Kommunikation über ein Python-Skript, welches genauso Daten an die serielle Schnittstelle senden und von dort einlesen kann. Das Python-Programm kann zusätzlich Daten in Dateien oder das Terminal schreiben, sowie Daten aus dem Terminal lesen. So bildet es die Schnittstelle zwischen Nutzer und den Arduinos, beziehungsweise den Sensoren und dem Ventil.

Die realisierte Kommunikation ist in Abbildung 4.6 veranschaulicht. Der Nutzer kann während der Messung auf das Terminal und die Dateien zugreifen, weswegen diese farblich gleich dargestellt sind. Das Python-Programm „Auslese.py“ funktioniert anhand von Funktionen, die in den eckigen Kästchen abgebildet sind. Sekündlich wird anhand einer Funktion, in blau, überprüft, ob der Nutzer ein Kommando ins Terminal eingegeben hat, falls ja, wird dieses weitergegeben. Wurde keines eingegeben, wird die Datenauslese gestartet. Dafür wird der Status des Ventils, sowie die Kanäle der Sensoren abgefragt. Beides wird über die serielle Schnittstelle vom Python-Programm gelesen. Die Daten werden alle zur direkten Sichtbarkeit für den Nutzer ins Terminal geschrieben und zur späteren Verarbeitung in einer Datei gespeichert. Außerdem wird überprüft, ob die in Abschnitt 4.5.2 diskutierte obere Grenze für den Gasdruck überschritten wird. Wenn die Grenze überschritten ist, wird dann das Kommando zum öffnen des Ventils an die serielle Schnittstelle gesendet. Ist die Grenze nicht überschritten, passiert nichts. Geschlossen wird das Ventil ausschließlich manuell durch einen Befehl des Nutzers.

Erhält die serielle Schnittstelle Eingaben, die den Befehlen in den grünen Kreisen in Abbildung 4.6 entsprechen, findet eine Kommunikation mit dem Arduino statt. Bei Eingabe eines Befehls in die serielle Schnittstelle wird dieser vom Arduino gelesen. Bei Arduino 1 kann es sich um die Befehle *auf*, *zu* und *status* handeln. Die Farbkodierung wird dabei aus Abschnitt 4.1 übernommen. Wie dort beschrieben, wird der digitale Pin auf HIGH oder LOW gesetzt um das Ventil zu öffnen oder schließen. Für die Statusabfrage wird überprüft, ob der digitale Pin auf HIGH oder LOW gesetzt ist. Das kodiert den Status, welcher dann zurück gegeben werden kann.

Arduino 2 reagiert auf ein Startsignal, *start*, welches an die serielle Schnittstelle gegeben wird. Dann werden die analogen Pins ausgelesen und die Informationen über die Messwerte der Sensoren als Kanäle des Arduinos an die serielle Schnittstelle zurück gegeben.



**Abbildung 4.6:** In der Skizze wird die Datenauslese veranschaulicht. Der Nutzer kann dabei über das Terminal Befehle geben und auf Dateien mit den Daten zugreifen. Ein Python-Programm steuert über serielle Schnittstellen beide Arduinos und liest Daten ein. Diese werden in eine Datei und das Terminal geschrieben, damit sie für den Nutzer lesbar sind.

## 4.5 Testen und optimieren der Schaltung

Zum Test des Verfahrens der Digitalisierung anhand des Arduinos, wurden mehrere Messungen durchgeführt. Unterschiedliche Differenzdrucksensoren, sowie das Flussmessgerät wurden mithilfe der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Schaltung ausgelesen. Die Sensoren waren dabei an kein System angeschlossen. Der Differenzdruck beträgt 0 mbar und der Fluss  $0 \frac{1}{h}$ . Die Messwerte sollten also auch 0 mbar und  $0 \frac{1}{h}$  betragen. Es sind keine Schwankungen in den Werten zu erwarten, da sich weder der Differenzdruck ändern kann, noch der Gasfluss. Da hier im Wesentlichen die technischen Details analysiert werden sollen und die Diskretisierung der Messwerte durch den Analog-Digital-Konverter ein zentraler Bestandteil ist, werden diese anhand der Belegung der Kanäle des Arduinos vorgenommen. Die Drücke und Flüsse, die anhand der Umrechnung bestimmt werden, können noch um ihren Offset korrigiert werden, hier soll aber vor allem die Konstanz überprüft werden. Die errechneten Werte für Fluss und Druck werden in den Darstellungen zusätzlich zu den Kanälen des Arduinos zur Einordnung in Größenordnungen angegeben.

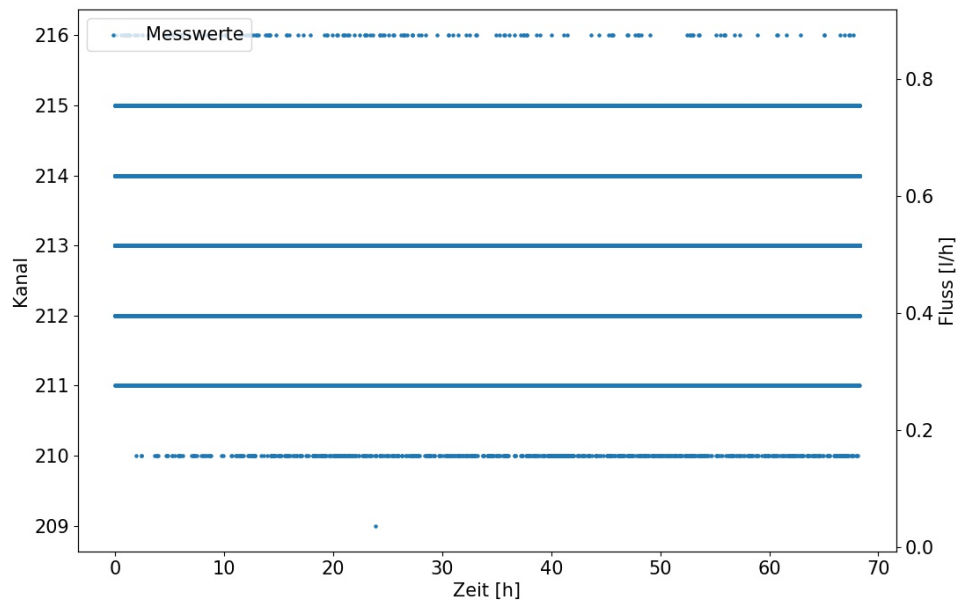
Die Messwerte der Drucksensoren und die des Flussmessgeräts werden getrennt betrachtet, da unterschiedliche Verhalten beobachtet wurde.

### 4.5.1 Flussmessgerät

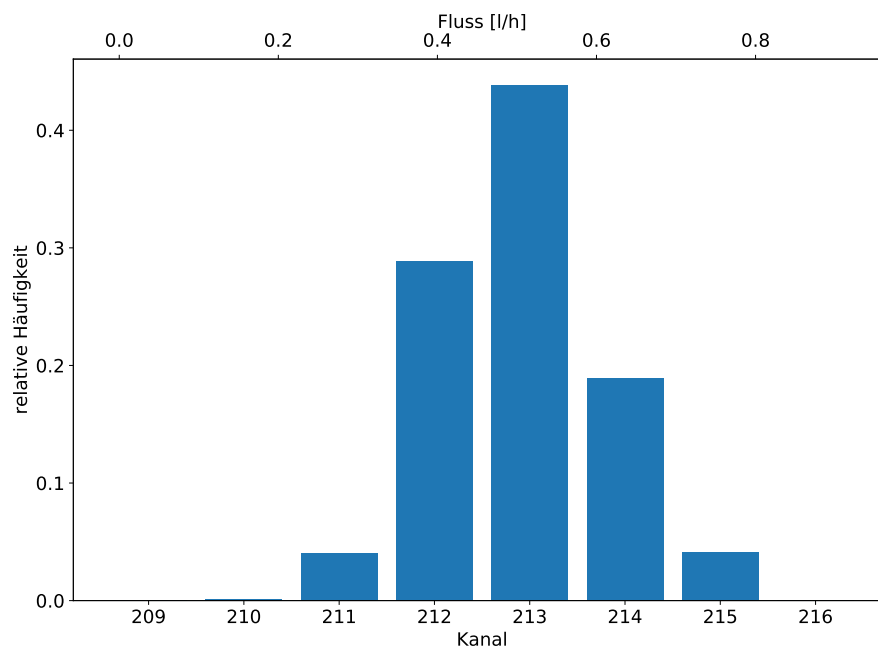
Bei den Ergebnissen der Messungen mit dem Flussmessgerät sind Schwankungen um einen konstanten Wert zu erkennen. In Abbildung 4.7a sind die Ergebnisse einer Langzeitmessung über 68 h für das Flussmessgerät aufgetragen. Statt, wie erwartet einen konstanten Wert zu messen, schwankt der Arduino bei der Belegung der Kanäle. Zur Analyse ist in Abbildung 4.7b das zugehörige Histogramm zu den Messwerten abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die Messwerte um ein klares Maximum gestreut sind. Die Streuung liegt aber unter der vom Hersteller des Flussmessgeräts angegebenen Unsicherheit von  $\pm 1 \frac{1}{h}$ .

Bei höheren Flüssen sind stärkere Streuungen der Messwerte zu erkennen. Auch die digitale Anzeige des Flussmessgeräts schwankt während dieser Messungen auf einige Nachkommastellen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Flüsse bis ungefähr  $75 \frac{1}{h}$  eingestellt. Anhand Flüssen dieser Größenordnung wird analysiert, wie sich die Messung mit dem Flussmessgerät bei hohen Flüssen verhält. In Abbildung 4.8 sind zwei Histogramme von Messungen, bei denen konstant ein Fluss von ungefähr  $75 \frac{1}{h}$  eingestellt war, zu sehen. Das Maximum ist weniger klar und die Schwankungen sind stärker als bei der Nullmessung. Trotzdem befinden sich die Schwankungen um das Maximum innerhalb der vom Hersteller angegebenen Unsicherheit.

Aus den Messwerten über die gesamte Messdauer mit einem konstanten Fluss soll dieser

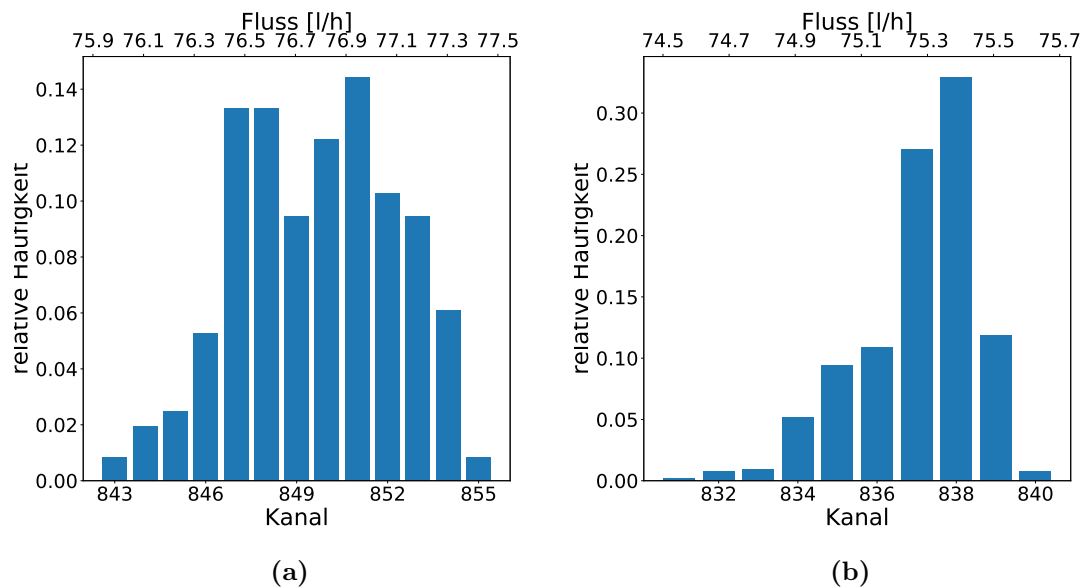


(a) Die Messwerte einer Nullmessung mit dem Flussmessgerät über eine Dauer von 68 h sind im Diagramm aufgetragen. Neben dem bestimmten Fluss sind die Werte, die der Arduino ausgegeben hat, auf einer zweiten y-Achse aufgetragen. Anstatt nur einen konstanten Wert zu messen, ist eine Streuung der Werte zu erkennen.



(b) Im Histogramm wird die Verteilung der Messwerte über die gesamte Messdauer von 68 h dargestellt. Die Messwerte sind um ein klares Maximum gestreut, welches als gemessener Wert festgelegt wird.

**Abbildung 4.7:** Ergebnisse einer Nullmessung mit dem Flussmessgerät



**Abbildung 4.8:** Die Verteilungen der Werte über einen Messzeitraum von 10 min bei konstant gehaltenem Fluss sind für zwei Messungen bei hohem Fluss in den Histogrammen dargestellt. Die Histogramme weisen weniger klare Maxima auf. Die Verteilung der Messwerte um das Maximum ist nicht symmetrisch. Es werden mehr Werte angenommen, die geringer als das Maximum sind.

konstante Fluss bestimmt werden. Eine Möglichkeit zur Bestimmung eines konstanten Flusses wäre die Mittelung über die gesamte Messdauer. Da aber an der digitalen Anzeige des Flussmessgeräts während laufenden Betriebs beobachtet wurde, dass der gemessene Fluss nach Einstellen noch einige Minuten steigt, könnte das die Daten zu geringeren Werten hin verfälschen. In appendix B.1.1 wird dieser Anstieg nochmal anhand von Messwerten gezeigt. Bei allen Messungen mit konstantem Fluss wird im Folgenden zwar darauf geachtet, zu warten, bis konstante Werte eingestellt sind, jedoch kann das Verfälschen der Werte nach unten nicht vollständig ausgeschlossen werden. Auch bei den in Abbildung 4.8 gezeigten Ergebnissen ist dieses Verziehen der Messwerte zu erkennen. Werte unterhalb des Maximums sind deutlich häufiger belegt als Werte oberhalb des Maximums. Deswegen wird die Mittelung nicht zur Bestimmung des konstanten Flusses verwendet.

Auch bei den Messungen mit hohem Fluss ist die Streuung um das Maximum innerhalb der vom Hersteller angegebenen Unsicherheit. Die Schwankungen können mit der Ungenauigkeit des Geräts begründet werden. Das rechtfertigt die Bestimmung eines konstanten Flusses als Maximum des Histogramms über die gesamte Messdauer bei gleicher Flussregler-Einstellung. Der Wert entspricht dem wahrscheinlichsten Wert der Messung über den gesamten Zeitraum.



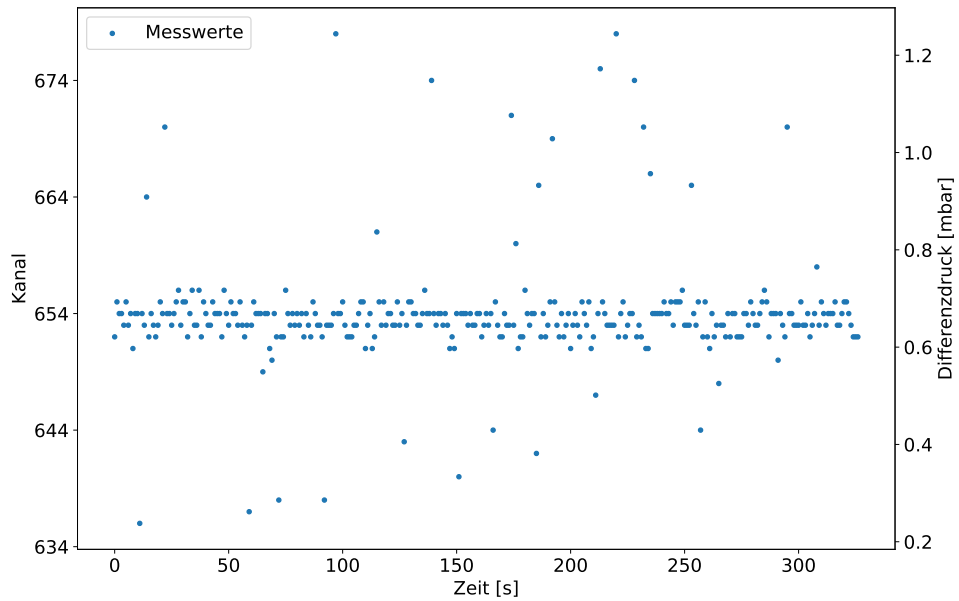
Weiterhin wurden Messungen durchgeführt, bei denen der Gasfluss variiert wurde. Die Messungen haben gezeigt, dass das Umstellen des Flusses erfasst wurde. Auffällig waren einzelne starke Ausreißer im Bereich von mehreren  $10 \frac{1}{h}$ . Bei einzelnen solch hohen Ausreißern ist davon auszugehen, dass diese durch eine Fehlbelegung der Kanäle entstehen. Solche Ausreißer werden im Falle ihres Auftretens in Diagrammen nicht gezeigt, um die Skalierung der Werte beizubehalten.

#### 4.5.2 Drucksensoren

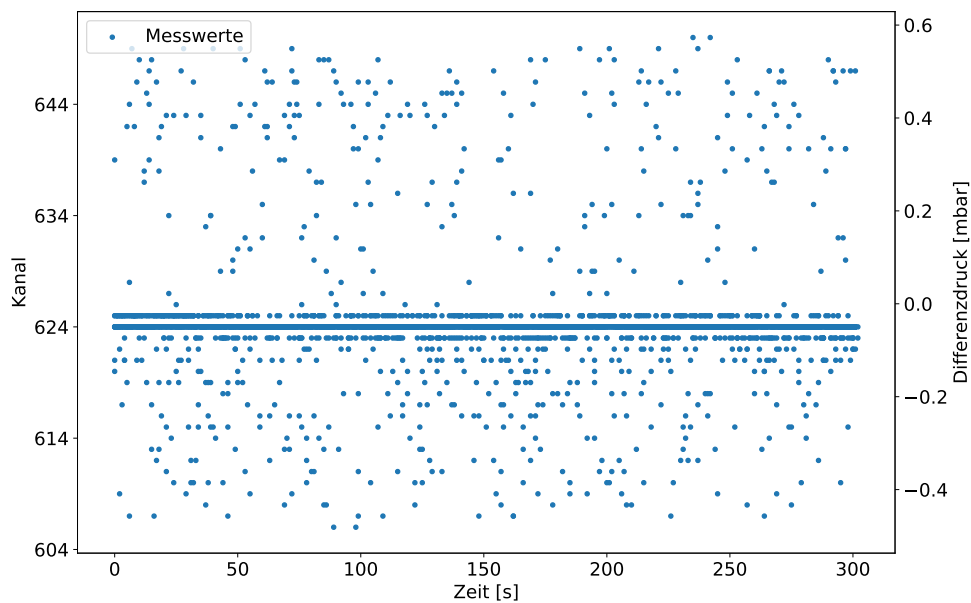
Erste Ergebnisse einer Messung, bei der ein Drucksensor mit der Schaltung aus Abschnitt 4.3 ausgelesen wurde, während er offen lag, weisen starke Schwankungen auf. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.9a zu sehen. Die Erwartung, einen konstanten Wert zu messen, wird nicht erfüllt. Es ist zu erkennen, dass immer wieder einzelne Messwerte von den Werten, die zuvor und danach gemessen wurden, stark abweichen. Die Schwankungen in einem Intervall von 1 mbar sind in Relation zu den erwarteten Messwerten groß. Die Kammer soll bei Überdrücken bis zu 1 mbar untersucht werden, Schwankungen in dieser Größenordnung sollen also nicht auftreten.

Um mögliche Ursachen auszuschließen, wurden die einzelnen Bauteile der Schaltung ausgetauscht. Die Schaltung wurde auf einem Steckbrett neu zusammengebaut, damit ein Fehler im Zusammenbau, sowie fehlerhafte Kabel, Lötstellen oder Widerstände ausgeschlossen werden konnten. Der Arduino, sowie die Sensoren wurden jeweils ausgetauscht. Zudem wurden alle analogen Pins einzeln und parallel verwendet. Die Messdauer wurde variiert zwischen einigen Minuten und mehreren Tagen, um auszuschließen, dass die Sensoren eine längere Zeit brauchen, um sich einzupendeln. Einer der Drucksensoren wurde in einem anderen Aufbau mit einer anderen Methode ausgelesen, um auszuschließen, dass die Sensoren fehlerhaft sind. Alle Messergebnisse weisen die gleichen Schwankungen auf. Bei Versorgung des Arduinos mit einem externen Netzteil konnten die besten Ergebnisse erzielt werden, jedoch treten noch immer deutliche Schwankungen auf.

In einer weiteren Messung wurde die Zeit zwischen der Aufnahme der Datenpunkte variiert. In Abbildung 4.9b sind die Messwerte bei Aufnahme von zehn Messwerten pro Sekunde zu sehen. Auch hier sind die Schwankungen der Messwerte deutlich zu erkennen. Innerhalb der selben Sekunde wurden Messwerte mit Differenzen von bis zu 1 mbar gemessen. Das Auftreten der Schwankungen der Messwerte unabhängig vom Zeitintervall der Messung zeigt, dass die Messwerte nicht physikalisch begründet sind. Innerhalb weniger 100 ms sind keine Schwankungen um 1 mbar zu erwarten. Da auch keine andere Ursache im Aufbau gefunden werden können, wird davon ausgegangen, dass die Messwerte unphysikalisch sind. Vermutlich stammen sie aus fehlerhafter Kanalbelegung im Analog-Digital-Konverter des Arduinos.

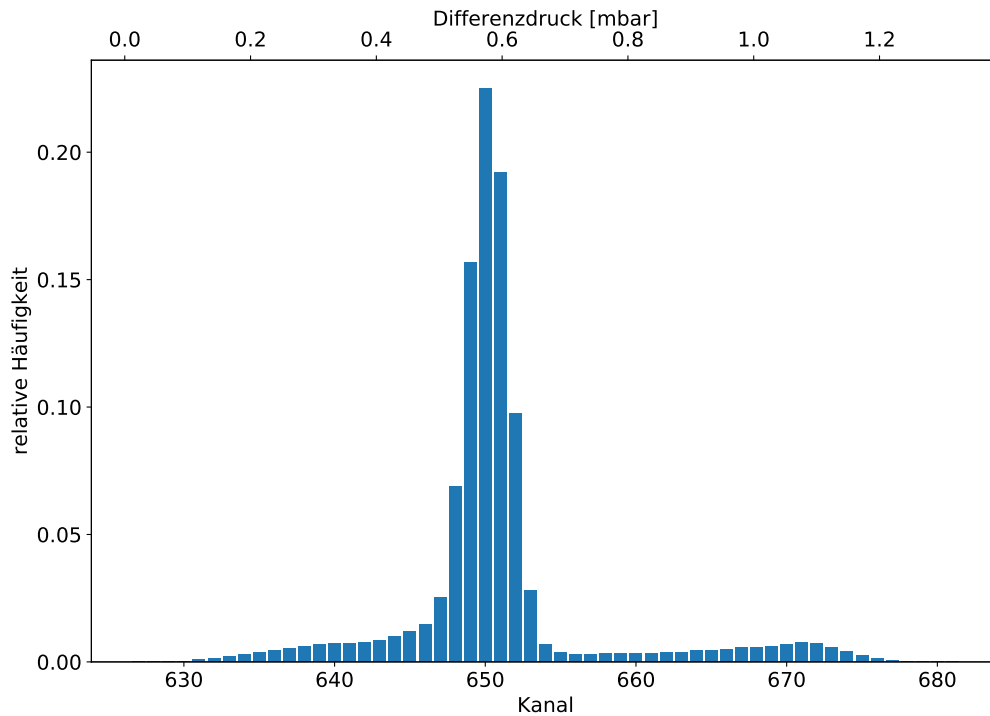


(a)



(b)

**Abbildung 4.9:** Die Messwerte zweier Nullmessungen eines der Differenzdrucksensoren sind abgebildet. Die Datenaufnahme erfolgte über einen Zeitraum von ungefähr 300 s in a) einmal pro Sekunde und in b) zehn mal pro Sekunde. Der Sensor wurde mit der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Schaltung ausgelesen. Da der Sensor an kein System angeschlossen war, wird erwartet, einen konstanten Wert, den Nullpunkt des Sensors, zu messen. Die Messwerte schwanken aber in einem Intervall von 1 mbar. Deutlich zu sehen ist die Diskretisierung der Messwerte durch die Digitalisierung. Auf das Einzeichnen von Unsicherheiten wird zur Übersichtlichkeit verzichtet.



**Abbildung 4.10:** Das Histogramm zeigt die Verteilung der gemessenen Werte bei einer Nullmessung mit einem der Drucksensoren. Dabei sind die Messwerte den Kanälen des Arduinos zugeordnet, eine zweite x-Achse gibt aber die Umrechnung in den Differenzdruck nach Gleichung (4.4) an. Neben einem klaren Maximum ist ein Nebenmaximum oberhalb des Hauptmaximums zu erkennen. Bei der Fehlbelegung der Kanäle werden solche oberhalb des Hauptmaximums deutlich öfter belegt.

Da die Schwankungen nicht vermieden werden können, müssen Methoden zum Umgang mit ihnen entwickelt werden. Dafür werden im Folgenden die Ergebnisse einer Langzeitmessung analysiert.

In Abbildung 4.10 ist ein Histogramm zu sehen, welches die Verteilung der Werte bei der Nullmessung auf die Kanäle des Arduinos zeigt. Es ist ein klares Maximum zu erkennen, um welches die Werte gestreut sind. Neben dem Hauptmaximum ist ein weiteres Maximum zu sehen, welches deutlich kleiner ist. Im Arduino werden Kanäle deutlich über einem klaren Maximum häufiger belegt, so dass sich ein Nebenmaximum bildet.

Da die Funktionsweise des Konverters im Arduino nicht bekannt ist, kann dieser Fehler nicht näher erläutert werden. Es ist aber davon auszugehen, dass Vergleiche zwischen gemessenen Werten und Referenzen statt finden. Eine fehlerhafte Abschätzung zu größeren Werten hin scheint dabei wahrscheinlicher zu sein.

Um die unphysikalischen Messwerte heraus zu filtern, muss ein Umgang mit den Messwerten gefunden werden. Werden Messungen durchgeführt, bei denen ein konstanter Fluss eingestellt

wird, wird auch ein konstanter Differenzdruck zur Umgebung erwartet. Bei diesen Messungen kann der Fluss eingestellt und konstant gehalten werden, während die Daten der Sensoren aufgezeichnet werden. Der Messwert kann dann aus den Messwerten im gesamten Messintervall bestimmt werden.

Die Betrachtung des Histogramms als Wahrscheinlichkeitsverteilung liefert mehrere Möglichkeiten einen Messwert festzulegen. Zum Beispiel ist das der Mittelwert. Dieser lässt sich anhand der Mittelung der Daten bestimmen. Dabei wäre aber auf Grund des Nebenmaximums eine Verfälschung hin zu höheren Werten zu erwarten. Alternativ könnte ein Gauß-Fit angelegt werden und die Position dessen Maximums als Messwert gewählt werden.

Beides wurde anhand der Daten durchgeführt. In Abbildung 4.11a wurde für die Daten ein Gauß-Fit der Form

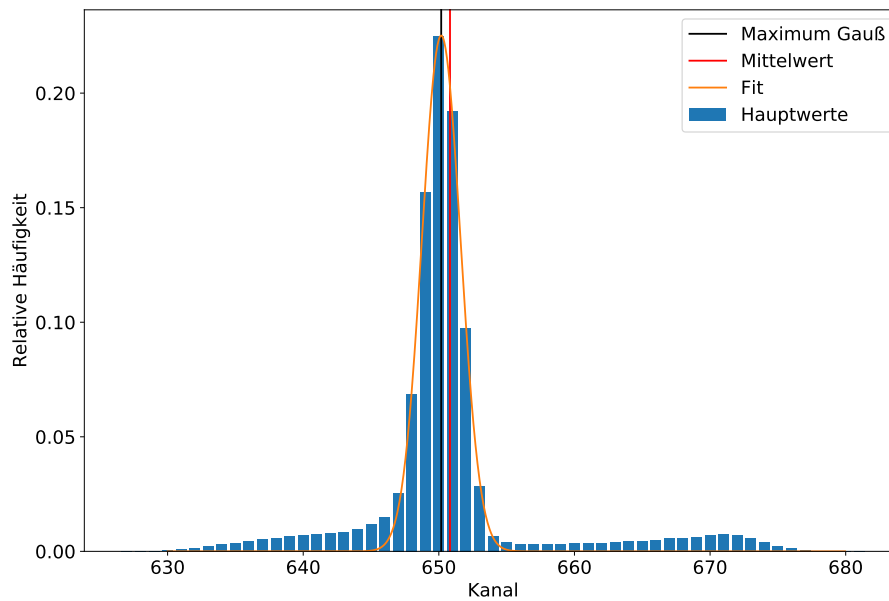
$$f(x) = A \cdot \exp \frac{-(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \quad (4.9)$$

durchgeführt und der Mittelwert gebildet. Beide so bestimmten Mittelwerte sind in der Abbildung eingezeichnet. Es ist deutlich zu sehen, dass der Mittelwert durch das Nebenmaximum hin zu höheren Werten verschoben wird. Um diese Verschiebung zu vermeiden, sollen die unphysikalischen Werte nicht betrachtet werden.

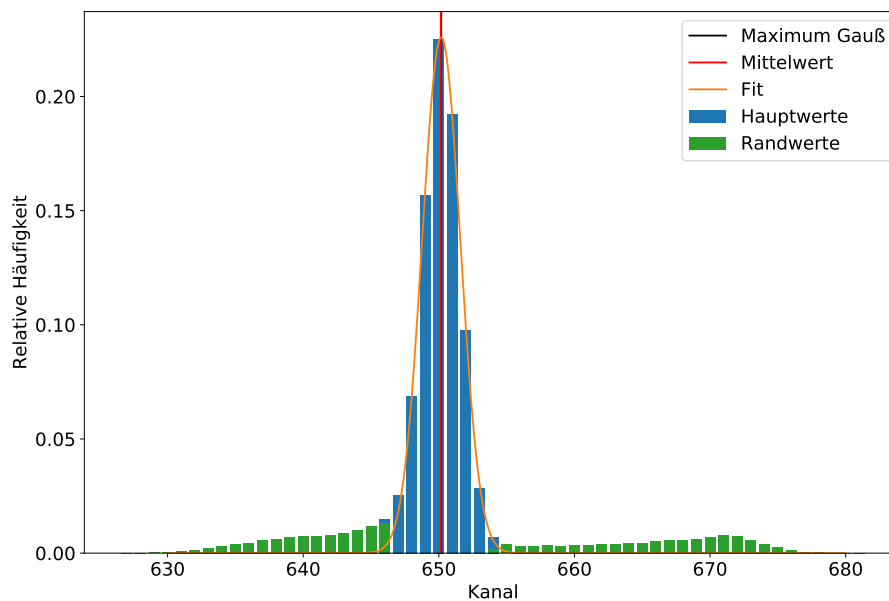
Dafür werden sowohl Anteile der höchsten, als auch der niedrigsten Werte in der Berechnung nicht berücksichtigt. In Abbildung 4.11b wurden jeweils die 10 % höchsten und niedrigsten Messwerte bei der Bildung des Mittelwerts und Anlegen des Gauß-Fits nicht berücksichtigt. Die nicht berücksichtigten Werte sind in grün eingezeichnet. Der durch die beiden Methoden bestimmte Wert unterscheidet sich kaum.

Zur genaueren Untersuchung dieser Annäherung wurden unterschiedliche Anteile der Werte aus der Berechnung herausgenommen. In Abbildung 4.12 sind die bestimmten Messwerte für unterschiedliche Anteile nicht berücksichtigter Daten angegeben. Die zugehörigen Histogramme und Fits, sowie die Fitparameter sind in B.1.2 zu sehen. Der anhand des Gauß-Fits bestimmte Messwert ändert sich kaum. Der Mittelwert ist bei der Eliminierung weniger Werte höher als der Gauß-Wert. Mit zunehmendem Anteil an nicht berücksichtigten Messwerten nähert er sich aber der Position des Maximums des Gauß-Fits deutlich an, bis sich beide kaum unterscheiden.

Zusätzlich ist der wahrscheinlichste Wert eingezeichnet. Dieser entspricht dem Maximum des Histogramms. Bei Histogrammen in denen ein Kanal neben dem Maximum ähnlich oft belegt ist, könnte man argumentieren, dass der tatsächliche Wert vermutlich zwischen diesen beiden Kanälen liegt. Diese begrenzte Auflösung wird durch die Digitalisierung der Werte in Kauf genommen. Eine Digitalisierung bedeutet auch gleichzeitig eine Diskretisierung der Messwerte.

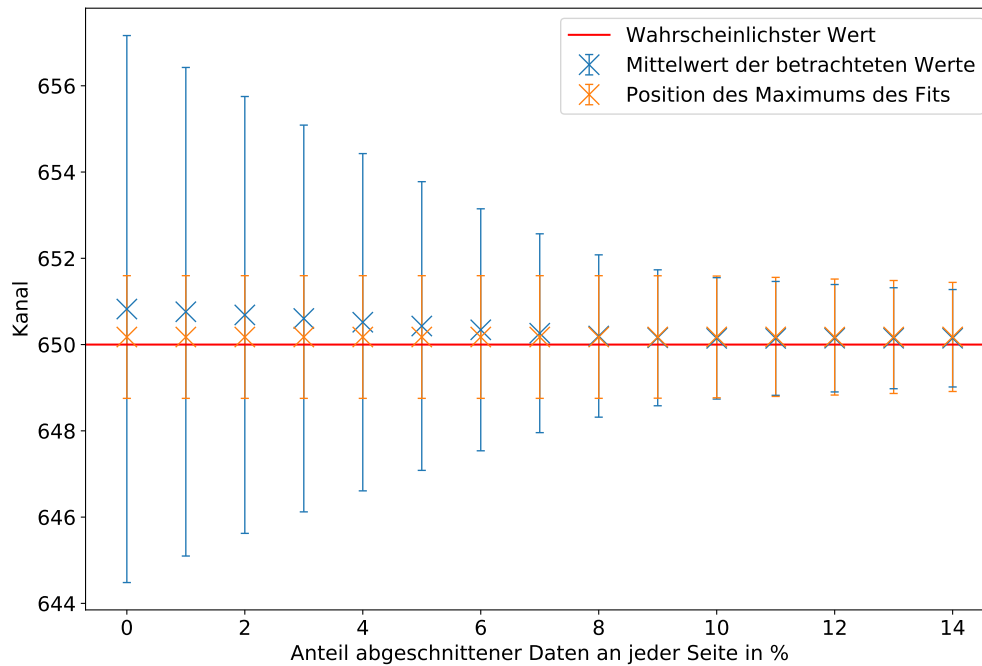


(a)



(b)

**Abbildung 4.11:** Die Werte der Langzeitmessung sind wieder als Histogramm der Belegung der Kanäle am Arduino dargestellt. Die Bestimmung des Messwertes sollte dabei anhand einer Mittelung und eines Gauß-Fits durchgeführt werden. Dabei wurden unterschiedliche Anteile der höchsten und niedrigsten Werte nicht berücksichtigt. Diese sind unphysikalisch und verfälschen die Messwerte. In a) wurden alle Messwerte berücksichtigt. In b) wurden jeweils die höchsten und niedrigsten 10 % der Messwerte bei Bildung des Fits und des Mittelwertes nicht betrachtet. Es ist eine deutliche Annäherung des durch Mittelung bestimmten Mittelwerts an den Mittelpunkt der Gauß-Kurve zu sehen.



**Abbildung 4.12:** Die Messwerte eines konstanten Drucks wurden anhand eines Gauß-Fits als Position des Maximums und durch Mittelung für die Daten der Langzeitmessung bestimmt. Als Unsicherheit wurde die Standardabweichung für den Mittelwert, beziehungsweise  $\sigma$  für den Gauß-Fit eingetragen. Dabei wurden unterschiedliche Anteile der Messwerte nicht berücksichtigt. Zum Vergleich ist zusätzlich der wahrscheinlichste Messwert eingetragen.

Die Betrachtung der festgelegten Messwerte zeigt, dass sowohl die durch den Gauß-Fit bestimmten, als auch die durch Mittelung bestimmten immer in ihren Unsicherheitsintervallen mit dem wahrscheinlichsten Wert übereinstimmen. Bei Eliminierung der scheinbar unphysikalischen Daten ist eine deutliche Annäherung der festgelegten Messwerte an den wahrscheinlichsten Wert ersichtlich. Das rechtfertigt die Verwendung des wahrscheinlichsten Werts als tatsächlichen Messwert für Messungen mit konstantem Fluss und damit auch Differenzdruck. Die Unsicherheit durch die begrenzte Auflösung der Digitalisierung bleibt so erhalten. Weiterhin wurden Messungen mit änderndem Differenzdruck durchgeführt. Auch dort sind die Ausreißer der Messwerte vorhanden. Jedoch sind die Verläufe der Messwerte klar zu sehen. Zur Analyse bieten sich im Folgenden Fits an, die den Verlauf des Großteils der Messwerte beschreiben können.

Die größere Schwierigkeit bietet die Steuerung des Ventils. Das Ventil soll bei Überschreiten eines bestimmten Drucks, der mit den Drucksensoren gemessen wird, geöffnet werden. Da es viele Ausreißer gibt, würde das Ventil bei Betrachtung einzelner Werte häufig zu früh

geöffnet werden. Um das zu vermeiden, wurden unterschiedliche Ansätze von Filterfunktionen getestet, die anhand der Mittelung über Messwerte funktionieren. Am Ende wurde eine Variante gewählt, bei der ein Sensor drei Messwerte hintereinander über dem festgelegten Grenzwert messen muss. Gerade bei niedrigen Grenzen erweist sich diese Filterbedingung als unzureichend. Sie führt dann zu verfrühtem Öffnen des Ventils. Daher wird die Ventilöffnungsbedingung um eine Forderung nach korreliertem Überschreiten der Messwerte zwischen den Sensoren ergänzt.





## 5 Methoden, Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Dichtigkeitsmessung

#### 5.1.1 Methoden

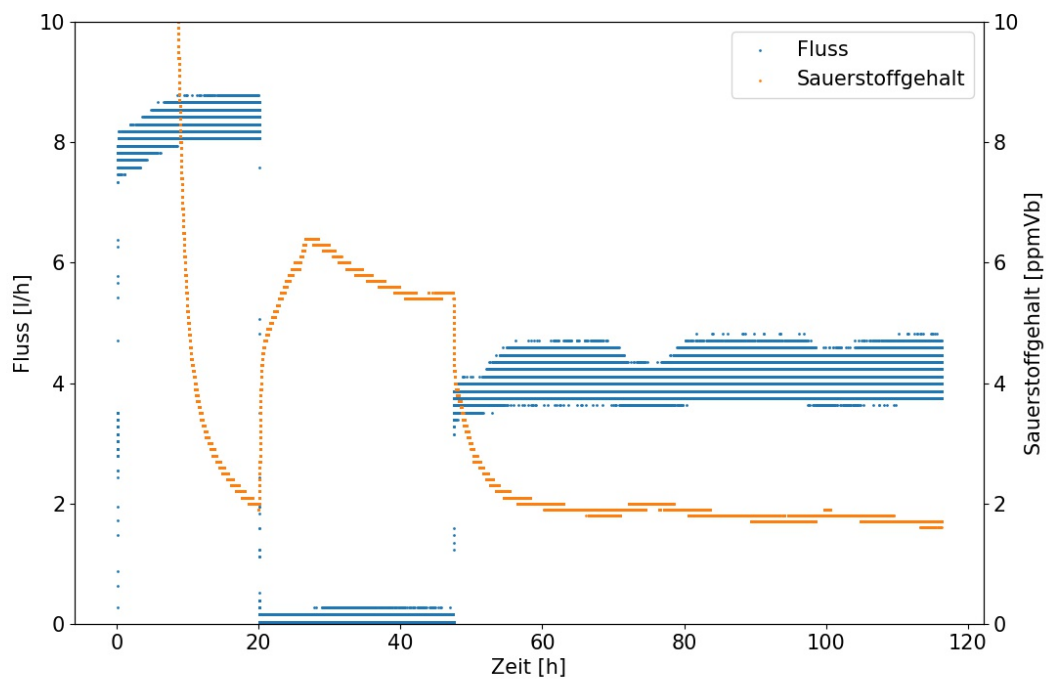
Zur Bestimmung der Dichtigkeit der Kammer wird ein Sauerstoff-Sensor hinter der Kammer eingebaut, um zu testen, ob das Gas in dem System durch Gase aus der Umgebung verunreinigt wird. Der Aufbau aus Abbildung 3.2 wird ohne Ventil und nur mit den Drucksensoren 1 und 2 verwendet. Der Sauerstoffgehalt wird bei unterschiedlichen Flüssen bestimmt.

#### 5.1.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 5.1 zu sehen. Nach Einstellen des ersten Flusses von ungefähr  $8 \frac{1}{h}$  sinkt der Sauerstoffgehalt stetig. Zu Beginn wurde ein hoher Sauerstoffgehalt gemessen. Bei Durchfluss des Gases wird der Sauerstoff herausgespült, bis ein niedriges Level erreicht wird. Hier könnte der Sauerstoffgehalt weiter sinken, da noch kein Plateau zu erkennen ist. Nach 20 h wurde der Fluss auf knapp über  $0 \frac{1}{h}$  eingestellt. Der Sauerstoffgehalt steigt erst und fällt dann, bis er bei knapp 6 ppmVb konstant bleibt. Der Fluss wurde ein weiteres Mal erhöht auf ungefähr  $4 \frac{1}{h}$ . Nach etwa 10 h erreicht der Sauerstoffgehalt einen Wert von unter 2 ppmVb und bleibt konstant.

Da alle gemessenen Werte des Sauerstoffgehalts unter dem Messbereich des Sensors liegen, sind die Daten nur begrenzt belastbar. Nach Abschnitt 3.1.4 kann trotzdem darauf geschlossen werden, dass der Sauerstoffgehalt für alle eingestellten Flüsse niedrig ist. Jedoch liegt die Kalibration des Sensors lange zurück, weswegen eine Überprüfung vorbehalten wird.

Auf Grundlage der Ergebnisse ist davon auszugehen, dass wenig Austausch zwischen Umgebung und dem Gassystem statt findet. Zumindest tritt kein Gas in das System ein. Das System und insbesondere die Dummy-Kammer scheinen nach bisherigen Erkenntnissen dicht zu sein. Beides kann für weitere Versuche verwendet werden.



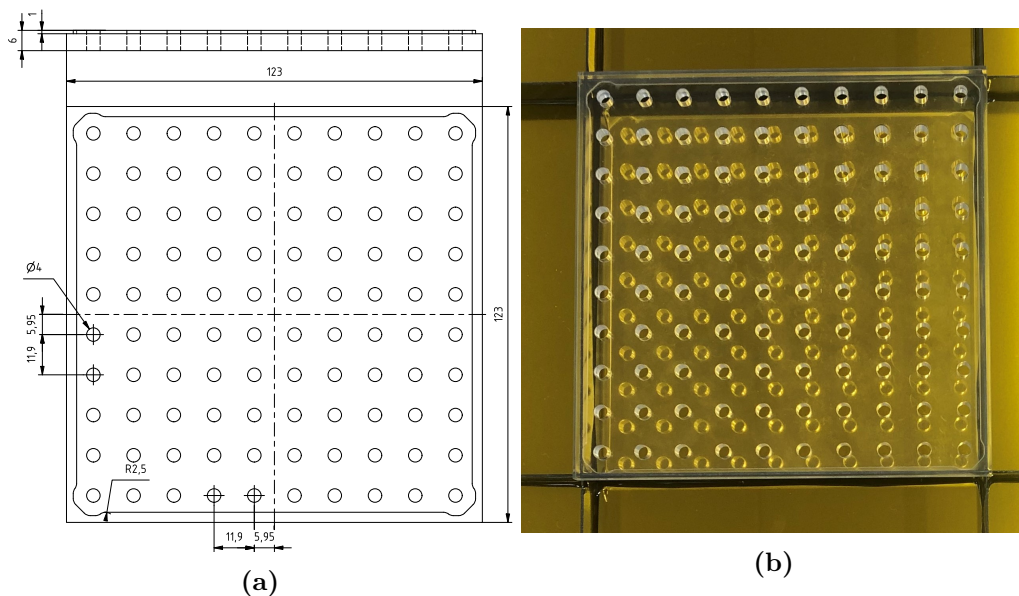
**Abbildung 5.1:** Der Sauerstoffgehalt wurde bei unterschiedlichen Flüssen bestimmt. Zu Beginn der Messung wird das System gespült, wodurch restliche Verunreinigungen herausgespült werden. Das führt zu einem starken Abfall des Sauerstoffgehalts. Nach diesem Abfall ist der Sauerstoffgehalt, bei drei unterschiedlichen Flüssen unter  $10 \frac{1}{h}$ , jeweils unter 8 ppmVb. Das ist unterhalb des genauen Messbereichs des Sensors, weswegen nur auf die allgemeine Aussage, dass der Sauerstoffgehalt sehr niedrig ist, zu schließen ist.

## 5.2 Messung der Auswölbung

### 5.2.1 Methoden

Bei unterschiedlichen Flüssen und somit auch Drücken wird die Auswölbung eines Kammerfensters vermessen. Ziel ist die Validierung von Modellen dieser Auswölbung und die Abschätzung einer maximalen Auslenkung der Folie. Dafür wird der Aufbau aus Abbildung 3.2 realisiert, wobei aber nur die Drucksensoren 1 und 2 eingebaut sind und auf den Sauerstoffsensor verzichtet wird. Mit dem Flussregler werden Flüsse zwischen  $0 \frac{1}{h}$  und etwa  $75 \frac{1}{h}$  eingestellt. Das Flussmessgerät, sowie die beiden Drucksensoren werden über die gesamte Dauer der Messungen ausgelesen, um jeweils Fluss und Differenzdruck zu erfassen.

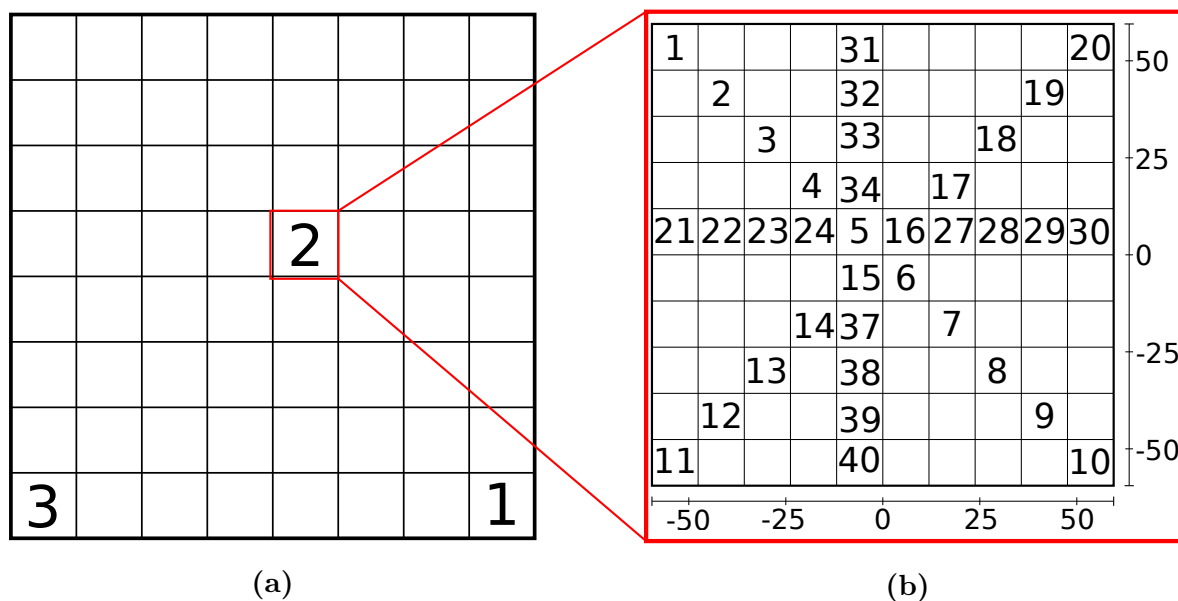
Die Auswölbung des Fensters setzt sich aus der der gesamten Folie und der der Fenstersegmente, welche zwischen den Carbon-Leisten liegen, zusammen. Als Aufbau zur Messung der Auswölbung eines Fenstersegments wurde eine Acrylglasplatte angefertigt. Eine technische Zeichnung dieser Platte ist in Abbildung 5.2a gegeben. Auf Grund des dort dargestellten Höhenprofils, kann die Platte, wie in Abbildung 5.2b zu sehen ist, in eine Fenstersprosse eingesetzt werden. Zu Beginn jeder Messung wird sie bündig an die untere rechte Ecke angelegt, um die Reproduzierbarkeit sicher zu stellen. Die Platte ist mit zehn Reihen mit jeweils zehn Löchern im Abstand von 11,9 mm versehen, an denen jeweils der Abstand zwischen Folie und Oberfläche der Platte bestimmt werden kann.



**Abbildung 5.2:** Zu sehen ist die zur Abstandsmessung verwendete Acrylglasplatte. a) In der Grafik sind die Maße der Platte anhand einer Ansicht von oben und einer von der Seite dargestellt. Die Längenangaben sind in Millimetern. Auf Grund der Größe und der Einkerbung am Rand, die das Höhenprofil am oberen Ende der Zeichnung zeigt, kann die Platte, wie in b) zu sehen ist, passgenau in eines der Fenstersegmente der Kammer gelegt werden.

Es wird erwartet, dass sich die einzelnen Fenstersegmente in ihrem Verhalten nicht unterscheiden. Das Raster der 8x8 Teilfenster ist schematisch in Abbildung 5.3a dargestellt. Im Versuchsverlauf werden zum Vergleich zwei Fenstersegmente separat vermessen. Davon befindet sich eins am Rand der Gesamtstruktur. Die Messung wird an den Fenstern zwei und drei aus Abbildung 5.3a durchgeführt.

Da eine symmetrische Verformung der Folie entlang ihrer Achsen erwartet wird, müssen nicht alle Löcher untersucht werden. In Abbildung 5.3b sind die Löcher, an denen der Abstand bestimmt wird, nummeriert. Dabei werden die beiden Diagonalen, sowie eine Vertikale und eine Horizontale nah der Mitte gewählt, um die vermutete Symmetrie entlang dieser Achsen zu bestätigen. In späteren Darstellungen werden Koordinaten verwendet, die den Abstand des Mittelpunkts des entsprechenden Lochs zum Mittelpunkt der Folie entsprechen. Es handelt sich um eine eindimensionale Darstellung, die in Abbildung 5.3b sowohl für die Horizontale, als auch für die Vertikale eingezeichnet ist.

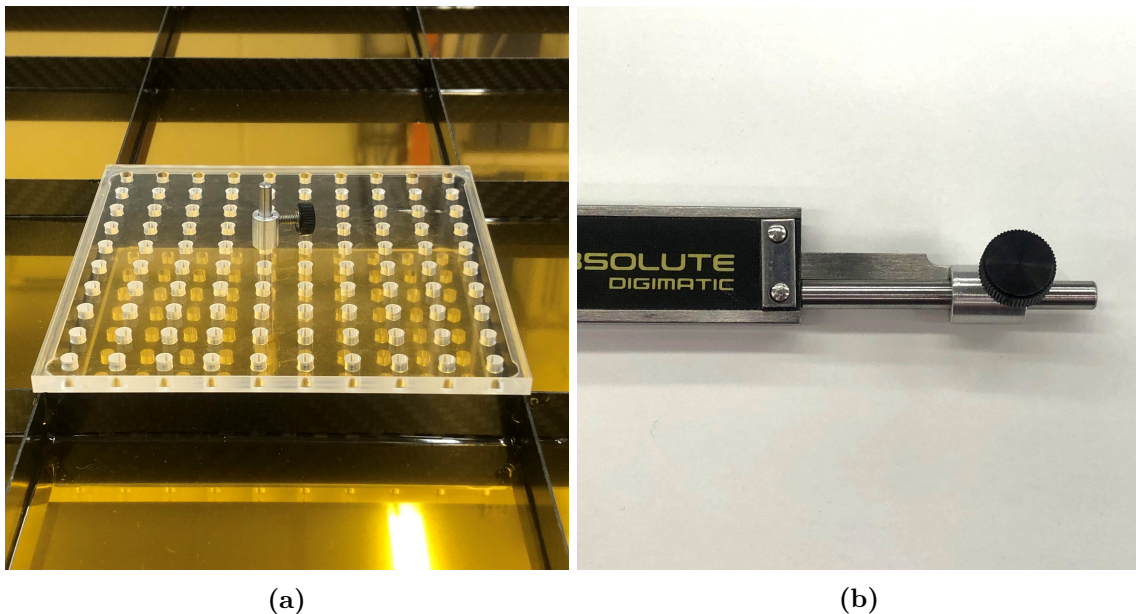


**Abbildung 5.3:** Zu sehen ist eine schematische Darstellung der Orte, an denen gemessen wird. Die Darstellung entspricht einer Draufsicht auf das Folienfenster der Kammer. a) Jede Kammer hat 8x8 Fenstersegmente, die hier dargestellt sind. Die drei Fenstersegmente, welche für die Messung ausgewählt werden, sind mit Nummern bezeichnet, um im Folgenden eine eindeutige Zuordnung zu gewährleisten. b) Die Löcher der Acrylglasplatte, an denen die Abstandsmessungen durchgeführt werden, sind die Messpunkte in einem der Fenster. Die Löcher sind zur Zuordnung nummeriert. Dabei werden zwei Diagonalen, eine Horizontale und eine Vertikale vermessen, um die vermutete Symmetrie zu untersuchen. In der späteren Darstellung werden Koordinaten verwendet, die den Abstand des Mittelpunktes des entsprechenden Lochs zum Mittelpunkt des Fensters angeben. Beispielhaft sind diese Abstände als Achsen für die Horizontale und Vertikale in Millimetern dargestellt.

Zur Bestimmung des Abstandes der Folie zur Acrylglasplatte wurden zwei Methoden entwickelt. Diese werden im Folgenden erläutert und verglichen, um eine Methode für die Durchführung der Messung auszuwählen.

### 5.2.1.1 Methode 1

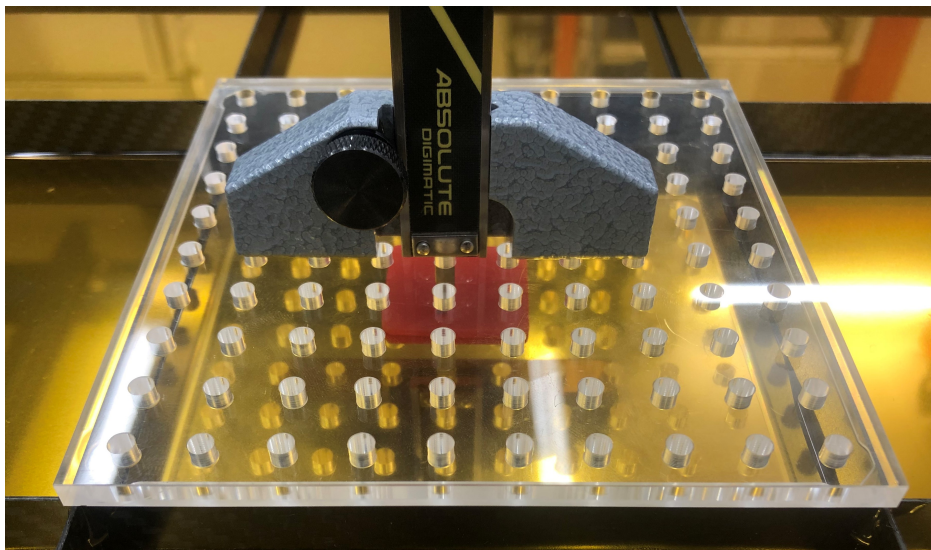
Zur Bestimmung des Abstandes wird ein Metallstab, der in Abbildung 5.4b zu sehen ist, verwendet. Dieser hat abgerundete Enden, so dass beschädigungsfreier Kontakt zur Eintrittsfolie der Kammer möglich ist. Zudem ist eine Metallhülse um den Stab gelegt. Diese ist entlang des Stabes beweglich, kann aber anhand einer Feststellschraube fixiert werden. Wie in Abbildung 5.4a zu sehen ist, kann der Stab in die Löcher der Acrylglasplatte eingeführt werden, so dass er auf der Folie aufliegt. Dann wird die Hülse mit der Schraube befestigt, während jene auf der Acrylglasplatte aufliegt. Der Metallstab kann wieder von der Kammer entfernt werden. Der Abstand der Hülse zum unteren Ende des Stabes entspricht nun dem Abstand der Folie zur Auflagefläche. Dieser kann durch die Messung mit einem Messschieber, wie sie in Abbildung 5.4b dargestellt ist, ermittelt werden.



**Abbildung 5.4:** Zur Messung des Abstandes der Folie zur Acrylglasplatte mit Methode 1 wird ein Metallstab mit einer fixierbaren Metallhülse verwendet. a) Der verwendete Metallstab ist in ein Loch der Acrylglasplatte, die auf einem Teilfenster aufliegt, eingeführt. b) Die Messung des Abstandes zwischen der Auflagefläche auf der Platte und der Kontaktstelle zur Folie an dem Metallstab wird mit einem Messschieber durchgeführt.

### 5.2.1.2 Methode 2

Für die zweite Methode wird der Messschieber an einer Tiefenmessbrücke, die in Abbildung 5.5 zu sehen ist, befestigt. Ein Plastikplättchen wird zum Schutz der Folie auf diese gelegt. Dann kann die Tiefenmessbrücke auf der Acrylglasplatte aufgelegt werden. Dieser Aufbau ist in Abbildung 5.5 zu sehen. Durch händische Verschiebung kann die Spitze des Messschiebers auf das Kunststoffplättchen aufgesetzt und der Abstand abgelesen werden. So wird der Abstand zwischen der Oberfläche der Acrylglasplatte und der des Kunststoffplättchens bestimmt.



**Abbildung 5.5:** Zur Messung des Abstandes mit Methode 2 wird der Messschieber verwendet. Während die Acrylglasplatte auf dem Carbon-Gitter aufliegt, liegt auf der Folie ein rotes Kunststoffplättchen zum Schutz. Der Messschieber mit einer Tiefenmessbrücke wird auf der Acrylglasplatte platziert. Durch händische Variation kann der Abstand zwischen der Oberfläche der Acrylglasplatte und der Oberfläche der Kunststoffplatte mit dem Messschieber bestimmt werden.

### 5.2.1.3 Vergleich der beiden Methoden

Beide zuvor beschriebenen Methoden wurden unabhängig voneinander von zwei Personen an Fenstersegment 1 für 20 Löcher durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Auslenkung ist jeweils für die vermessene Lochposition aufgetragen. Damit die Messungen der beiden Methoden vergleichbar sind, wird zu den Messwerten, die mit Methode 2 bestimmt wurden, die Dicke des Kunststoffplättchens von  $(1,97 \pm 0,02)$  mm addiert. So wird mit beiden Methoden der Abstand zwischen Folie und der Oberfläche der Acrylglasplatte bestimmt.

Da hier die Konsistenz der einzelnen Methoden beurteilt werden soll, ist ein Vergleich der

Messungen anhand der jeweiligen Methode von zwei unterschiedlichen Personen nötig.

Die Betrachtung der ersten Methode zeigt, dass vor Allem die Werte der ersten zehn Löcher abweichen. Dies entspricht nach Abbildung 5.3b der Diagonalen von links oben nach rechts unten. Auf der zweiten Diagonalen sind kaum Abweichungen zwischen den Messungen der beiden Personen zu erkennen. Jedoch steigt der Abstand der Folie zur Acrylglasplatte von Loch 11 bis 20, also von links unten nach rechts oben. Das spricht dafür, dass die rechte obere Ecke der Acrylglasplatte höher auflag, als die linke. Die Fiberglas-Leisten, auf denen die Acrylglasplatte aufliegt, weisen bei genauerer Betrachtung Klebereste aus dem Herstellungsprozess auf. Diese müssten zur Erklärung der Steigung an der rechten oberen Ecke der Acrylglasplatte etwas höher gewesen sein. Da an beiden Ecken Reste des Klebers zu finden sind, liegt die Platte auf dieser Diagonalen höher auf. Das führt dazu, dass sie auf der anderen Diagonalen nicht auf beiden Seiten aufliegt, weswegen um die Diagonale eine kippend freie Bewegung möglich ist. Diese Bewegung erklärt auch die Schwankungen bei der Abstandsmessung auf der ersten Diagonalen.

Da hier nur die Wiederholbarkeit der Methode bewertet werden soll, muss die Messung nicht wiederholt werden. Es genügt die Abstandsmessung an den Löchern 11 bis 20 zu betrachten. Diese weisen nur geringe Abweichungen zwischen den Messungen der zwei Personen auf. Das spricht dafür, dass die Messung weitestgehend unabhängig von der durchführenden Person ist. Für weitere Messungen empfiehlt es sich aber, ein anderes Fenstersegment zu verwenden, über welchem die Acrylglasplatte an allen Ecken aufliegt.

Da die Messungen mit der zweiten Methode am selben Fenster vorgenommen wurden, an dem die Platte um die Diagonalen beweglich ist, werden nur die Messwerte für die Löcher 11 bis 20 beurteilt.

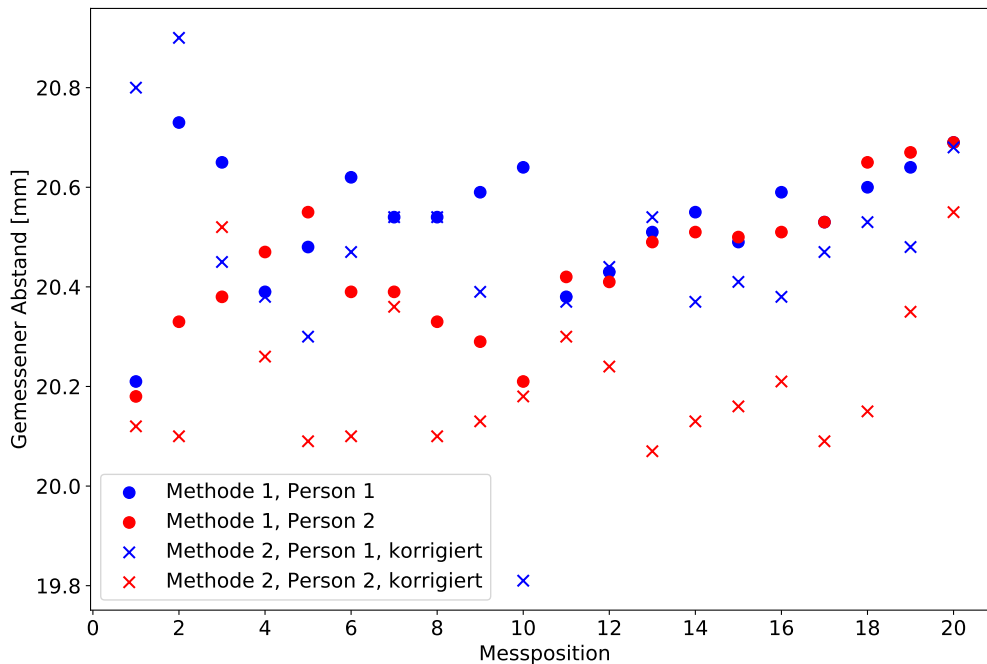
Die Abweichungen der Messwerte der beiden Messreihen für die zweite Methode sind höher als die bei der ersten Methode. Insbesondere ist aber auch eine systematische Abweichung zu beobachten, bei der die erste Messreihe höhere Werte aufweist als die zweite. Auch die Messwerte einer einzelnen Person weisen bei dieser Methode eine höhere Streuung auf.

Bei der Durchführung ließ sich beobachten, dass die Folie durch den Messschieber eingedrückt wird. Der Abstand des Messschiebers zum Plättchen muss manuell variiert werden. Es wurde versucht den Punkt zu treffen, an dem die Platte zwar berührt wird, die Folie aber noch nicht verformt ist. Die systematische Abweichung der Messung der ersten Person zeigt dabei, dass das Finden dieses Punktes abhängig von der durchführenden Person ist.

Auf Grund der Wiederholbarkeit wird im Folgenden die erste Methode verwendet, um die Ausdehnung der Fenstersegmente zu vermessen. Außerdem wird wegen der Klebereste im Folgenden Fenstersegment 3 verwendet.



Eine erste Abstandsmessung ohne Gasfluss wird als Nullmessung verwendet. Bei einer Messung ohne Gasfluss wird keine Auswölbung des Kammerfensters erwartet. Diese wird von den später gemessenen Abständen abgezogen, um die tatsächliche Auswölbung zu bestimmen. Auch für die Drucksensoren, sowie das Flussmessgerät dient diese Messung als Nullmessung, da keine Differenz zum Außendruck erwartet wird. Die aus der Nullmessung bestimmten Punkte werden von den in allen weiteren Messungen aufgenommenen Daten abgezogen.



**Abbildung 5.6:** Die Messwerte einer Abstandsmessung mit beiden entwickelten Methoden sind hier dargestellt. Für die ersten 20 Löcher der Acrylglasplatte wurde unabhängig von zwei Personen mit jeweils zwei Methoden der Abstand der Acrylglasplatte zur Folie bestimmt. Mit der ersten Methode wurde der Abstand direkt bestimmt. Bei den Messwerten der zweiten Methode wurde die Dicke des Kunststoffplättchens, welches zum Schutz auf der Folie auflag, aufaddiert. Die Messwerte sind hier inklusive dieser Korrektur aufgetragen. Die Unsicherheit des Messchiebers selbst wird hier nicht berücksichtigt, da die Methode im Allgemeinen betrachtet werden soll und die gesamte Unsicherheit der Methoden durch andere Einflüsse noch nicht beurteilt werden kann.

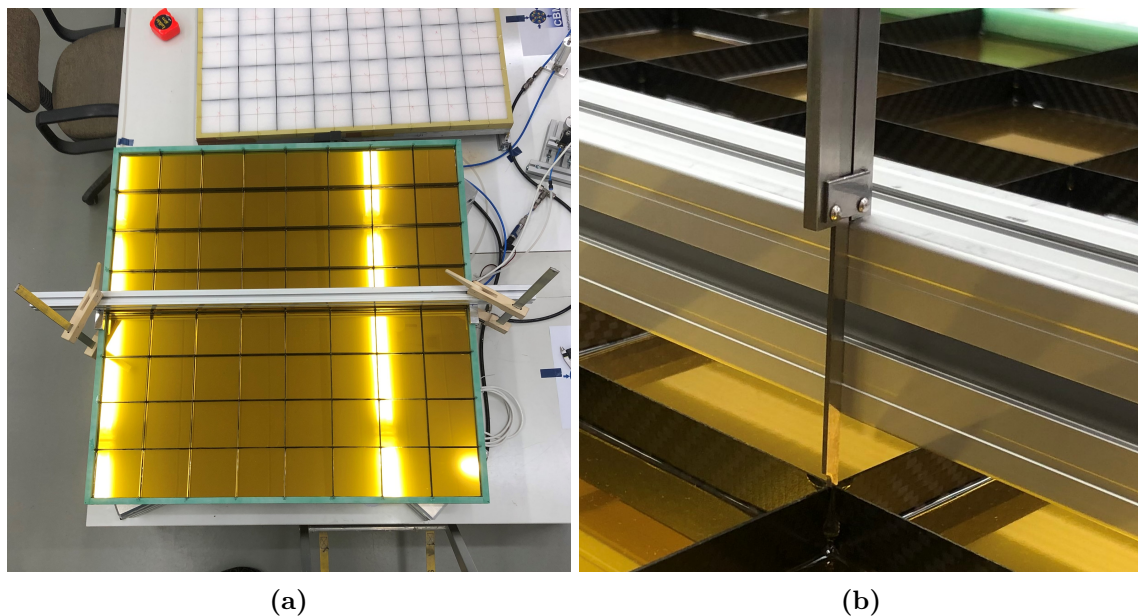
#### 5.2.1.4 Auslenkung der Carbon-Leisten

Zusätzlich zur Auslenkung der Fenstersegmente, soll auch noch die Auslenkung der Carbon-Leisten bestimmt werden. Da die Carbon-Leisten fest mit der Folie verklebt sind, erlaubt die Bestimmung der Auslenkung Rückschlüsse auf die Verformung des gesamten Fensters bei unterschiedlichen Drücken. Diese Verformung addiert sich zur Auslenkung der einzelnen



Fenstersegmente.

Zur Bestimmung der Auslenkung wird eine Aluminium-Leiste quer über die Kammer gelegt und befestigt. Sie wird dabei auf zwei Metallblöcke auf dem Rahmen aufgelegt, um einen Abstand zu den Carbon-Leisten zu gewährleisten. Das ist in Abbildung 5.7a zu sehen. An dieser Leiste kann der Messschieber aufgelegt und der Abstand zur Carbon-Leiste bestimmt werden, was in Abbildung 5.7b gezeigt ist. Als Messpunkte werden die Kreuzungspunkte der Carbon-Leisten gewählt, da diese gut erkenn- und reproduzierbare Positionen darstellen. Um Ausreißer durch fehlerhaftes Positionieren des Messschiebers zu vermeiden, werden Mehrfachmessungen durchgeführt. Bei jeder Messung an einem Kreuzungspunkt wird fünfmal gemessen und über diese Werte gemittelt.



**Abbildung 5.7:** Die Auslenkung des Fensters bei unterschiedlichen Drücken soll bestimmt werden. Die Verformung der gesamten Folie wird anhand der Auslenkung der aufgeklebten Carbon-Leisten gemessen. a) Eine Aluminium-Leiste wird in einer festen Position an der Kammer montiert. b) Mit dem Messschieber kann der Abstand zwischen dieser Aluminium-Leiste und einer Carbon-Leiste bestimmt werden.

Die Aluminium-Leiste wird horizontal an der Kammer befestigt, so dass die Entfernung zu den Kreuzungspunkten der mittleren Leiste bestimmt werden kann. Es werden Flüsse zwischen  $0 \frac{1}{h}$  und  $75 \frac{1}{h}$  eingestellt, um Differenzdrücke bis zu 1 mbar zu erhalten. Die Messung wird zweimal durchgeführt, wobei die Aluminium-Leiste unterschiedlich positioniert ist. In horizontaler Positionierung ist sie so befestigt, wie es in Abbildung 5.7a zu sehen ist. In vertikaler Positionierung wird sie um  $90^\circ$  gedreht, so dass sie senkrecht zum Gasfluss befestigt ist. Die beiden Messungen werden getrennt nacheinander durchgeführt, da die unveränderte Positionierung der Leiste entscheidend ist. Die Abstände zu den einzelnen Kreuzungspunkten

wären schon bei einer leichten Verschiebung nicht mehr vergleichbar.

Auch hier wird die Auslenkung durch Abzug der Messwerte einer Nullmessung bestimmt.

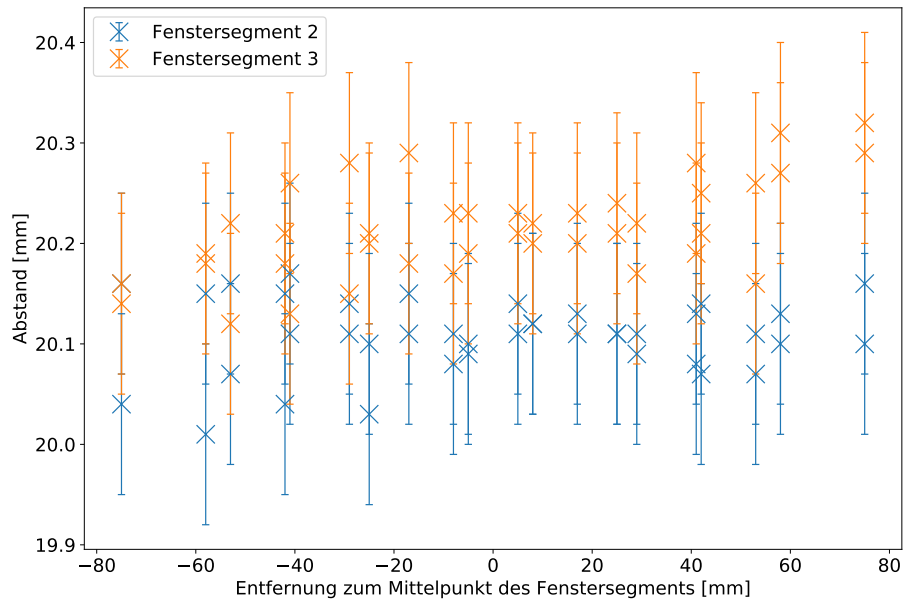
### 5.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Auswölbung des Fensters wurde bei neun unterschiedlichen Drücken ab 0 mbar bis zu ungefähr 1 mbar gemessen. Die Messung wurde sowohl für die Leisten, als auch für die beiden einzelnen Fenstersegmente am Rand und in der Mitte durchgeführt. Die Messwerte der Sensoren sind im Anhang in B.2.1 mit den zugehörigen Histogrammen zu sehen. Die Messwerte der Abstände sind im Anhang in B.2.2 notiert. Für die Messung wurde jeweils eine Nullmessung bei einem Fluss von  $0 \frac{1}{h}$  durchgeführt. Die gemessenen Abstände der Nullmessung sind in Abbildung 5.8a für die beiden Fenster und in Abbildung 5.8b für die Leiste in vertikaler und horizontaler Orientierung zu sehen.

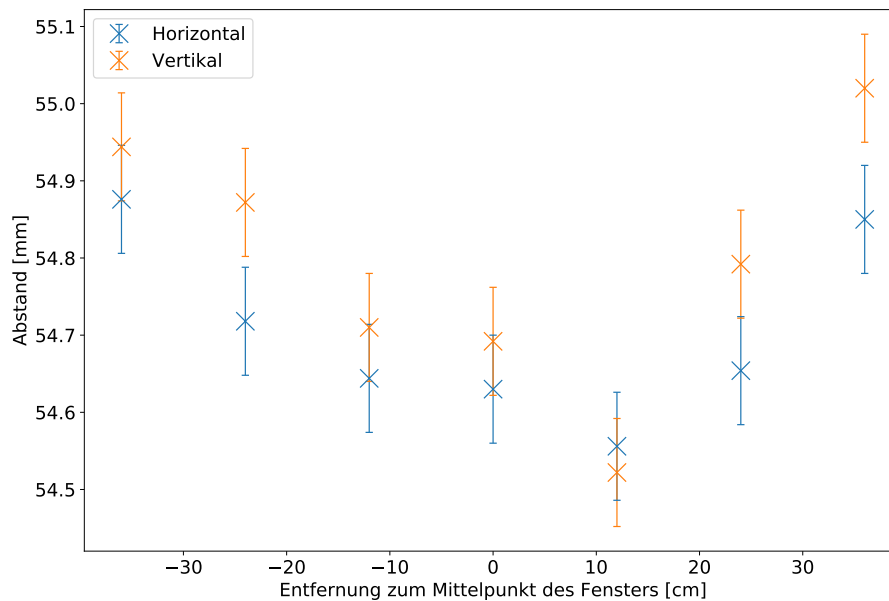
Es wird angenommen, dass die Folie nicht ausgewölbt ist, da in der Kammer kein Überdruck herrscht. Für die beiden Fenstersegmente stimmen die Messwerte mit dieser Erwartung überein. Die gemessenen Werte schwanken zwar leicht, stimmen jedoch in ihren Unsicherheitsintervallen überein, so dass sie als konstant angenommen werden können. Für die Leiste weichen die Messwerte in beiden Orientierungen von der Erwartung ab. Die gemessenen Abstände nahe des Mittelpunktes sind kleiner. Die Aluminium-Leiste ist in größerer Entfernung zu ihrer Auflagefläche näher an der Folie. Dies kann auf eine Verbiegung der Leiste durch ihr Eigengewicht zurückzuführen sein. Es kann sich aber auch um eine unebene Oberfläche der Leiste handeln. Die Verformung der Aluminium-Leiste ändert sich während der Messung nicht, da diese Leiste nicht bewegt wird. Deswegen wird diese Verformung bei Berechnung der Auslenkung herausgerechnet, indem diese Messung als Nullmessung dient und von den Folgenden abgezogen wird. Auch für die Fenstersegmente wird die Nullmessung von den weiteren Ergebnissen abgezogen um die Auslenkung zu erhalten.

Bei der Nullmessung der Leisten ist außerdem zu sehen, dass die Messwerte in horizontaler niedriger sind als die in vertikaler Orientierung. Das kann auf eine unterschiedliche Befestigung der Leiste zurückzuführen sein, so dass von unterschiedlichen Punkten der Abstand gemessen wurde. Oder es handelt sich um einen systematischen Fehler bei einer der beiden Messungen. Dieser ist aber im Rahmen der Unsicherheit der Messmethode auf Grund des Überschneidens der Messwerte in ihren Unsicherheitsintervallen.

In Abbildung 5.9 ist die gemessene Auswölbung bei einem Druck von  $(0,76 \pm 0,08)$  mbar exemplarisch dargestellt. Die Messungen von Fenstersegment 2 werden in Abbildung a) dargestellt, die von Fenstersegment 3 in Abbildung b). Die Auswölbung wird hier für den gemessenen Druck an Sensor 1, dem Drucksensor am Eingang der Kammer, angegeben. Die gemessenen Flüsse und Drücke an Sensor 2 sind in B.2.1 angegeben. Jedoch wird der Zusammenhang in



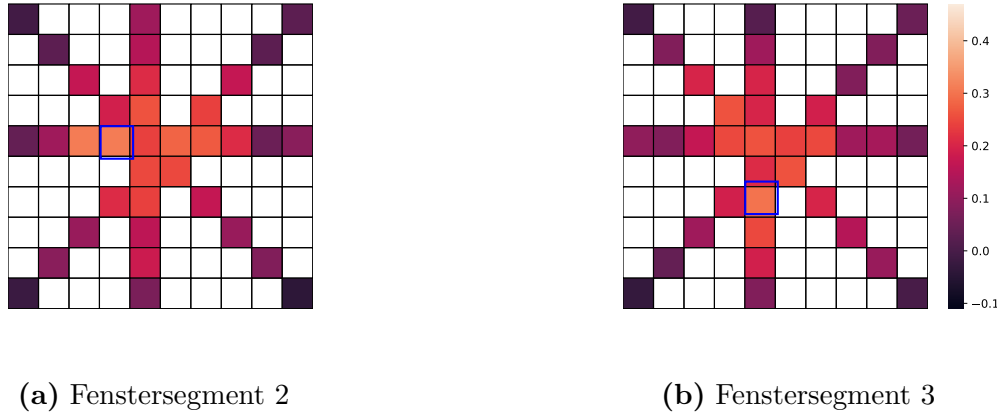
(a)



(b)

**Abbildung 5.8:** Bei der Auswölbungsmessung wurde zuerst eine Nullmessung bei einem Fluss von  $0 \frac{1}{h}$  durchgeführt. In a) ist der Abstand zwischen Folie und Oberfläche der Acrylglasplatte für beide vermessenen Fenster dargestellt. Die Werte überschneiden sich in ihren Unsicherheitsintervallen. Können also als konstant betrachtet werden. In b) ist der Abstand zwischen Aluminium- und Carbon-Leiste für beide Orientierungen aufgetragen. Anhand der Messwerte lässt sich eine Verformung der aufliegenden Aluminium-Leiste vermuten, die in der Mitte leicht nach unten verbogen ist. Bei der Bestimmung der Auslenkung wird diese Verformung durch Abzug der Messwerte der Nullmessung herausgerechnet.

Abschnitt 5.4.2 diskutiert und die Angabe der Drücke an Sensor 1 genügt. Die Messwerte werden dargestellt, wie im Raster der Platte in Abbildung 5.3b gezeigt, dessen Nummerierung in der Beschreibung beibehalten wird. Die Auslenkungen werden in den Heatmaps farblich kodiert. Die Auslenkungen bei höheren Drücken sind für beide Fenster vergleichbar. In der Mitte des Fensters treten höhere Auslenkungen auf als am Rand. Es bildet sich ein Maximum.



**Abbildung 5.9:** Die gemessenen Auslenkungen sind als Heatmaps für beide Fenster bei einem Druck von  $(0,76 \pm 0,08)$  mbar an Sensor 1 dargestellt. Die Rasterung entspricht dabei der Lochverteilung in der Acrylglasplatte in Abbildung 5.3b, deren Nummerierung in der Beschreibung auch beibehalten wird. Bei beiden Fenstern sind die höchsten Abstände in der Mitte der Platte. Die absoluten Maxima sind an Loch 23 und 15 und in der Abbildung in blau markiert.

Die mechanischen Eigenschaften der Folie sind vom Hersteller spezifiziert und ändern sich innerhalb eines Fenstersegments nicht. Die Belastung der Folie ändert sich innerhalb eines Fenstersegments auch nicht. Innerhalb der Kammer herrscht entlang eines Fenstersegments ein konstanter Überdruck, welcher die sie begrenzende Folie symmetrisch und gleichmäßig belastet. Folglich ist auch eine symmetrische Auswölbung der Folie zu erwarten. Innerhalb eines Fenstersegments kann angenommen werden, dass sich ein Maximum in der Mitte des Fenstersegments bildet. Da alle Fenstersegmente die gleichen Abmessungen haben und die Leisten gleichmäßig über das Detektorfenster verteilt sind, kann eine symmetrische Ausdehnung der gesamten Folie angenommen werden, bei der sich in der Mitte ein Maximum bildet. Zur Abschätzung der Auslenkung und somit dem Einfluss auf das elektrische Feld, wird die Auslenkung in Abhängigkeit des Differenzdrucks untersucht. Dafür wird die maximale Auslenkung, die auftritt, anhand der Messwerte abgeschätzt. Eine Variante zur Bestimmung eines Maximums ist, das absolute Maximum der Messwerte für die unterschiedlichen Drücke zu betrachten. In der Schablone ist eine gerade Anzahl an Löchern eingebracht. Das bedeutet, dass die Auswölbung am Mittelpunkt eines Fenstersegments nicht vermessen wird. Am

Mittelpunkt wird aber das absolute Maximum erwartet, welches demzufolge nicht gemessen wird.

Außerdem ist die Methode zur Bestimmung der Auslenkung mit einer hohen relativen Unsicherheit behaftet. Das ist auch daran zu erkennen, dass das Maximum der Messwerte einer Messreihe nicht immer im Zentrum des Fenstersegments liegt, wie zum Beispiel in Abbildung 5.9. Dort sind die Maxima in blau markiert. Sie sind an den Löchern 24 und 37. Auf Grund der symmetrischen Auslenkung sollte das Maximum aber an Loch 5, 6, 15 oder 16 gemessen werden.

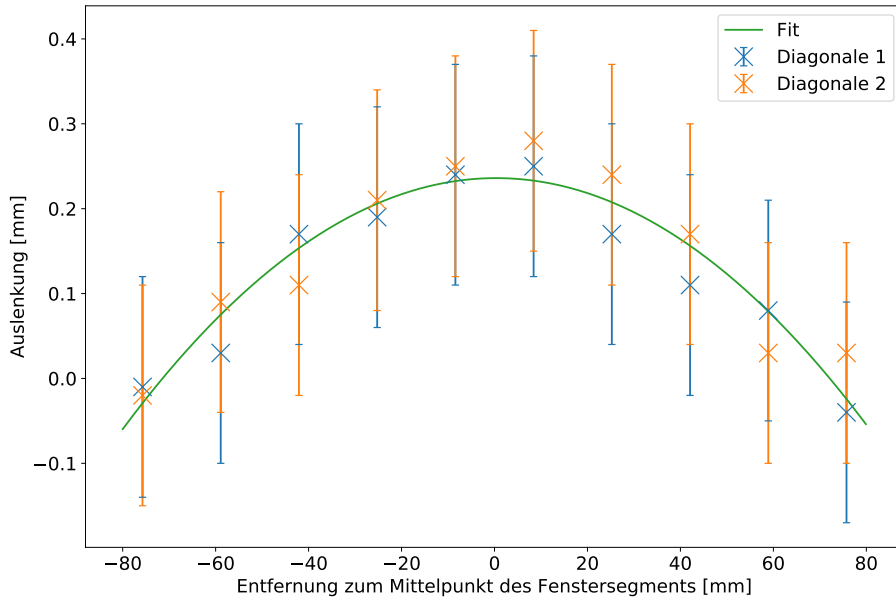
Zur Bestimmung der maximalen Auslenkung wird wegen der hohen Unsicherheit der einzelnen Messwerte und wegen des fehlenden Messpunktes am Mittelpunkt zusätzlich eine graphische Anpassung gewählt. Dieser reduziert die Unsicherheit auf Grund der Berücksichtigung mehrerer Messpunkte. Zusätzlich werden auch die absoluten Maxima, die durch die Messung bestimmt wurden, betrachtet.

Der Fit soll den Anstieg der Werte zum Zentrum hin beschreiben. Dafür wird eine Parabel gewählt, deren Verlauf am Maximum der beobachteten Auswölbung nahe kommt. Innerhalb der Unsicherheitsintervalle der Messwerte ist das berechtigt. Die Parabel hat die Form

$$f(x) = A \cdot x^2 + B \cdot x + C. \quad (5.1)$$

Dabei sind  $A$ ,  $B$  und  $C$  Konstanten und  $x$  ist der Abstand des Messpunktes zum Mittelpunkt des Fenstersegments. Der Fit beschreibt nicht den Verlauf der Werte über den gesamten Wertebereich. Die Folie ist am Rand eines Fenstersegments durch die Sprossen befestigt, weswegen dort ein Abflachen der Auswölbung zu erwarten ist. Die Parabel beschreibt dieses Abflachen nicht, soll aber auch zur Beschreibung des Maximums im Zentrum dienen. Deswegen ist die Beschreibung am Rand zu vernachlässigen.

Diese Betrachtung reduziert die Problematik auf eine eindimensionale Beschreibung des Problems. Die Parabel beschreibt die Auswölbung nur entlang einer Achse. Für die beiden Fenster wurden zwei Diagonalen, eine Vertikale und eine Horizontale vermessen. Da eine symmetrische Auslenkung erwartet wird, werden die Auslenkungen jeweils entlang der Horizontalen und Vertikalen, sowie die entlang der beiden Diagonalen als gleich angenommen. Für die Messwerte werden dann jeweils die Fits der Form aus Gleichung (5.1) angelegt. Das ist exemplarisch für die Diagonalen in Fenstersegment 2 bei einem Druck von  $(0,76 \pm 0,08)$  mbar in Abbildung 5.10 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf der Messwerte durch die Parabel gut beschrieben werden kann. Dieses Vorgehen wird bei beiden Fenstern, für alle neun Drücke, sowohl für die Diagonalen, als auch die Vertikalen durchgeführt. So werden maximale Auswölbungen für alle Drücke bestimmt. Die Diagramme, sowie alle Fitparameter sind im Anhang in B.2.3 zu finden.

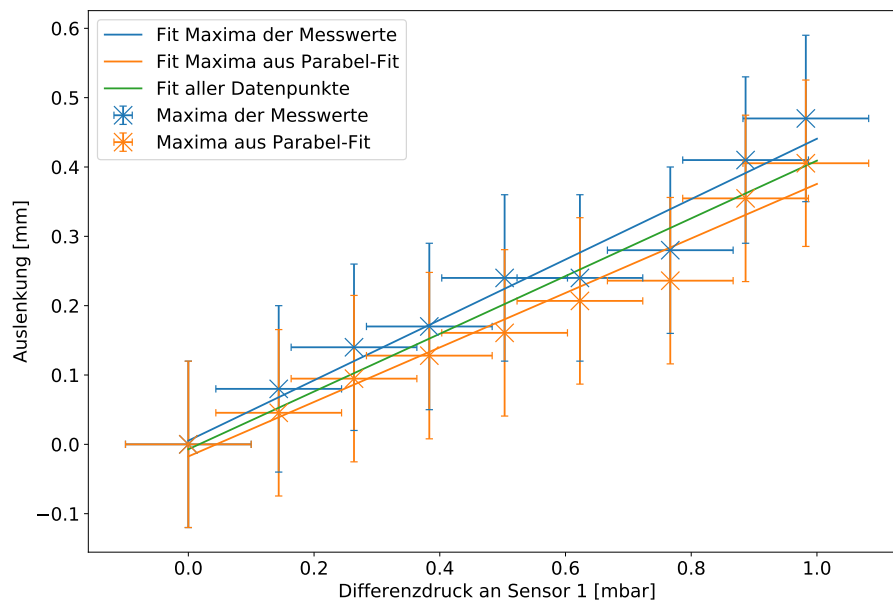


**Abbildung 5.10:** Messwerte der Auslenkung entlang der beiden Diagonalen von Fenstersegment 2 bei einem Druck von  $(0,76 \pm 0,08)$  mbar an Sensor 1, dem vor der Kammer. Der Anstieg der Messwerte zum Zentrum des Fenstersegments ist klar zu erkennen. Die Unsicherheitsintervalle der Messwerte rechtfertigen die Beschreibung durch einen Fit der Form in Gleichung (5.1). Dieser beschreibt die Messwerte hinreichend gut und bietet eine Möglichkeit die maximale Auslenkung am Scheitelpunkt der Parabel zu bestimmen.

Die ermittelten Maxima für die Diagonalen von Fenstersegment 2 sind in Abbildung 5.11 in Abhängigkeit der eingestellten Drücke zu sehen. Dabei wird zwischen den absoluten Maxima der Messwerte und denen, die anhand des Parabelfits ermittelt wurden, unterschieden. Dabei ist auffällig, dass die Maxima, die anhand des Fits bestimmt wurden, immer niedriger als die absoluten Maxima sind. Nach der theoretischen Betrachtung sollte das absolute Maximum in der Mitte des Fenstersegments und damit am Scheitelpunkt der Parabel sein. Dieses sollte höher als alle anderen Messwerte sein. Das ist aber hier nicht der Fall. Jedoch liegt die erwartete Verteilung innerhalb der Unsicherheitsintervalle der bestimmten Werte. Der höchste Messwert, der das absolute Maximum bildet kann auch ein einzelner hoher Wert sein. Außerdem liegen die Scheitelpunkte nicht immer bei  $x = 0$ . Vor Allem für kleine Auslenkungen beschreibt der Parabelfit noch nicht die Form der Messwerte, da diese eine sehr hohe relative Unsicherheit aufweisen, was das Erkennen der Form erschwert.

Die mit den beiden Methoden bestimmten Maxima stimmen aber in ihren Unsicherheitsintervallen überein. Um die maximale Auslenkung im gesamten möglichen Operationsbereich zwischen 0 und 1 mbar zu beurteilen, kann an diese Messwerte ein linearer Fit angelegt werden. Dabei werden aber keine Aussagen über Auslenkungen außerhalb des Messbereichs

getroffen. Die Auslenkung der Folie ist nicht hinreichend physikalisch beschrieben, um auf einen linearen Verlauf über einen größeren Wertebereich zu schließen. Die Betrachtung der Auslenkung ist aber auch nicht nötig für höhere Differenzdrücke, da diese im Betrieb vermieden werden. In Abbildung 5.11 sind mehrere lineare Fits angelegt, deren Parameter im Anhang in B.2.4 zu finden sind. Für die Datenpunkte der beiden Methoden einzeln, sowie einer durch alle Datenpunkte. Dies unterstreicht die zuvor geschilderte Beobachtung, dass die direkte Ablesung der Maxima in Form des maximalen Messwerts eine höhere Auswölbung suggerieren. Wie zuvor beschrieben bestehen Zweifel an der Akkuranz dieser Methode, da sie durch einzelne, außergewöhnlich groß ausfallende Messwerte verfälscht werden kann. Aber auch die Bestimmung der Maxima anhand des Fits hat nur eine eingeschränkte Genauigkeit, da die Auslenkung physikalisch nicht durch eine Parabel beschrieben wird. Es werden beide Methoden berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass einzelne hohe Messwerte durch die Maxima des Parabelfits reguliert werden, aber auch verschobene Maxima des Parabelfits ausgeglichen werden. Deswegen wird mit dieser linearen Annahme für alle bestimmten Maxima im Folgenden weiter gerechnet.



**Abbildung 5.11:** Die ermittelten Maxima für die unterschiedlichen Messungen der Auslenkungen an Fenstersegment 2 sind zu sehen. Dabei wird zwischen den mittels Parabelfit bestimmten und den gemessenen Maxima unterschieden. Die gemessenen Maxima sind immer höher als die mit dem Fit bestimmten. Das lässt sich mit der hohen Unsicherheit der einzelnen Messwerte begründen. Die Messwerte weisen einen linearen Verlauf auf, der in dem vermessenen Wertebereich einen linearen Fit ermöglicht. Dieser wurde für die unterschiedlichen Methoden getrennt, sowie für alle Datenpunkte zusammen angelegt.

Das gleiche Vorgehen wurde für die Vertikale und Horizontale durchgeführt. Außerdem wurde das Vorgehen für Fenstersegment 3 durchgeführt. Die Auslenkung von Fenstersegment 3 ist in ihrer Form vergleichbar mit der von Fenstersegment 2. Die Messwerte beschreiben die gleiche Form, an die ein Parabelfit angelegt wird.

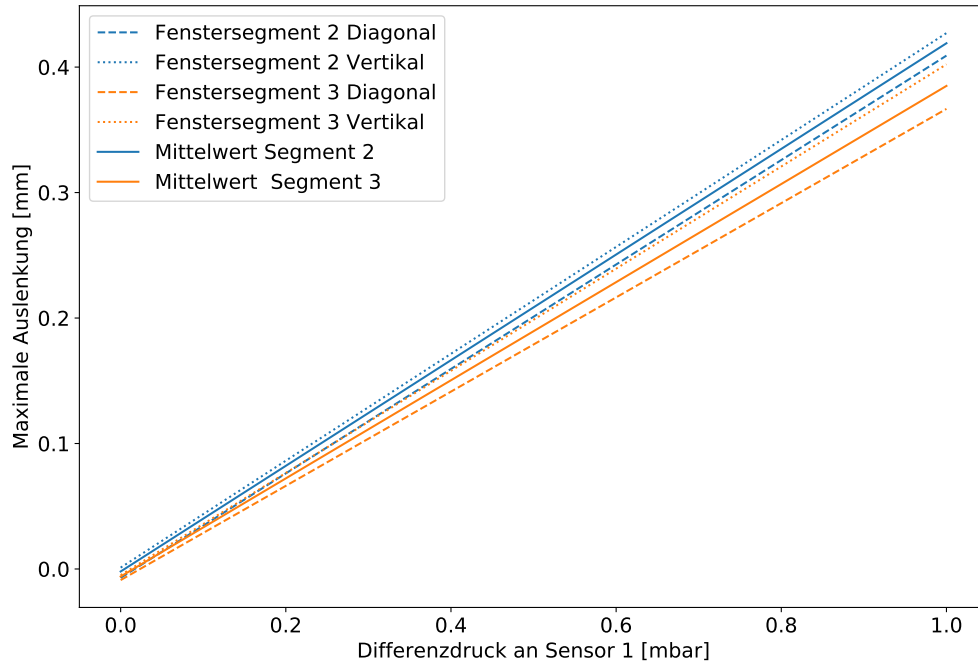
Die linearen Fits die den Verlauf der bestimmten Maxima beschreiben, sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Auf die Messpunkte wurde zur Übersichtlichkeit verzichtet. Für beide Fenstersegmente ist das bestimmte Maximum in den Diagonalen niedriger als in der Vertikalen und Horizontalen. Die beiden Maxima sollten ähnlich groß sein, da sich die beiden Orientierungen die mittleren Messpunkte teilen. Da dort das Maximum erwartet wird, sollte keine Abweichung auftreten. Die Fitparameter, die in Tabelle 5.1 zu sehen sind, überschneiden sich in ihren Unsicherheitsintervallen. Deswegen, und wegen der Erwartung das gleiche Maximum zu messen, wird über die beiden linearen Fits für ein Fenstersegment gemittelt. Die so entstehende lineare Beschreibung ist in Abbildung 5.12 zu sehen.

Der Vergleich der beiden Fenstersegmente zeigt, dass die an Fenstersegment 2 bestimmte Auslenkung höher ist als die an Fenstersegment 3 bestimmte. Fenstersegment 2 ist eines, welches sich in der Mitte des Fensters befindet. Fenstersegment 3 befindet sich am Rand. Dass die Messwerte der Auslenkungen an Fenstersegment 2 höher sind, könnte daran liegen, dass teilweise die Auslenkung der gesamten Folie mit gemessen wird. Diese ist in der Mitte des Fensters höher, also an Fenstersegment 2. Jedoch liegt die Acrylglasplatte auf den Carbon-Leisten auf. Diese werden gemeinsam mit der gesamten Folie ausgelenkt und heben so auch die Acrylglasplatte an. Deswegen sollte die Auslenkung der gesamten Folie und der innerhalb eines Fenstersegments getrennt zu betrachten sein.

Ein weiterer Unterschied ist, dass die Acrylglasplatte am Rand an Fenstersegment 3 auf Fiberglas- und nicht ausschließlich auf Carbon-Leisten aufliegt. Falls das die Messung beeinflussen sollte, müsste es in der Form der Auslenkung sichtbar sein, was hier nicht der Fall ist. Die Form gleicht der in Fenstersegment 2.

Da kein Grund für den Unterschied der beiden Fenstersegmente ermittelt werden kann, wird mit dem höheren Wert gerechnet. Zum Einen befindet sich Fenstersegment 2, für welches das höhere Maximum bestimmt wurde, näher an der Mitte, wo das Maximum der Auslenkung der gesamten Folie zu erwarten ist. Dort wird die Addition der maximalen Auslenkungen relevant. Zum Anderen wird hier eine Abschätzung gemacht, bei der überprüft wird, wann ein oberer Grenzwert der Auswölbung überschritten wird. Deswegen bieten sich höhere Werte zur Abschätzung an, um das Überschreiten des Grenzwertes nicht bei zu hohen Differenzdrücken zu prognostizieren.

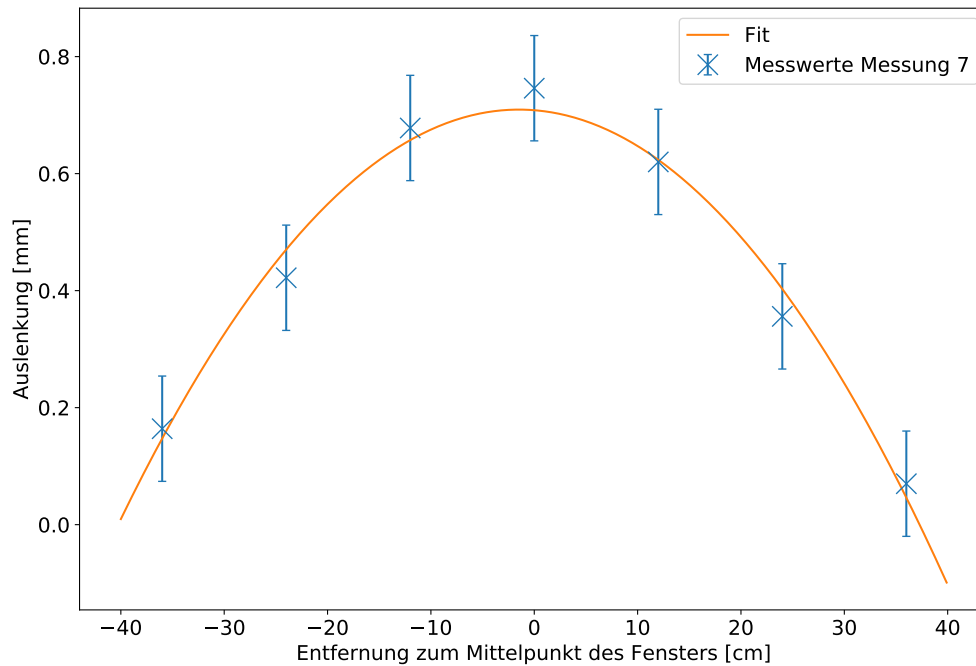




**Abbildung 5.12:** Die bestimmten Maxima der Auslenkung der Fenstersegmente zeigen einen linearen Verlauf. Die linearen Fits, die diesen Verlauf für beide Fenstersegmente sowohl in der Diagonalen, als auch in der Vertikalen beschreiben, sind hier dargestellt. Auf die Messpunkte wird zur Übersichtlichkeit verzichtet. Die Fits sind aber für die einzelnen Fenstersegmente in Abbildung 5.11 und in appendix B.2.4 mit den zugehörigen Messwerten dargestellt. Für die Fenstersegmente wird die Auslenkung jeweils anhand eines Mittelwertes aus den linearen Fits abgeschätzt, der auch dargestellt.

**Tabelle 5.1:** Fitparameter für die linearen Fits der Auswölbungen der Fenstersegmente.

Messwerte	Steigung	Y-Achsenabschnitt
Fenster 2 Diagonal	$0,416 \pm 0,027$	$-0,007 \pm 0,0165$
Fenster 2 Senkrecht	$0,426 \pm 0,020$	$0,0011 \pm 0,0122$
Mittelwert	$0,421 \pm 0,004$	$-0,002 \pm 0,0040$
Fenster 3 Diagonal	$0,375 \pm 0,028$	$-0,008 \pm 0,0170$
Fenster 3 Senkrecht	$0,407 \pm 0,029$	$-0,004 \pm 0,0173$
Mittelwert	$0,391 \pm 0,015$	$-0,006 \pm 0,0019$

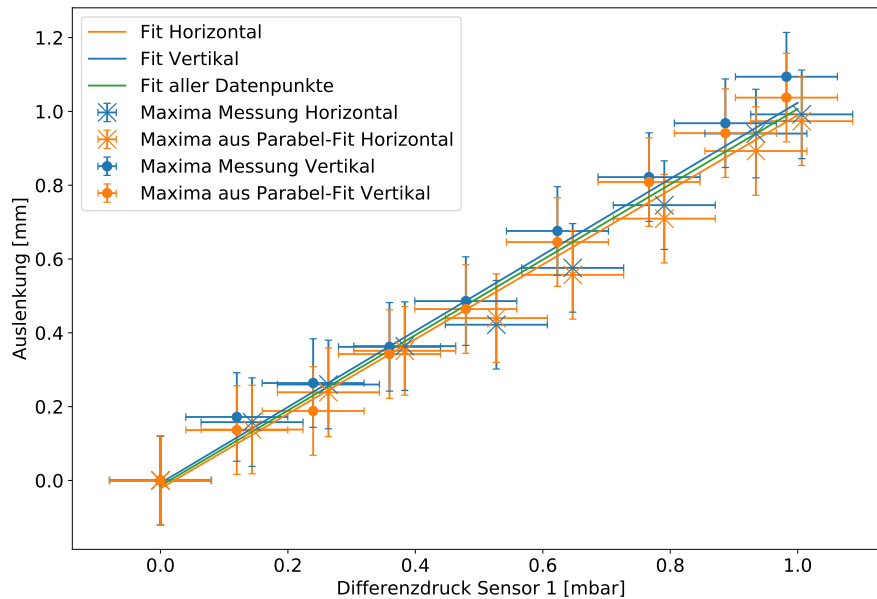


**Abbildung 5.13:** Die gemessene Auslenkung an der Leiste in horizontaler Orientierung ist bei einem Differenzdruck von  $0,79 \pm 0,08$  mbar an Sensor 1 zu sehen. Die Auslenkung wird mit einem Fit der Form aus Gleichung (5.1) versehen. Dessen Form entspricht dem beobachteten Anstieg zum Zentrum der Folie.

Für die Auslenkung der Carbon-Leisten, also der gesamten Folie, wird der gleiche Ansatz gewählt. Dort wurde zwar die Auslenkung am Mittelpunkt vermessen, jedoch ist die Dichte der Messpunkte deutlich geringer und die einzelnen Messwerte sind wieder mit einer hohen Unsicherheit behaftet. Die Auslenkung bei einem Druck von  $(0,79 \pm 0,08)$  mbar ist exemplarisch für die Leiste in horizontaler Orientierung in Abbildung 5.13 aufgetragen. Der Fit ist auch in den Daten zu sehen.

Theoretisch könnten die beiden Orientierungen hier auch gleichgesetzt werden. Die Einstellung des Flusses erfolgte jedoch individuell. Deswegen gleichen sich die Differenzdrücke, bei denen die Auslenkung gemessen wurde nicht immer. Der Vergleich der beiden Orientierung wird anhand der bestimmten Maxima vorgenommen.

In Abbildung 5.14 sind alle bestimmten Maxima aufgetragen. Die systematische Abweichung zwischen gemessenen und durch den Fit bestimmten Maxima ist wieder zu erkennen. Sie tritt wieder auf Grund der hohen Unsicherheit der einzelnen Messwerte auf. Weiterhin ist aber auch eine systematische Abweichung bei der Messung in den beiden Orientierungen zu erkennen. Die als Kreuz dargestellten Messwerte in horizontaler Orientierung sind höher als die in vertikaler. Bei Betrachtung der Nullmessung in Abbildung 5.8a ist zu sehen, dass die



**Abbildung 5.14:** Die anhand der beiden Methoden bestimmten Maxima sind für die Leiste in beiden Orientierung aufgetragen. Es ist jeweils eine Abweichung der absoluten Maxima, die höher als die aus dem Fit sind, zu sehen. Außerdem sind die Messwerte in horizontaler Orientierung höher als in vertikaler. Das ist zwar im Rahmen der Unsicherheiten, aber trotzdem deutlich zu erkennen. Der Verlauf ist im Wertebereich zwischen 0 und 1 mbar linear, weswegen ein linearer Fit für die beiden Orientierungen einzeln und einer durch alle Messpunkte zur Beschreibung dient.

gemessenen Abstände in Orientierung 1 niedriger sind. Falls dort schon ein Fehler bei der Durchführung der Messung aufgetreten ist, hätte dieser auch eine Verschiebung der Maxima zur Folge. Durch den Abzug niedrigerer Werte bei der Nullmessung ist die bestimmte Auslenkung höher. Eine tatsächliche Abweichung wird auf Grund des symmetrischen Verhaltens nicht erwartet. Die beiden Orientierungen, in denen gemessen wurde, teilen sich sogar einen Messpunkt am Mittelpunkt. Deswegen wird die systematische Abweichung auf einen Messfehler zurück geführt, der aber im Rahmen der Unsicherheiten ist, da sich die bestimmten Maxima in ihren Unsicherheitsintervallen überschneiden.

Da die Abweichungen im Rahmen der Unsicherheiten sind, wird die maximale Auswölbung mit einem linearen Fit für alle bestimmten Maxima in horizontaler und vertikaler Orientierung abgeschätzt, der in Abbildung 5.14 in grün eingezeichnet ist.

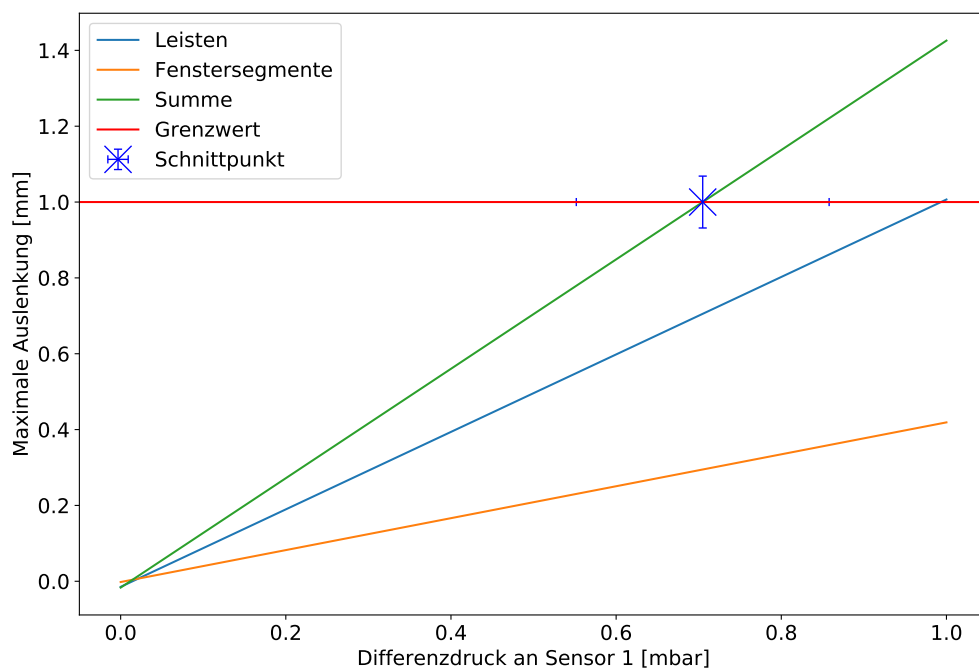
Aus der Abschätzung der Auslenkung der Leisten und der der einzelnen Fenstersegmente lässt sich einer gesamten maximalen Auslenkung abschätzen. Diese ergibt sich als Summe der beiden bestimmten Auslenkungen eines Fenstersegments und des gesamten Fensters. Dass die Auswölbung des gesamten Fensters bei der Vermessung der Fenstersegmente nicht erfasst

wird, liegt daran, dass die als Referenz verwendete Acrylglasplatte auf den Carbon-Leisten aufliegt. Bei einer Auswölbung der gesamten Folie, werden auch die Carbon-Leisten ausgelenkt und diese heben auch die Acrylglasplatte an. Deswegen addiert sich die Auslenkung des gesamten Fensters, die anhand der Carbon-Leisten bestimmt wurde zu der der einzelnen Fenstersegmente.

Die Abschätzung der Auslenkung ist in Abbildung 5.15 zu sehen. Die linearen Fits, die zur Abschätzung der einzelnen Auslenkungen im Bereich zwischen 0 und 1 mbar dienen, sind aufgetragen. Zudem ist die Summe der beiden linearen Fits zu sehen. Diese entspricht nach der Abschätzung der maximal zu erwartenden Auslenkung. Bei der Messung und Lokalisierung von Teilchen im finalen Aufbau kann eine Auslenkung bis zu 1 mm herausgerechnet werden. Dieser Grenzwert wird bei einem Differenzdruck von  $p_{\text{diff}} = 0,70 \pm 0,15$  mbar erreicht.

Die maximale Auslenkung wurde nach oben abgeschätzt. Das heißt, dass die tatsächliche Auslenkung zwar niedriger sein kann, nach dieser Messung jedoch eine untere Grenze des zulässigen Überdrucks bestimmt werden kann. Während der gesamten Messung wurden Abschätzungen nach oben gemacht. Außerdem ist die Addition eine Abschätzung. Ob die beiden Maximalwerte gleichzeitig am gleichen Ort auftreten ist fraglich. Betrachtung der Kurven zeigt, dass die Fenstersegmente am Rand gar nicht ausgewölbt sind, wie es zum Beispiel in Abbildung 5.10 zu sehen ist. Wie Abbildung 5.7 zeigt, fällt die Auslenkung der Leisten bis hin zum nächsten Messpunkt nicht sehr stark ab. Es handelt sich dabei unter anderem um Eckpunkte von Fenstersegment 2. Es ist also davon auszugehen, dass die Auswölbung in der Mitte der Folie konstant hoch ist, was eine Addition der Maximalwerte rechtfertigt.

Auf Grund dieser Abschätzung kann festgehalten werden, dass der Grenzwert einer Auslenkung von 1 mm bei 0,7 mbar noch nicht überschritten wird. Für eine genauere Eingrenzung muss jedoch die Form der Auswölbung sowohl in einem einzelnen Fenstersegment, als auch der gesamten Folie genauer untersucht werden. Die Messungen hier bestätigen zwar die Symmetrie entlang der Achsen, sowie die Form, die einen Anstieg zum Mittelpunkt hin beschreibt, für Fenstersegmente und die gesamte Folie. Genauere Aussagen über die Form, vor Allem in mehreren Dimensionen können aber nicht getroffen werden. Die genauere Beschreibung könnte auch anhand von Simulationen vorgenommen werden, die auf Grundlage der Messwerte dieser Arbeit validiert werden. Für eine genauere Beschreibung anhand experimenteller Daten wird jedoch eine höhere Abtastung der einzelnen Fenstersegmente, sowie der gesamten Folie benötigt.



**Abbildung 5.15:** Die Ergebnisse der linearen Abschätzung der Auslenkung in Abhängigkeit des Differenzdrucks addieren sich für die Auslenkung der gesamten Folie und der einzelnen Fenster. Bei dieser Abschätzung wird die geforderte obere Grenze von 1 mm bei einem Differenzdruck von  $(0,70 \pm 0,15)$  mbar an Sensor 1 erreicht.

## 5.3 Überdruckabbau in der Dummykammer

### 5.3.1 Methoden

Durch Schließen des Ventils in Abbildung 3.2 wird Gas aufgestaut. Hier soll untersucht werden, wie dieses Gas wieder abfließt. Dafür wird das Ventil geschlossen und bei Erreichen eines bestimmten Differenzdrucks automatisch wieder geöffnet. Das Überschreiten des Grenzwerts wird nach der in Abschnitt 4.5.2 beschriebenen Methode überprüft. Die Steuerung des Ventils wird mit der Schaltung, die in Abschnitt 4.1 eingeführt wurde, realisiert.

### 5.3.2 Ergebnisse und Diskussion

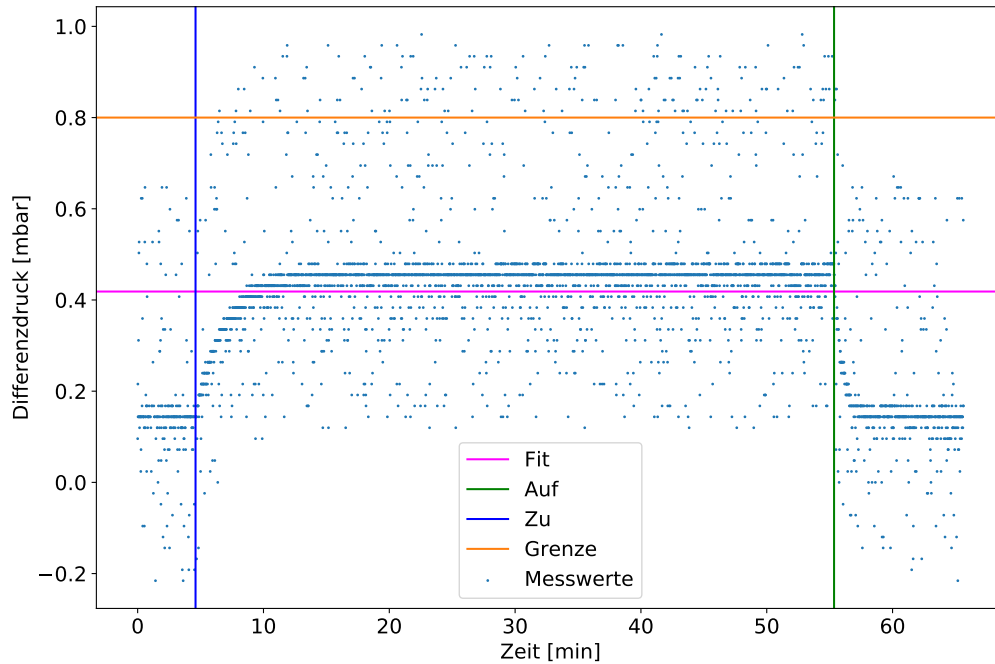
Als erstes wurde ein Fluss von  $(4,55 \pm 1,01) \frac{1}{h}$  eingestellt und unterschiedliche obere Grenzen eingestellt. Für niedrige Grenzen ist ein Anstieg und Abfall des Drucks zu erkennen. Der Druck steigt bei Aufstauen des Gases. Durch das Öffnen des Ventils kann das Gas wieder abfließen, was den Differenzdruck sinken lässt. Bei den niedrigen Grenzwerten wird die Filterbedingung häufig schon durch die in Abschnitt 4.5.2 diskutierten Schwankungen bei der Auslese der Differenzdrucksensoren angesprochen. Um einen deutlichen Anstieg und Abfall des Drucks zu beobachten, wurden höhere Grenzen eingestellt.

Bei der Einstellung höherer Grenzen wird diese nicht mehr erreicht. Bevor die obere Grenze erreicht wird, tritt eine Sättigung des Drucks ein. In Abbildung 5.16 sind die Ergebnisse einer Messung mit einer oberen Grenze von 0,8 mbar für Sensor 1 zu sehen. Der Druck steigt nach Schließen des Ventils, bis er einen Wert erreicht, bei dem er konstant bleibt. Deswegen wird die obere Grenze nicht überschritten und die Öffnung des Ventils nicht ausgelöst. Wird das Ventil manuell wieder geöffnet, fällt der Druck.

Es wurden unterschiedliche Flüsse eingestellt. Die zugehörigen Diagramme sind im Anhang in B.4.1 dargestellt. Bei allen ist das gleiche Verhalten zu beobachten. Die Drücke sind ab einem gewissen Zeitpunkt in einer Sättigung. Das bedeutet, dass sich ab einem gewissen Druck ein Gleichgewicht zwischen ein- und austretendem Gas einstellt. Da das Ventil geschlossen ist, sollte kein Gleichgewicht auftreten. Es sollte weiterhin das nachströmende Gas aufgestaut werden. Auf Grund der indirekten Proportionalität von Druck und Volumen in Gleichung (2.3) sollte auch der Druck weiter steigen. Das System muss also eine Undichtigkeit haben, an der Gas austritt.

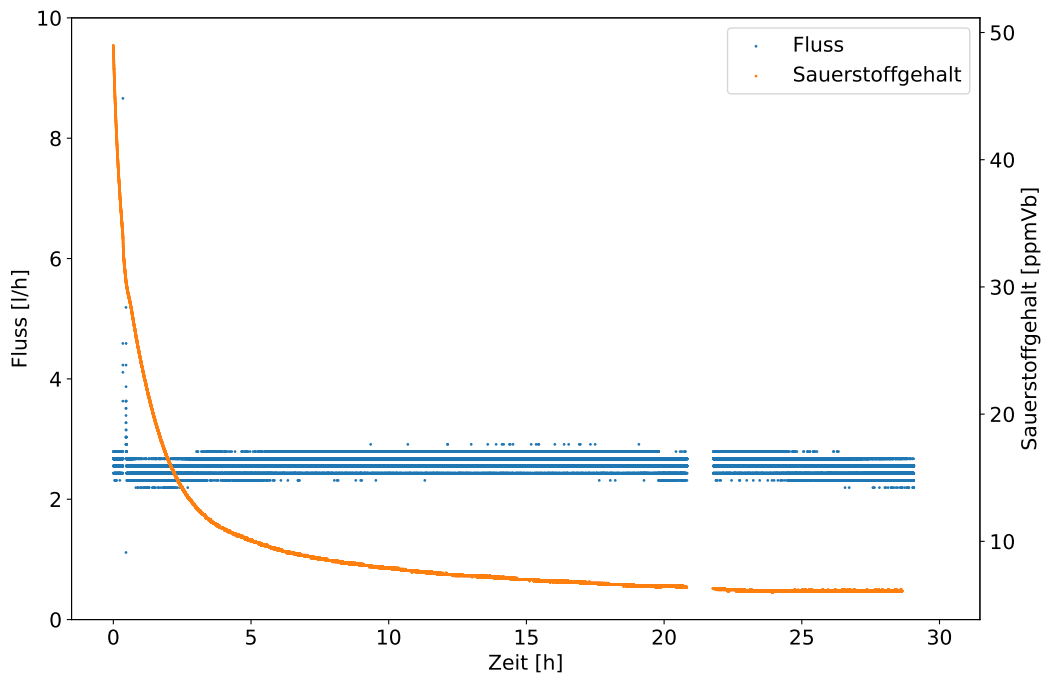
Das Eintreten dieses Falles sollte mit der Dichtigkeitsmessung in Abschnitt 5.1 ausgeschlossen werden. Diese wies einen geringen Sauerstoffanteil im System auf, was als Indikator für eine hohe Dichtigkeit der Kammer interpretiert wurde. Um auszuschließen, dass der Sauerstoffsensor fehlerhafte Werte misst, wurde dessen Kalibration überprüft. Bei Prüfung des Sauerstoffsensors mit einem Prüfgas, welches 100 ppmVb Sauerstoff enthält, wurde

zwar eine Abweichung des Sauerstoffsensors gefunden. Durch Vergleich kann jedoch sicher von einem Sauerstoffgehalt des Kammergases kleiner 100 ppmVb ausgegangen werden. Das ist niedrig und mindert die Aussage der Dichtigkeitsmessung nicht.



**Abbildung 5.16:** Die Ergebnisse einer Messung, bei der das Ventil bei einem konstanten Fluss von  $(4,55 \pm 1,01) \frac{1}{h}$  geschlossen wurde, sind hier zu sehen. Die Grenze von 0,8 mbar, deren Erreichen als Öffnungsbedingung für das Ventil gewählt wurde, wird nicht überschritten. Der Druck steigt ab einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr, was für eine Undichtigkeit im System spricht. Nach Öffnen des Ventils, gekennzeichnet durch die grüne vertikale Linie, fällt der Druck wieder.

Ein weiterer Grund könnte sein, dass das System während der vorherigen Messungen beschädigt worden ist. Sichtbare Beschädigungen sind nicht auffindbar. Um eine Änderung zu prüfen, wurde eine weitere Sauerstoffmessung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Sauerstoffmessung sind in Abbildung 5.17 zu sehen. Bei einem Fluss von ungefähr  $3 \frac{1}{h}$  können wieder sehr niedrige Messwerte des Sauerstoffgehalts unter 10 ppmVb erzielt werden. Dass es keine Veränderung gibt, spricht dafür, dass keine Beschädigung während vorheriger Messungen entstanden ist. Die Undichtigkeit des Systems war während der gesamten Messung vorhanden.



**Abbildung 5.17:** Die Ergebnisse einer zweiten Sauerstoffmessung zur Überprüfung der Dichtigkeit weisen wieder einen niedrigen Sauerstoffgehalt auf. Bei einem Fluss von ungefähr  $3 \frac{1}{h}$  wird ein Sauerstoffgehalt deutlich unter 10 ppmVb erreicht. Zu Beginn der Messung wurde der Fluss für andere Messungen kurz erhöht, was auch einen stärkeren Abfall des Sauerstoffgehalts zur Folge hat. Die Lücke in den Messwerten tritt auf Grund einer fehlerhaften Datenauslese in diesem Zeitraum auf.

Für dieses System scheint die Sauerstoffmessung kein valides Mittel zur Bestimmung der Dichtigkeit zu sein. Eine Vermutung zur Erklärung des niedrigen Sauerstoffgehalts ist, dass Gas nur austritt, wenn im System ein Überdruck herrscht, aber keines aus der Umgebung in das Gassystem eintritt.

Zur Lokalisierung der Undichtigkeit wurde zuerst überprüft, ob die Undichtigkeit in der Kammer, oder in einem anderen Teil des Systems ist. Dazu wurden einzelne Teile des Systems untersucht, während ein niedriger Fluss eingestellt war.



Um zu überprüfen, ob das Ventil undicht ist, wurde der Schlauch am Ventil abgeschraubt und verschlossen. Es konnte wieder beobachtet werden, dass sich ein Sättigungsdruck einstellt. Die Undichtigkeit befindet sich also im System vor dem Ventil. Als nächstes wurden die Schläuche an den Eingängen der Kammer gelöst und verschlossen. Hier stellte sich kein Sättigungsdruck ein, sondern der Bubbler führte nach wenigen Sekunden den Überdruck ab. Das bedeutet, dass das System bis zur Kammer dicht ist. Nach wiederhergestelltem Anschluss der Gaszufuhr an die Kammer, wurden beide Gasauslässe der Kammer geschlossen. Es stellte sich wieder ein Sättigungsdruck ein. Diese Überprüfung beschränkt die Undichtigkeit auf die Kammer. Dabei kann es sich zum Beispiel um eine mechanische Beschädigung, fehlerhafte Anschlüsse, oder unzureichende Verklebung handeln.

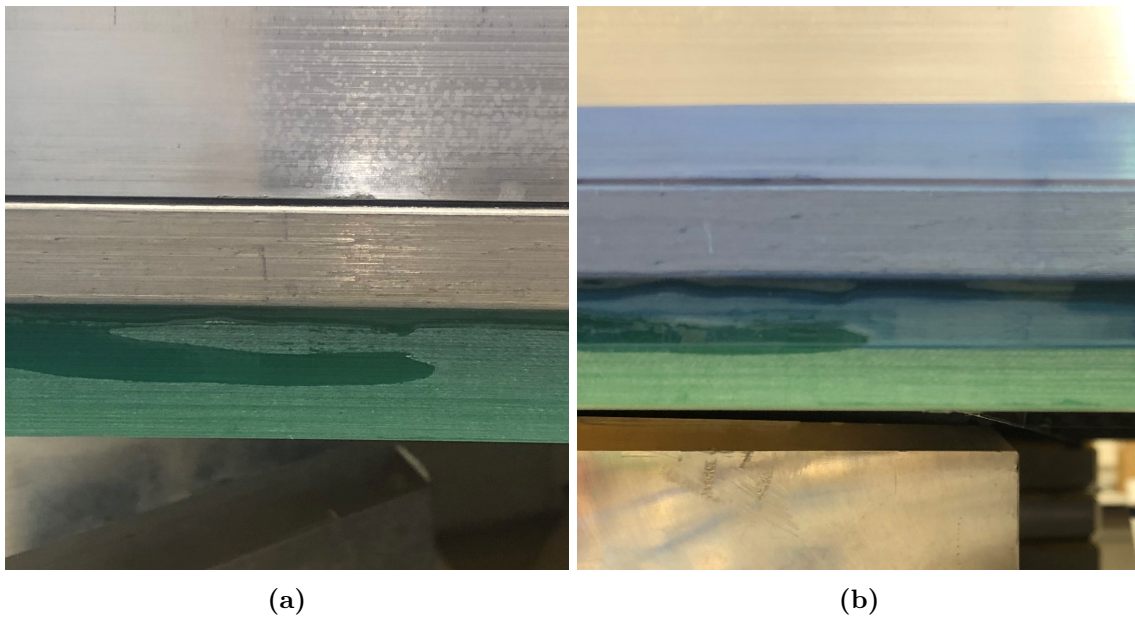
Eine generelle Undichtigkeit der Folie wurde durch eine Messung ausgeschlossen. Diese wird in [28] diskutiert. Da keine Beschädigungen zu erkennen sind, ist die Folie also dicht.

Zur genaueren Lokalisierung wurde mit einem Gasschnüffler gearbeitet. Dieser schlägt bei der Detektion von Argon an. In der Umgebung der Kammer erfolgte der Nachweis sehr häufig. Da in dem Raum zwei mit Argon betriebene Experimente stehen, ist in der Luft viel Argon, welches detektiert werden kann. Das beschränkt die Genauigkeit der Untersuchung. Trotz widriger Bedingungen gelingt ein vermehrter Nachweis von Gas am Übergang zwischen Leisten und Aluminium-Rahmen der Kammer. Das führt zu der Vermutung, dass an den Verklebungen Undichtigkeiten auftreten. Eine genauere Untersuchung mit dem flüchtigeren Gas Helium wird in [28] durchgeführt. Diese Untersuchung ist aber nicht Teil dieser Arbeit.

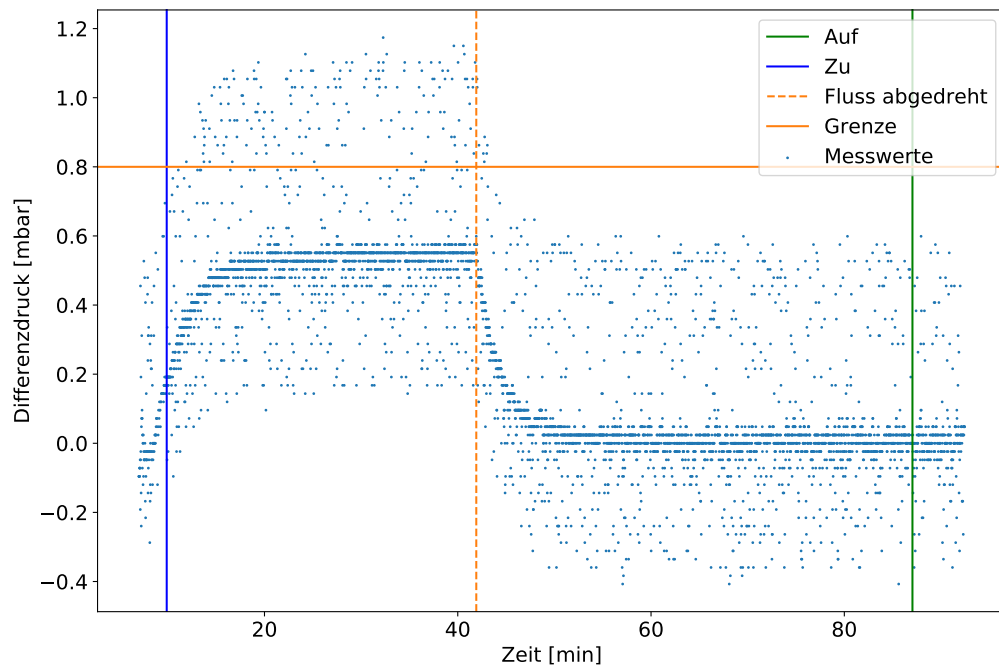
Um die vermutete Undichtigkeit an den Verklebungen der Kammer auszubessern, wurden die Klebenähte mit einem Klebeband überklebt. Die Ausbesserung ist in Abbildung 5.18 zu sehen und wurde einmal rund um die Kammer durchgeführt. Mit dem Klebeband an der Kammer wurde wieder eine Messung durchgeführt, bei der das Ventil geschlossen wurde, während Gas in die Kammer geflossen ist. Die Ergebnisse der Messung bei einem Fluss von  $(4,31 \pm 1,01) \frac{1}{h}$  sind in Abbildung 5.19 zu sehen. Es stellt sich wieder ein Sättigungsdruck ein. Die Undichtigkeit wurde damit nicht beseitigt. Zusätzlich wurde hier nach 2515 s der Fluss abgedreht, während das Ventil geschlossen war. Der Druck fällt sofort bis er 0 mbar erreicht. Auch das spätere Öffnen des Ventils ändert nichts. Damit handelt es sich um eine Undichtigkeit, die dauerhaft vorhanden ist. Es braucht keinen minimalen Überdruck, der die Undichtigkeit öffnet und Gas austreten lässt.

Ein weiterer Versuch die Undichtigkeit zu lokalisieren wurde mit Lecksuchspray durchgeführt. Dieses wirft bei Auftragen auf eine undichte Stelle, an der Gas austritt, Bläschen. Bei Auftragen konnte weder an den Außenseiten, noch an den Anschlüssen eine Undichtigkeit gefunden werden.

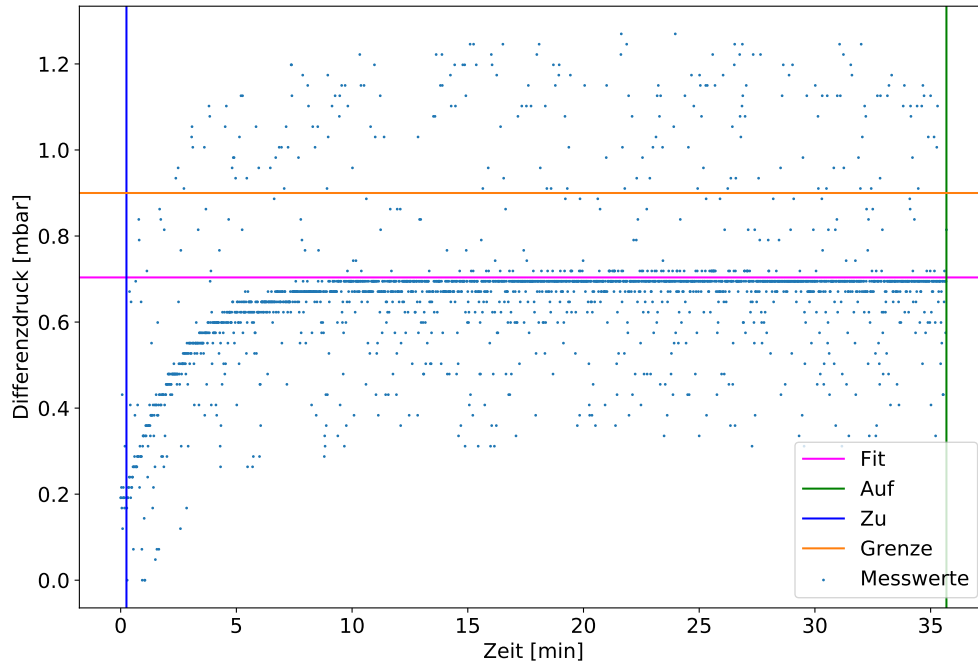
Da die Undichtigkeit im Rahmen dieser Arbeit weder lokalisiert, noch behoben werden kann,



**Abbildung 5.18:** Zur Ausbesserung vermuteter Undichtigkeiten an der Verklebung wurde rund um die Kammer herum Klebeband über die Klebenähte geklebt. In a) ist die Klebenäht ohne Ausbesserung zu sehen und in b) die Ausbesserung mit Klebeband.



**Abbildung 5.19:** Für Sensor 1 sind die Messwerte des Drucks bei einem Fluss von  $(4,31 \pm 1,01) \frac{1}{h}$  nach der Ausbesserung mit Klebeband zu sehen. Es wird wieder ein Sättigungsdruck erreicht, der keine Verbesserung der Undichtigkeit zeigt. Nach 2515s wurde der Fluss abgestellt. Der starke Abfall des Drucks unterstreicht das Ausmaß der Undichtigkeit.



**Abbildung 5.20:** Für Sensor 1 wird der Sättigungsdruck bei einem Fluss von  $7,67 \pm 1,01 \frac{1}{h}$  bestimmt. Dafür wird ab Eintreten der Sättigung bei 500s eine Konstante an die Werte gefittet, die in pink eingezeichnet ist.

wird im Folgenden der Einfluss auf die vorherigen Messungen diskutiert und die Undichtigkeit genauer analysiert, um die Ergebnisse unter Berücksichtigung der neuen Erkenntnisse zu interpretieren.

### 5.3.3 Umgang mit der Undichtigkeit

Zur Analyse der Undichtigkeit wurden unterschiedliche Flüsse eingestellt, während eine hohe Grenze von 0,9mbar für die Öffnung des Ventils eingestellt war. In Abbildung 5.20 ist beispielhaft der Druck für Sensor 1 dargestellt. Um den Sättigungsdruck zu bestimmen wird ein Fit der Form

$$f(t) = A \quad (5.2)$$

angelegt, wobei  $A$  ein konstanter Wert ist. Der Differenzdruck ändert sich nicht mehr mit der Zeit, sondern bleibt konstant. Der Fit wird ab 500s angelegt und ist in der Abbildung in pink eingezeichnet.

Das gleiche Vorgehen wird für unterschiedliche Flüsse durchgeführt. Die zugehörigen Abbildungen sind im Anhang B.4.1 zu sehen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.21 zusammengefasst. Für alle vier Sensoren sind die Sättigungsdrücke bei unterschiedlichen Flüssen zu sehen.

Das bedeutet, dass bei diesen Drücken genau so viel Gas austritt, dass der Differenzdruck durch das aufgestaute Gas nicht mehr steigt.

Auffällig ist die systematische Abweichung von Sensor 3 und 4. Auf Grund der Platzierung wird erwartet, den gleichen Druck zu messen. Die Abweichung scheint systematisch, so dass sich vermuten lässt, dass sie durch einen Fehler in der Ausleseelektronik verursacht wird. Darauf wird bei der nächsten Messung noch näher eingegangen.

Der Austritt des Gases kann in Näherung nach dem Hagen-Poiseuilschen Gesetz in Gleichung (2.2) betrachtet werden. Die Undichtigkeit entspricht dem Rohr, welches durchströmt wird und der Differenzdruck gibt die Druckdifferenz zwischen Kammer und Umgebung an. Der Volumenstrom ist das austretende Gas. Also der Fluss, bei dem der jeweilige Sättigungsdruck auftritt.

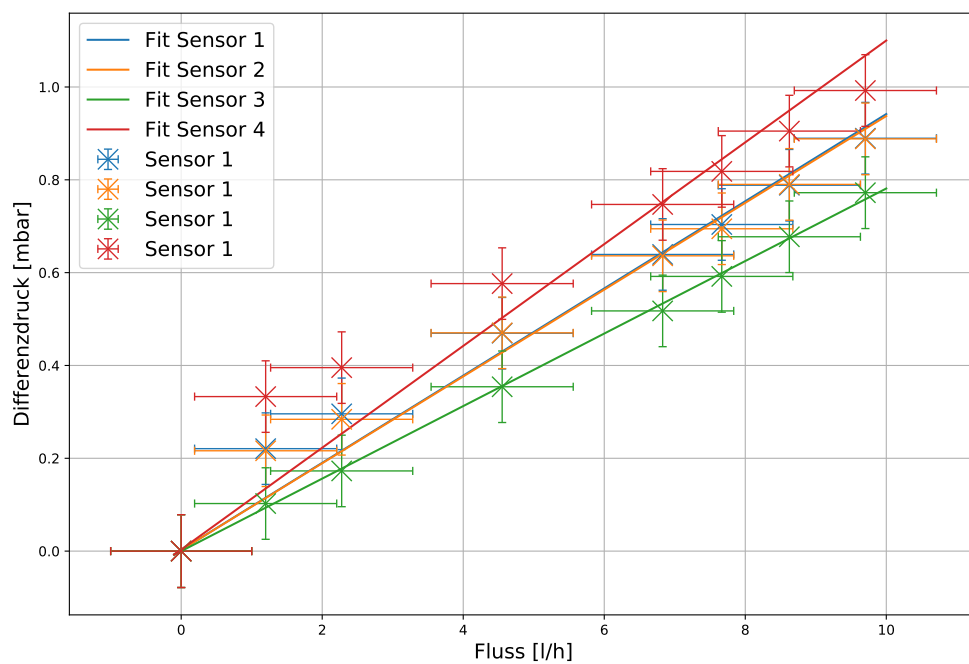
Die linearen Fits der Form

$$\Delta p = p_{\text{diff}}(F) = m \cdot F + b \quad (5.3)$$

sind in Abbildung 5.21 eingezeichnet. Sie legen den Fluss, mit dem Gas aus der Kammer austritt für den Differenzdruck an den jeweiligen Sensoren fest. Die Werte der Fits sind in Tabelle 5.2 zu sehen. Sie werden bei weiteren Messungen zur Korrektur verwendet.

**Tabelle 5.2:** Bestimmte Parameter der linearen Fits

Sensor	m [mbar · h/l]	b [mbar]
1	$0,093 \pm 0,003$	$0,002 \pm 0,007$
2	$0,093 \pm 0,003$	$0,002 \pm 0,006$
3	$0,078 \pm 0,000$	$-5,80 \cdot 10^{-5} \pm 0,001$
4	$0,109 \pm 0,006$	$0,003 \pm 0,012$



**Abbildung 5.21:** Die Sättigungsdrücke, die sich bei unterschiedlichen Flüssen eingestellt haben, sind hier für alle vier Sensoren zu sehen. Der lineare Zusammenhang, der mit dem Hagen-Poiseuilschen Gesetz in Gleichung (2.2) begründet werden kann, rechtfertigt lineare Fits. Die beiden Fits von Sensor 1 und 2 in orange und blau fallen übereinander, weswegen sie schwer zu unterscheiden sind.

## 5.4 Messung des Druckverlusts

### 5.4.1 Methoden

Zur Bestimmung des Druckverlusts wird der Aufbau aus Abbildung 3.2 realisiert. Um unterschiedliche Differenzdrücke im System zu erhalten, wird der Fluss variiert. Beginnend bei  $0 \frac{1}{h}$  wird der Fluss bis auf  $75 \frac{1}{h}$  erhöht. Das Maximum wurde gewählt, da Tests gezeigt haben, dass dann vor der Kammer ein Differenzdruck von etwa 1 mbar herrscht.

Die vier Drucksensoren und das Flussmessgerät werden während der Messung ausgelesen, wobei jede Sekunde ein Messwert pro Sensor aufgenommen wird. Die Flüsse werden für eine halbe Stunde eingestellt und die Messwerte dann nach der in Abschnitt 4.5 beschriebenen Methode bestimmt.

Die Messung bei einem Fluss von  $0 \frac{1}{h}$  fungiert als Nullmessung für alle Sensoren, da keine Druckdifferenz zum Umgebungsdruck erwartet wird. Die Messwerte dieser Messung werden von denen für höhere Flüsse abgezogen.

Mit dem Aufbau aus Abbildung 3.1 wird nach dem gleichen Verfahren vorgegangen, um den Druckverlust durch das Aluminium-Rohr zu bestimmen.

Mit dem Gassystem wird zudem eine Leermessung durchgeführt.

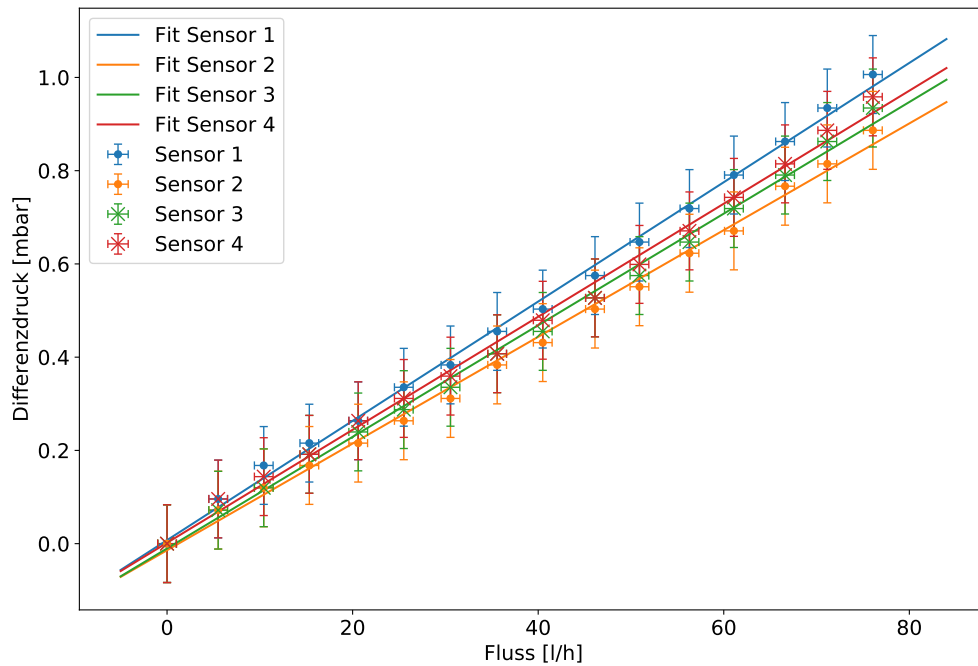
### 5.4.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Drücke, die bei unterschiedlichen Flüssen an den Sensoren gemessen wurden, sind in Abbildung 5.22a zu sehen. Die zugehörigen Histogramme zur Bestimmung der Werte sind im Anhang zu finden. Zum Vergleich dieser Werte wurde das selbe Gassystem ohne Kammer betrieben, wobei die Gas-Zu- und Abläufe direkt miteinander verbunden waren. In dieser Aufbaukonfiguration wurde die Messung wiederholt. Deren Ergebnisse sind in Abbildung 5.22b dargestellt. Der erkennbare lineare Zusammenhang wird anhand eines Fits der Form

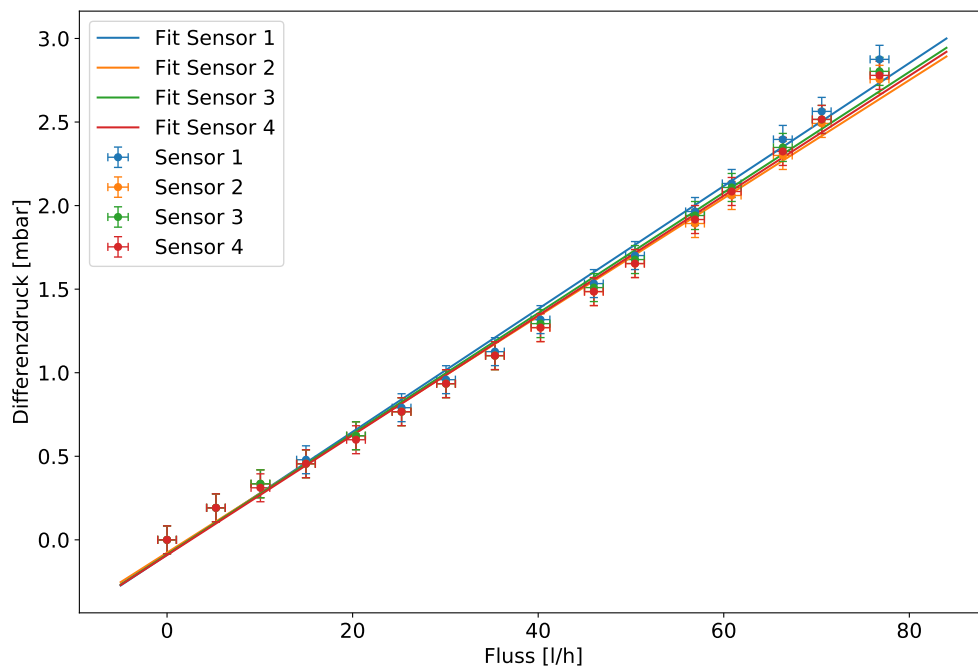
$$p = a \cdot F + c \quad (5.4)$$

beschrieben. Für die jeweiligen Sensoren sind die Fits in der Abbildung eingezeichnet. Die Fitparameter sind in Tabelle 5.3 und Tabelle 5.4 zu sehen. Ein Vergleich der Messwerte der beiden Messungen zeigt, dass die Messwerte für den Differenzdruck der Leermessung für vergleichbare Flüsse deutlich höher als die der Messung mit Kammer sind. Das zeigt auch die Steigung  $a$  der Fits. Die Werte der bestimmten Steigung sind für alle vier Drucksensoren höher als die der Messung mit angeschlossener Kammer. Das könnte auf die in Abschnitt 5.3.2 diskutierte Undichtigkeit der Kammer zurückzuführen sein.

Deswegen wird im Folgenden ein Ansatz gewählt, der die Messwerte um den Fehler, der



(a)



(b)

**Abbildung 5.22:** Zu sehen sind die Messwerte der vier Drucksensoren bei unterschiedlichen Flüssen. In a) sind die Messwerte bei eingebauter Kammer und in b) für die Messung ohne Kammer abgebildet. Zur Darstellung der Daten wird ein linearer Fit verwendet.

durch die Undichtigkeit auftritt, korrigiert. Dafür wird der in Abschnitt 5.3.3 entwickelte Zusammenhang zwischen austretendem Gas und Differenzdruck zur Umgebung verwendet. Die gemessenen Flüsse bei bestimmten Differenzdrücken werden um den Fluss, der aus der Kammer austritt, korrigiert. Gleichung (5.3) wird umgestellt und für den Fluss ergibt sich  $F = \frac{p_{\text{diff}} - b}{m}$ . Der um das austretende Gas korrigierte Fluss ergibt sich also mit

$$F_{\text{kor}} = F - \frac{p_{\text{diff}} - b}{m}. \quad (5.5)$$

Die korrigierten Messwerte sind in Abbildung 5.23 dargestellt. Es wird wieder ein linearer Fit der Form aus Gleichung (5.4) angelegt, dessen Parameter in Tabelle 5.3 stehen. Die Steigung ist noch immer deutlich niedriger als die bei der Leermessung. Das bedeutet, dass die durchgeführte Korrektur nicht ausreichend ist. Es reicht nicht aus, den Fluss um das austretende Gas zu verringern, um das System hinreichend genau zu beschreiben.

Deswegen ist eine Zuordnung der Druckdifferenzen nicht möglich. Wie in Abbildung 5.24 zu sehen ist, kann zwar gezeigt werden dass die Druckdifferenz zwischen den Sensoren 1 und 2, also vor und hinter der Kammer, dem nach Gleichung (2.2) erwarteten linearen Verlauf entsprechen. Jedoch kann anhand der Messwerte auf Grund der Undichtigkeit keine Zuordnung der Druckdifferenzen zu Flüssen vorgenommen werden, wie es eines der Ziele dieser Arbeit war.

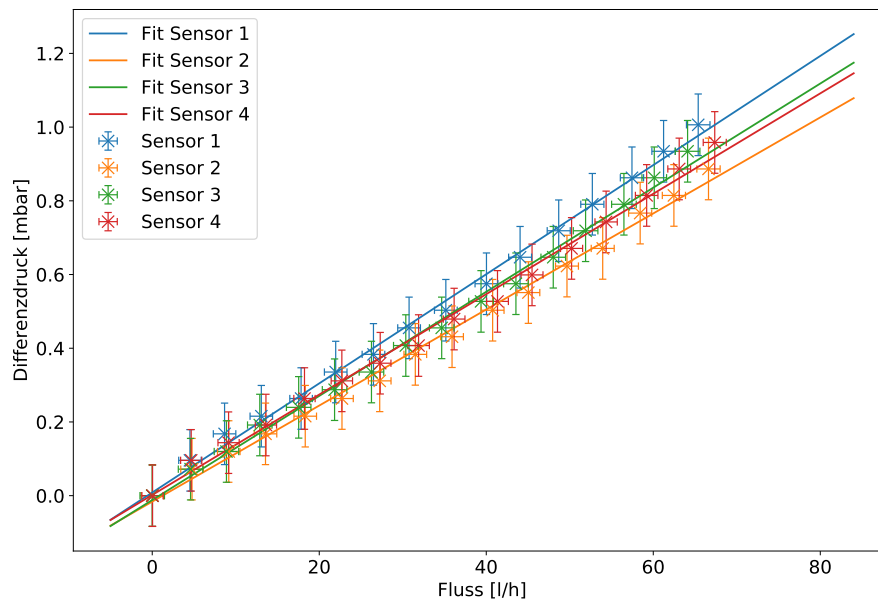
**Tabelle 5.3:** Fitwerte der linearen Fits des Zusammenhangs von Druck und Volumen für die Messung mit Kammer mit und ohne Korrektur

Sensor	ohne Korrektur		mit Korrektur	
	a [mbar · h/l]	c [mbar]	a [mbar · h/l]	c [mbar]
1	$0,012 \pm 0,000$	$0,007 \pm 0,007$	$0,014 \pm 0,000$	$0,008 \pm 0,009$
2	$0,011 \pm 0,000$	$-0,010 \pm 0,008$	$0,013 \pm 0,000$	$-0,010 \pm 0,009$
3	$0,011 \pm 0,000$	$-0,010 \pm 0,008$	$0,014 \pm 0,000$	$-0,010 \pm 0,009$
4	$0,012 \pm 0,000$	$0,001 \pm 0,009$	$0,013 \pm 0,000$	$0,001 \pm 0,010$

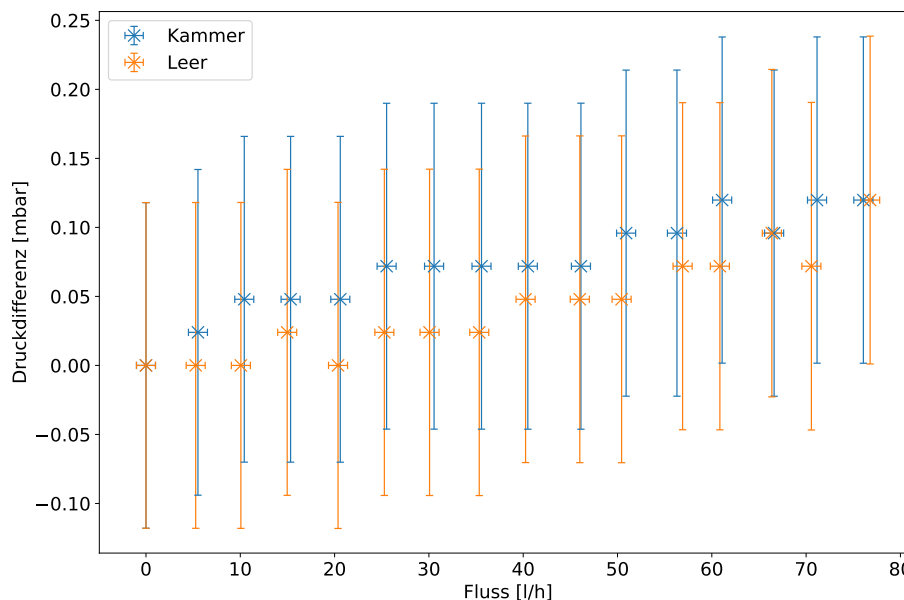
**Tabelle 5.4:** Fitwerte der Fits für den linearen Zusammenhang des Drucks an den Sensoren mit dem Fluss.

Sensor	a [mbar · h/l]	c [mbar]
1	$0,036 \pm 0,000$	$-0,080 \pm 0,034$
2	$0,035 \pm 0,000$	$-0,070 \pm 0,031$
3	$0,036 \pm 0,000$	$-0,080 \pm 0,032$
4	$0,035 \pm 0,000$	$-0,090 \pm 0,033$

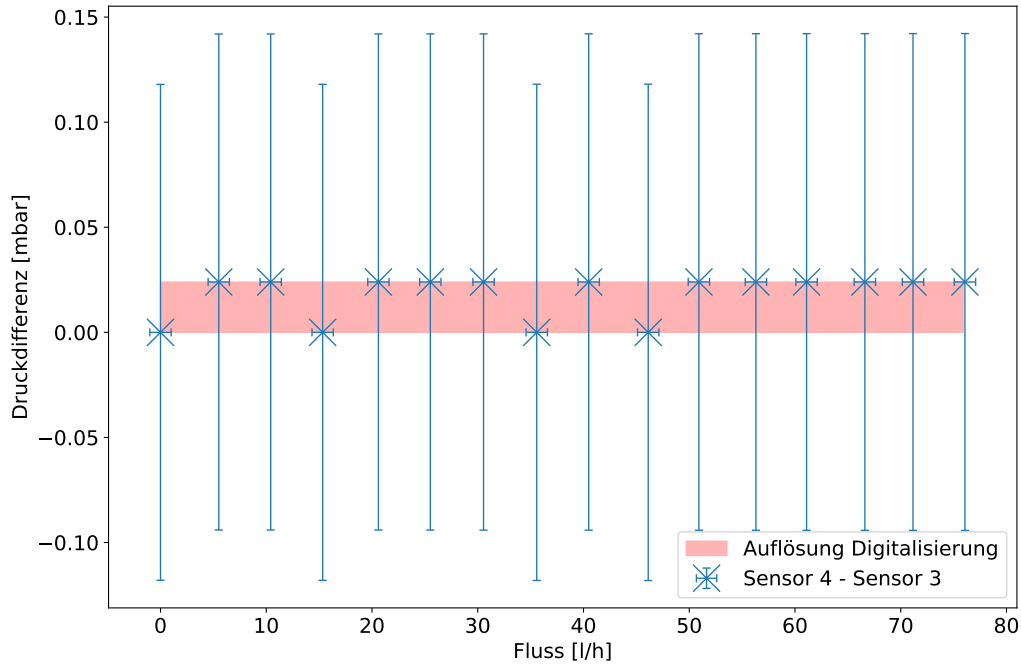




**Abbildung 5.23:** Die Messwerte der Messung mit Kammer sind nach der Korrektur um das austretende Gas hier zu sehen. Die Flüsse sind deutlich niedriger, jedoch reicht diese Korrektur nicht aus, um die Abweichung der Messwerte durch die Undichtigkeit der Kammer zu beschreiben..



**Abbildung 5.24:** Zu sehen sind die Druckdifferenzen zwischen den Messwerten der Sensoren vor und hinter der Kammer. Der erwartete lineare Verlauf aus Gleichung (2.2) kann bestätigt werden. Die Daten haben allerdings wegen der Undichtigkeit keine Aussagekraft.

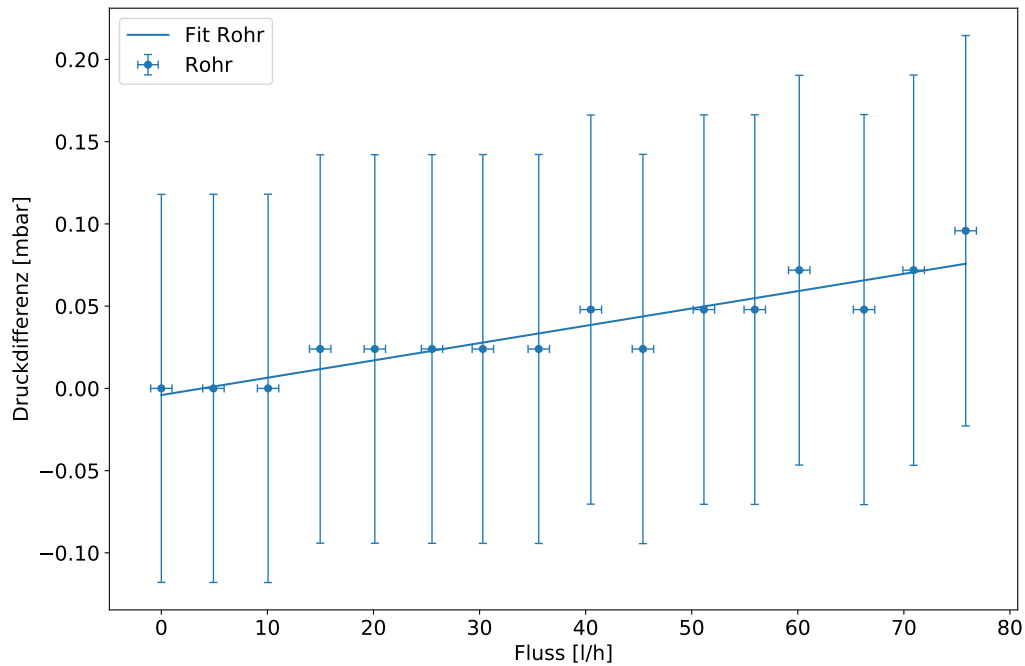


**Abbildung 5.25:** Die Differenz der an den Sensoren 3 und 4 gemessenen Drücke ist zu sehen. Der gemessene Differenzdruck an Sensor 3 wird von dem an Sensor 4 gemessenen abgezogen. Zusätzlich ist ein Balken eingezeichnet, der den Abstand zweier Kanäle am Arduino und somit die Auflösungsgrenze des Arduinos angibt. Die Abweichung der an den beiden Sensoren gemessenen Werte entspricht genau einem Kanal am Arduino. Sie verändert sich nicht mit steigendem Fluss. Deswegen ist die gemessene Abweichung auf die Ungenauigkeit der Messmethode zurückzuführen.

Auffällig ist die Abweichung der gemessenen Drücke an Sensor 3 und 4. Auf Grund ihrer Positionierung sollten diese gleich sein. Die Differenz der Differenzdrücke, die an den Sensoren 3 und 4 gemessen wurden, sind in Abbildung 5.25 zu sehen. Die Differenz schwankt zwischen 0 und  $(0,024 \pm 0,118)$  mbar. Das entspricht der Auflösung des Arduinos. Der Abstand der beiden Kanäle ist in der Abbildung in rot dargestellt. Dort werden keine Werte gemessen. Die Abweichung ist also auf die Digitalisierung zurückzuführen und die Messwerte der Sensoren können als gleich angenommen werden.

Für die Vermessung des Rohrs mit dem Aufbau aus Abbildung 3.1 sind die Druckdifferenzen zwischen den Drucksensoren vor und hinter dem Rohr in Abbildung 5.26 aufgetragen. Wegen des linearen Zusammenhangs von Fluss und Druckabfall aus Gleichung (2.2) wird ein linearer Fit zur Beschreibung der Messwerte verwendet. Für einen Fit der Form

$$\Delta p = m \cdot F + b \quad (5.6)$$



**Abbildung 5.26:** Die Druckdifferenz kann nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille in Gleichung (2.2) mit einer linearen Anpassung versehen werden. Das ist hier für das Rohr zur Abschätzung des Druckverlusts geschehen.

ergeben sich die Parameter  $m = (0,0010 \pm 0,0001) \frac{\text{mbarh}}{\text{l}}$  und  $b = (-0,0040 \pm 0,0053) \frac{\text{mbarh}}{\text{l}}$ . Damit kann der Druckverlust durch das Aluminium-Rohr berechnet werden. Für den angestrebten Fluss von  $15 \frac{1}{\text{h}}$  ergibt sich ein Druckverlust von  $(0,011 \pm 0,005) \text{ mbar}$  an einem Aluminium-Rohr.



## 6 Zusammenfassung

Die gewählte Methode zur Auslese der Signale der Sensoren anhand eines Arduinos wies Probleme auf. Die starken Schwankungen, die durch den Analog-Digital-Konverter des Arduinos auftreten, erschweren die Auswertung. Sie konnten zwar durch die in Abschnitt 4.5 entwickelten Methoden herausgerechnet werden, jedoch ist eine Beurteilung der Messwerte während der Messung anhand einzelner Messwerte nicht möglich. Zudem wird die Auswertung der Messwerte deutlich komplizierter.

Deswegen sollte für zukünftige Messungen eine alternative Möglichkeit zur Auslese der Signale der Sensoren gewählt werden. Ein Ansatz dafür könnte ein Austausch des Analog-Digital-Konverters sein. In [23] wird darauf hingewiesen, dass bei unangeschlossenen Kanälen eine zufällige Belegung der Kanäle zu erwarten ist. Das sollte zwar keine Auswirkungen bei der Messung haben, da die Pins angeschlossen sind. Trotzdem scheinen zufällige Belegungen aufzutreten. Ein Ansatz zur Modifikation der Schaltung wäre ein Austausch des Analog-Digital-Konverters.

Alternativ könnte zum Beispiel mit einem *Shield* für 4 – 20 mA-Signale des Arduinos gearbeitet werden. Ein solches wird zwar auf dem Arduino installiert, besitzt aber einen integrierten Analog-Digital-Konverter. Die Auflösung des *Shields* kann je nach Bauart niedriger als die des Arduinos sein. Bei Betrachtung der starken Schwankungen des Analog-digital-Konverters ist dies jedoch in Kauf zu nehmen.

Der Druckverlust durch Flusswiderstand in der Kammer kann anhand der Messungen, die durchgeführt wurden, nicht bestimmt werden. Die Messungen zum Überdruckabbau in der Kammer zeigen, dass eine Undichtigkeit im System ist. Die Messwerte können nicht um diesen Fehler korrigiert werden. Ein Versuch zur Verringerung des Flusses um das austretende Gas ist fehlgeschlagen.

Für eines der U-förmigen Aluminiumrohre konnte die Bestimmung des Druckverlusts durchgeführt werden. Dieser beläuft sich auf  $(0,011 \pm 0,005)$  mbar für den angestrebten Fluss von  $15 \frac{1}{h}$ . Für den finalen Aufbau kann das nach der Bestimmung des Druckabfalls an einer Kammer für eine der Gasleitungen hochgerechnet werden.

Die Betrachtungen der Auswölbung liefern eine Abschätzung, nach der eine maximale Auslenkung des Eintrittsfensters von 1 mm bei einem Druck von mindestens  $(0,70 \pm 0,15)$  mbar

an Sensor 1, dem Sensor vor der Kammer, erreicht werden. Da die Rekonstruktion der Ereignisse bei höheren Auslenkungen beeinträchtigt ist, wird dieser Druck als neuer Grenzwert vorgeschlagen. Bisher war ein Überdruck von 1 mbar als maximaler Betriebsdruck einer TRD-Kammer angegeben, um die Gasverstärkung im erlaubten Bereich zu halten. Dabei handelt es sich um einen wichtigen Eingangsparameter für den Betrieb des Detektorgassystems. Dieser sollte auf Grundlage der Messergebnisse korrigiert werden. Bei der Abschätzung der maximalen Auslenkung handelt es sich um eine zu hohen Werten hin. Die tatsächliche Auslenkung könnte also niedriger sein. Dabei gilt vor Allem zu berücksichtigen, dass die maximale Auslenkung für ein Fenstersegment und das gesamte Fenster bestimmt wurden. Die Addition dieser entspricht einer Abschätzung nach oben, da die beiden Maximalwerte nicht am gleichen Punkt zu erwarten sind. Eine genauere Untersuchung der Form der Auslenkung wäre notwendig, um die Form des Maximums genauer zu beurteilen. Diese würde zeigen, wie stark die Auswölbung der gesamten Folie bishin zu dem Maximum eines Fenstersegments abfällt. Dafür könnten Simulationen, die anhand der hier gewonnenen Messwerte validiert werden, gemacht werden. Außerdem wäre eine weitere Messung mit mehr Messpunkten möglich. Jedoch ist dabei die hohe relative Unsicherheit der einzelnen Messwerte zu berücksichtigen, die die Aussagekraft über einzelne Messpunkte beschränkt.

Ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit ist die Untersuchung der beobachteten Undichtigkeit. Sie kann nach der Betrachtung des Überdruckaufbaus der einzelnen Komponenten auf die Kammer beschränkt werden. Da die Folie nachweislich dicht ist [29], ist sie nicht die Quelle der Undichtigkeit. Mögliche Quellen sind die Anschlüsse, die Rückseite, sowie die Verklebungen an den Seiten der Kammer. Die Versuche der Detektion von Argon mit dem Gasschnüffler legen eine Undichtigkeit am Rand nahe. Für eine genauere Lokalisierung sollte jedoch eine Messung mit dem Gasschnüffler durchgeführt werden, während Helium durch das System strömt, da Helium besser zur Lokalisierung von Leckagen geeignet ist.

Der bestimmte lineare Zusammenhang zwischen ausströmendem Gas und Überdruck in der Kammer ermöglicht einen Vergleich zu späteren Messungen. Werden vermutete Undichtigkeiten abgedichtet, kann ein eintretender Sättigungsdruck mit dem durch diesen Zusammenhang festgelegten verglichen werden. Ist er niedriger, wurde ein Teil der Undichtigkeiten beseitigt. Ist er gleich hoch, hat diese Undichtigkeit keinen signifikanten Beitrag.

Außerdem können somit weitere Kammern untersucht werden, deren Dichtigkeit im Vergleich zu der dieser Dummy-Kammer klassifiziert werden kann. Dafür bietet sich zum Beispiel eine weitere bereits angefertigte Dummy-Kammer an. Anhand dieser kann überprüft werden ob es sich um einmalige Produktionsfehler handelt.

In aufgrund diesen Beobachtungen ausgelösten Untersuchungen konnten die Fehlstellen inzwischen mit hoher Wahrscheinlichkeit eingegrenzt werden [28]. Diese Untersuchung führte

bereits zu wichtigen Korrekturen des Kammer-Bauprozesses, welche nun in der anlaufenden Kammerproduktion beachtet werden [30]. Die dann produzierten Kammern können wiederum mit dem Aufbau dieser Bachelorarbeit geprüft werden.

Eine wichtige Erkenntnis ist, entgegen der bisherigen Annahmen, dass die Messung des Sauerstoffgehalts kein valides Mittel zur Überprüfung der Dichtigkeit der Kammern darstellt. Die durchgeführten Messungen zeigen, dass zwar Gas austritt, aber kein Gas aus der Umgebung eintritt, welches Verunreinigungen durch Sauerstoff darstellen würde. Die Messung kann zwar die Gasqualität des Detektorgases bestätigen, dient jedoch nicht zur Überprüfung der Dichtigkeit der Kammern gegen Druckverlust. Für weitere Versuche sollten Überprüfungen der Dichtigkeit anhand des Aufbaus von Überdruck getestet werden, oder eine Sauerstoffmessung bei Unterdruck durchgeführt werden.

Die Messung der Auswölbung wird durch die gefundene Undichtigkeit nicht verfälscht. Zwar ist die beobachtete Auswölbung keinem Fluss zuzuordnen, jedoch kann sie dem Differenzdruck in der Kammer zugeordnet werden. Dafür wurde der Sensor vor der Kammer, Sensor 1 gewählt. In weiterführenden Messungen mit einer Kammer, an der keine Undichtigkeiten auftreten, könnte die Messung zum Druckverlust wiederholt werden und die Zuordnung der Drücke in der Kammer zu Flüssen vorgenommen werden.





# A Unsicherheitsbetrachtung

## A.1 Digitalisierung

Bei der Digitalisierung wird der Differenzdruck, sowie der Fluss anhand des Arduinos bestimmt. Die Berechnung erfolgt mit Gleichung (4.4) und Gleichung (4.6). Dabei ist der Widerstand mit einer Unsicherheit von 0,1 % behaftet. Das entspricht  $0,255\Omega$ . Nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung ergibt sich für den Differenzdruck alleine dadurch eine Unsicherheit von

$$u(p_{\text{diff}}) = \frac{20 \text{ mbar} \cdot 5 \text{ V}}{16 \text{ mA}} \frac{\text{Kanal}}{(255 \Omega)^2 \cdot 1023} \cdot 1000 \cdot u(R) = 0,000024 \cdot \text{Kanal}. \quad (\text{A.1})$$

Für den Fluss

$$u(\Phi) = \frac{100 \frac{1}{\text{h}} \cdot 5 \text{ V}}{16 \text{ mA}} \frac{\text{Kanal}}{(255 \Omega)^2 \cdot 1023} \cdot 1000 \cdot u(R) = 0,00012 \cdot \text{Kanal}. \quad (\text{A.2})$$

Die Unsicherheiten sind abhängig vom Kanal des Arduinos, der dem Messwert zugeordnet wird. Dieser wird im Folgenden mit  $K$  bezeichnet. Dazu addiert sich die in Abschnitt 4.2 eingeführte Unsicherheit durch die Auflösung und die in Abschnitt 3.1.2, sowie Abschnitt 3.1.1 eingeführte Unsicherheit, die durch den Hersteller angegeben wurde.

Die Messwerte werden durch Abzug des Offsets, der anhand einer Nullmessung bestimmt wird berechnet. Bei der Bestimmung des Offsets werden nur die durch die Digitalisierung entstehende Unsicherheit betrachtet. Die Unsicherheit, die durch den Hersteller angegeben wird, wird vernachlässigt, da der Nullpunkt sehr gut festgelegt werden kann und konstant bleibt. Damit ergibt sich für die Unsicherheiten von Fluss und Differenzdruck Folgendes:

$$u(\Phi) = \sqrt{(1,2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{h}} \cdot K)^2 + (1,210^{-4} \frac{1}{\text{h}} \cdot K_{\text{Offset}})^2 + (1 \frac{1}{\text{h}})^2 + (0,12 \frac{1}{\text{h}})^2} \quad (\text{A.3})$$

$$u(p_{\text{diff}}) = \sqrt{(2,4 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot K)^2 + (2,4 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot K_{\text{Offset}})^2 + (0,077 \text{ mbar})^2 + (0,024 \text{ mbar})^2}. \quad (\text{A.4})$$

## A.2 Auswölbung

### Unsicherheiten der Messmethoden

Zur Messung der Auswölbung eines einzelnen Fenstersegments wird die in Abschnitt 5.2.1.1 beschriebene Methode verwendet. Die Auslenkung der Leisten wird anhand der Methode in Abschnitt 5.2.1.4 vermessen. Die beiden Methoden werden zur Beurteilung der Messunsicherheit auf ihre Reproduzierbarkeit untersucht. Dafür wird mit beiden Methoden der selbe Abstand zwanzig mal gemessen. Dabei handelt es sich zum Einen um den Abstand zwischen Folie und Acrylglasplatte an Loch 5 an Fenster 2. Zum Anderen um den Abstand der Carbon- zur Aluminium-Leiste am Mittelpunkt in Orientierung 1.

Die Ergebnisse der Mehrfachmessungen sind in Tabelle Tabelle A.1 und Tabelle Tabelle A.2 zu sehen. Daraus ergeben sich die Mittelwerte  $\mu_1 = 20,22 \text{ mm}$  und  $\mu_2 = 54,65 \text{ mm}$  mit den Standardabweichungen  $s_1 = 0,05 \text{ mm}$  und  $s_2 = 0,03 \text{ mm}$ . Die Standardabweichung entspricht nicht der Unsicherheit bei einer Einfachmessung. Für diese wird als Unsicherheit die maximale Abweichung vom Mittelwert angenommen. Damit ergeben sich Unsicherheiten von

$$u_{\text{Fenstersegment}} = 0,09 \text{ mm} \quad \text{und} \quad u_{\text{Leisten}} = 0,07 \text{ mm}.$$

Die Unsicherheit des Messschiebers die vom Hersteller mit  $0,02 \text{ mm}$  [**messschieber**] angegeben ist, wird dahingegen vernachlässigt. Bei Berechnung der tatsächlichen Auslenkung, also nach Abzug der Nullmessung ergeben sich nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung Unsicherheiten von

$$u_{\text{Fenstersegment}} = 0,12 \text{ mm} \quad \text{und} \quad u_{\text{Leisten}} = 0,09 \text{ mm}.$$

**Tabelle A.1:** Messwerte der Mehrfachmessung des Abstandes der Folie zur Oberfläche der Plexiglasplatte an Loch 5 am Fenster 2.

Nummer	Messwert [mm]	Nummer	Messwert [mm]
1	20,22	11	20,18
2	20,21	12	20,24
3	20,17	13	20,16
4	20,24	14	20,15
5	20,29	15	20,24
6	20,18	16	20,27
7	20,26	17	20,25
8	20,23	18	20,20
9	20,29	19	20,30
10	20,22	20	20,13

**Tabelle A.2:** Messwerte der Mehrfachmessung des Abstandes Aluminium-Leiste zur Carbon-Leiste am Mittelpunkt in Orientierung 1.

Nummer	Messwert [mm]	Nummer	Messwert [mm]
1	54,69	11	54,62
2	54,66	12	54,67
3	54,66	13	54,65
4	54,62	14	54,71
5	54,65	15	54,65
6	54,62	16	54,68
7	54,63	17	54,69
8	54,61	18	54,61
9	54,61	19	54,61
10	54,63	20	54,64

**Unsicherheiten der bestimmten Maxima**

Die Unsicherheit der Maxima ist bei den gemessenen Maxima die Messunsicherheit und bei denen, die aus den Parabelfits errechnet werden, ergibt sie sich indirekt aus denen der Parameter des Parabelfits. Die Position des Maximums ergibt sich als Nullstelle der Ableitung mit

$$0 = 2Ax + B \Leftrightarrow -\frac{B}{2A} = x_{\max} \quad (\text{A.5})$$

bestimmt. Die Unsicherheit der Position ist somit

$$u(x_{\max}) = \sqrt{\left(\frac{u(B)}{2A}\right)^2 + \left(\frac{B}{2A^2}u(A)\right)^2}. \quad (\text{A.6})$$

Die maximale Auslenkung, also die y-Koordinate des Scheitelpunkts ergibt sich bei Einsetzen von  $x_{\max}$  in Gleichung (5.1) mit

$$y_{\max} = Ax_{\max}^2 + Bx_{\max} + C. \quad (\text{A.7})$$

$$u(y_{\max}) = \sqrt{(x_{\max}^2 u(A))^2 + (2Ax_{\max} u(x_{\max}))^2 + (x_{\max} u(B))^2 + (Bu(x_{\max}))^2 + u(C)^2} \quad (\text{A.8})$$

### Unsicherheit des bestimmten Grenzwerts

Zur Bestimmung des Grenzwertes werden zwei lineare Fits addiert, sodass sich die Steigung mit  $m = m_1 + m_2$  und der y-Achsenabschnitt mit  $b = b_1 + b_2$  berechnet. Für die beiden Parameter resultieren Unsicherheiten von

$$u(m) = \sqrt{u(m_1)^2 + u(m_2)^2} \quad \text{und} \quad u(b) = \sqrt{u(b_1)^2 + u(b_2)^2}. \quad (\text{A.9})$$

Das überschreiten einer Auslenkung von 1 mm wird mit

$$1 = mp_{\text{diff}} + b \Leftrightarrow p_{\text{diff,max}} = \frac{1 - b}{m}. \quad (\text{A.10})$$

Die Unsicherheit des Grenzwerts wird mit

$$u(p_{\text{diff,max}}) = \sqrt{\left(\frac{u(b)}{m}\right)^2 + \left(\frac{b \cdot u(m)}{m^2}\right)^2} \quad (\text{A.11})$$

berechnet. Die Unsicherheit der Auslenkung bei Erreichen des Grenzwerts ergibt sich aus

$$u(a_{\text{max}}) = \sqrt{(u(m)p_{\text{diff,max}})^2 + (a \cdot u(p_{\text{diff,max}}))^2 + u(b)^2} \quad (\text{A.12})$$

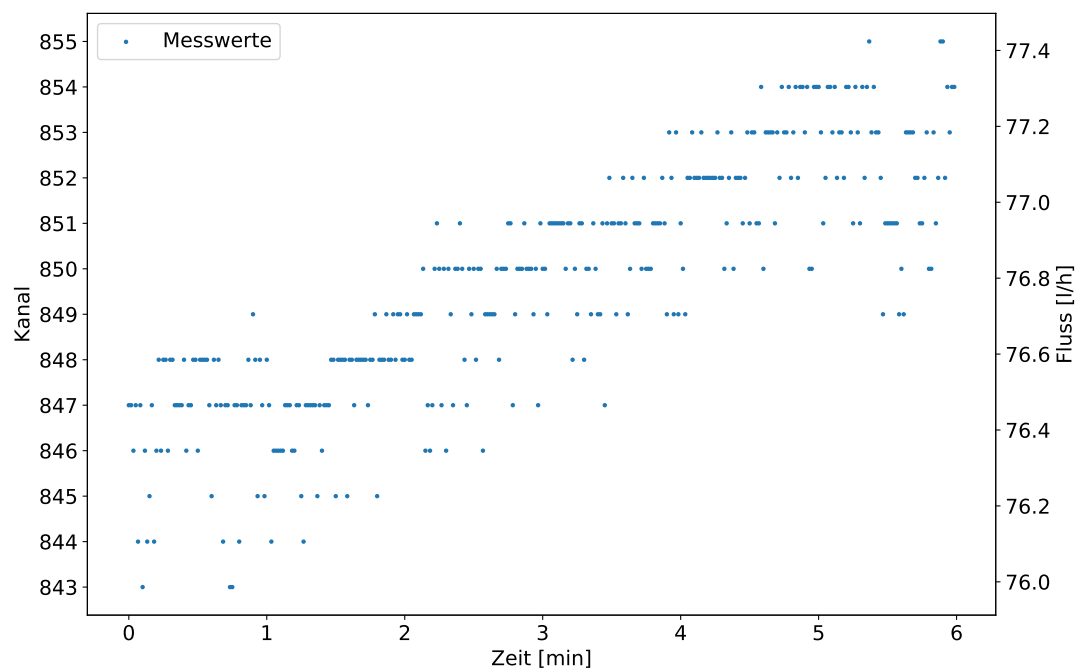
## A.3 Überdruckabbau

Bei der Ventilmessung wird ein Sättigungsdruck anhand eines Fits bestimmt. Die Unsicherheit des Drucks, der anhand des Fits bestimmt wird ergibt sich nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung aus der des Fits und der des durch den Hersteller angegebenen von 0,077 mbar.

## B Anhang

### B.1 Digitalisierung

#### B.1.1 Testen und Optimieren der Messung mit dem Flussmessgerät



**Abbildung B.1:** Zu sehen ist das Ansteigen eines Flusses zu Beginn einer Messung. Mit dem Flussregler wurde ein konstanter Fluss eingestellt, bis dieser aber am Flussmessgerät gemessen wird, steigt er an.

### B.1.2 Testen und Optimieren der Messung mit den Differenzdrucksensoren

**Tabelle B.1:** Mittelwerte und Parameter des Gaußfits für das Histogramm der Langzeitmessung mit dem Differenzdrucksensor. Dabei steht Anteil für den Anteil der Daten, der oben und unten jeweils nicht betrachtet wird, um die Daten um die unphysikalischen Werte zu korrigieren.

Anteil [%]	Mittelwert	$A$	$\mu$	$\sigma$
0	$650,82 \pm 6,34$	$0,22 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,02$	$1,42 \pm 0,02$
1	$650,76 \pm 5,66$	$0,22 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,02$	$1,42 \pm 0,02$
2	$650,68 \pm 5,06$	$0,22 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,02$	$1,42 \pm 0,02$
3	$650,60 \pm 4,48$	$0,22 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,02$	$1,42 \pm 0,02$
4	$650,51 \pm 3,90$	$0,22 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,02$	$1,42 \pm 0,02$
5	$650,42 \pm 3,34$	$0,22 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,02$	$1,42 \pm 0,02$
6	$650,34 \pm 2,80$	$0,22 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,01$	$1,42 \pm 0,01$
7	$650,26 \pm 2,30$	$0,22 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,01$	$1,42 \pm 0,01$
8	$650,19 \pm 1,88$	$0,22 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,01$	$1,42 \pm 0,01$
9	$650,15 \pm 1,57$	$0,22 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,01$	$1,41 \pm 0,01$
10	$650,14 \pm 1,40$	$0,22 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,00$	$1,41 \pm 0,00$
11	$650,14 \pm 1,31$	$0,22 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,00$	$1,38 \pm 0,00$
12	$650,14 \pm 1,24$	$0,23 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,01$	$1,34 \pm 0,01$
13	$650,14 \pm 1,17$	$0,23 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,01$	$1,30 \pm 0,01$
14	$650,14 \pm 1,12$	$0,23 \pm 0,00$	$650,17 \pm 0,01$	$1,26 \pm 0,01$

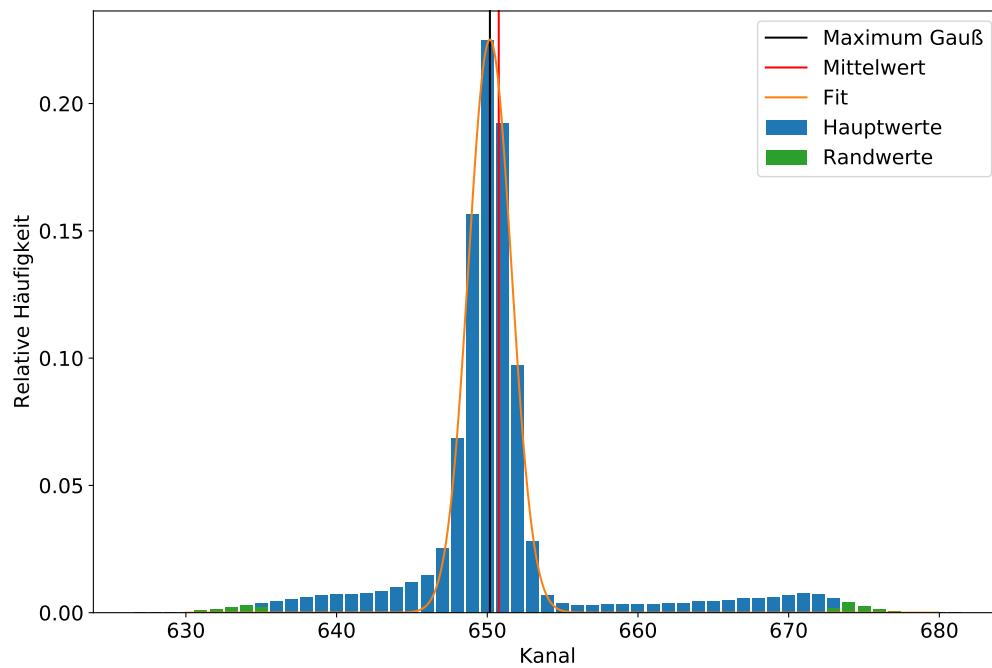


Abbildung B.2: 1 %

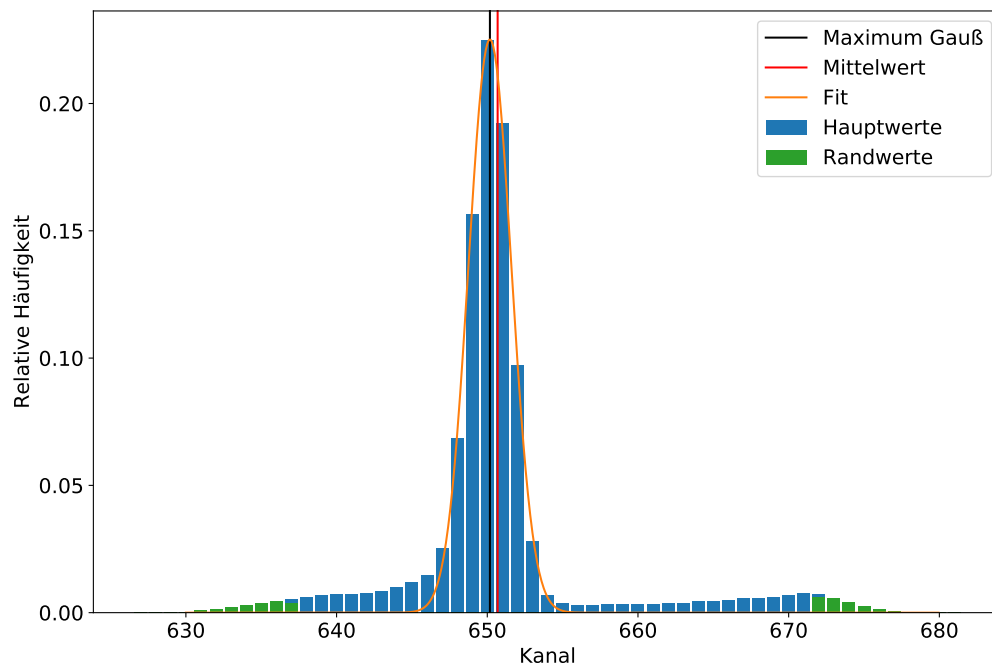


Abbildung B.3: 2 %

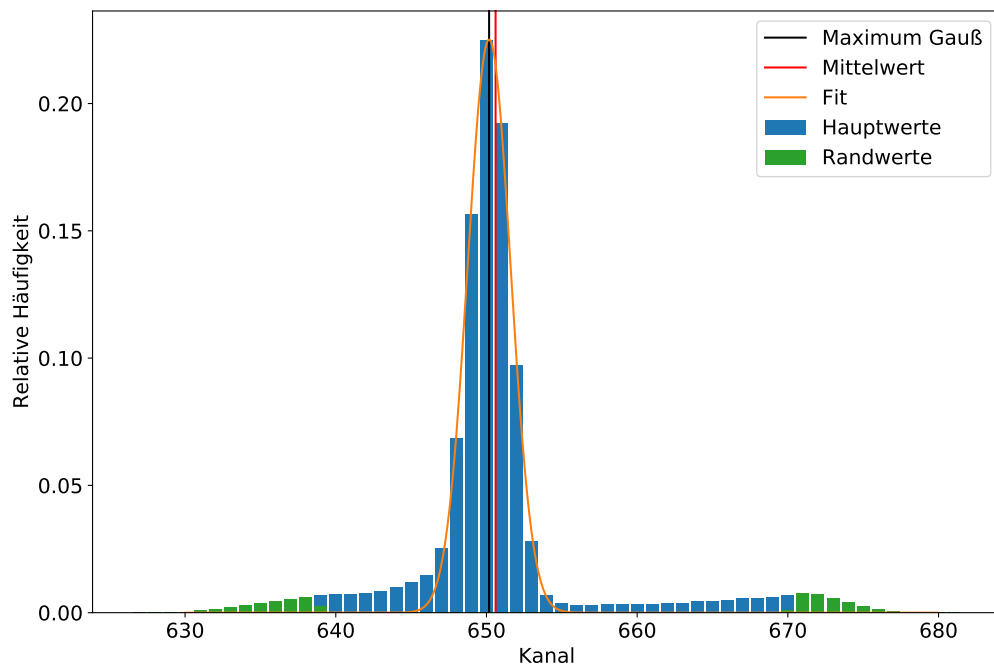


Abbildung B.4: 3 %

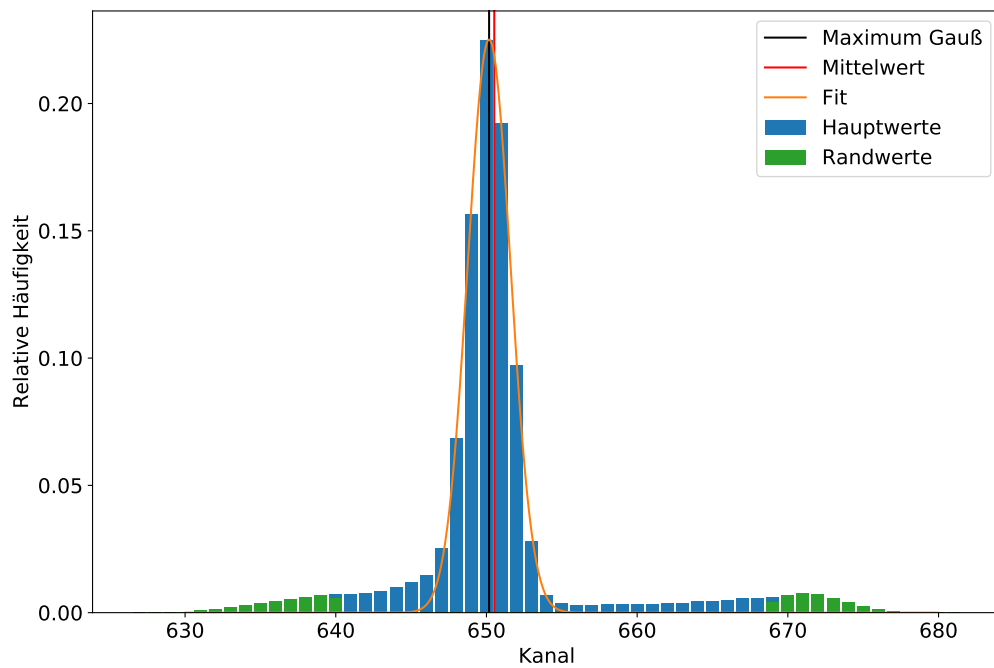


Abbildung B.5: 4 %



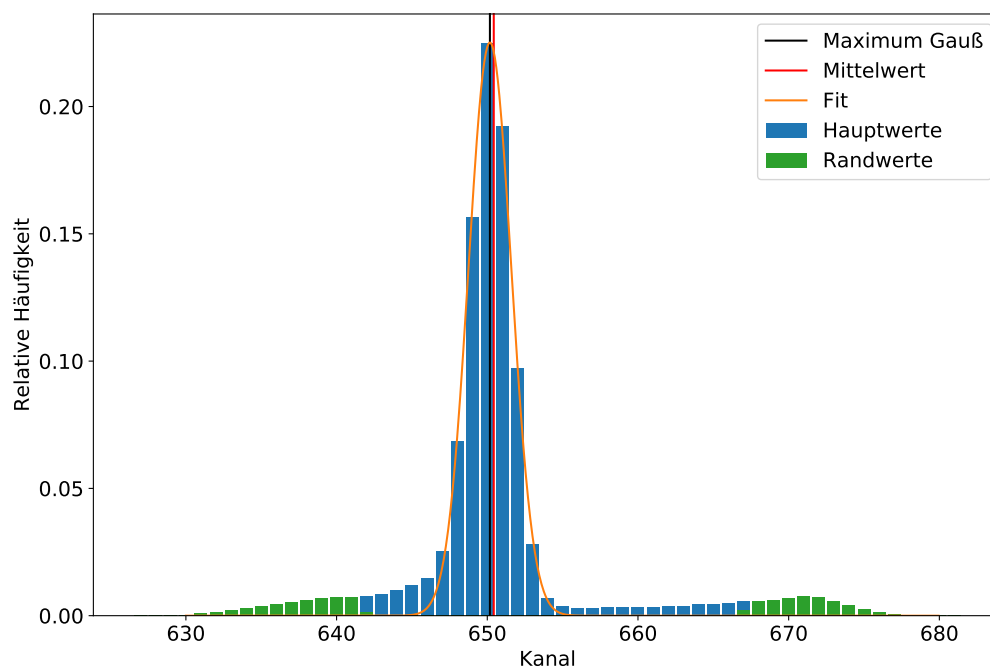


Abbildung B.6: 5 %

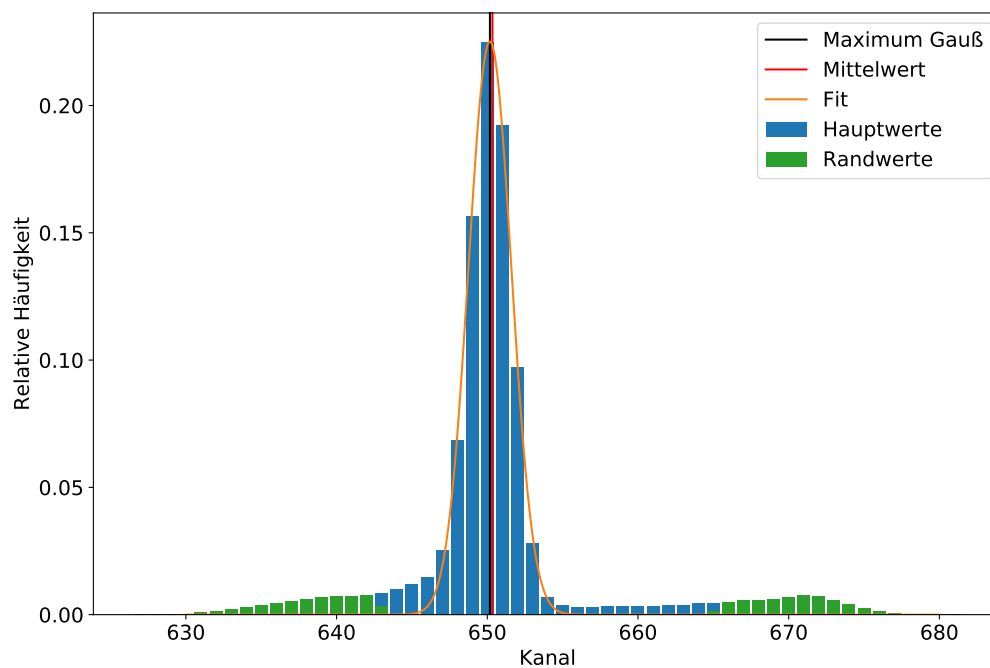


Abbildung B.7: 6 %

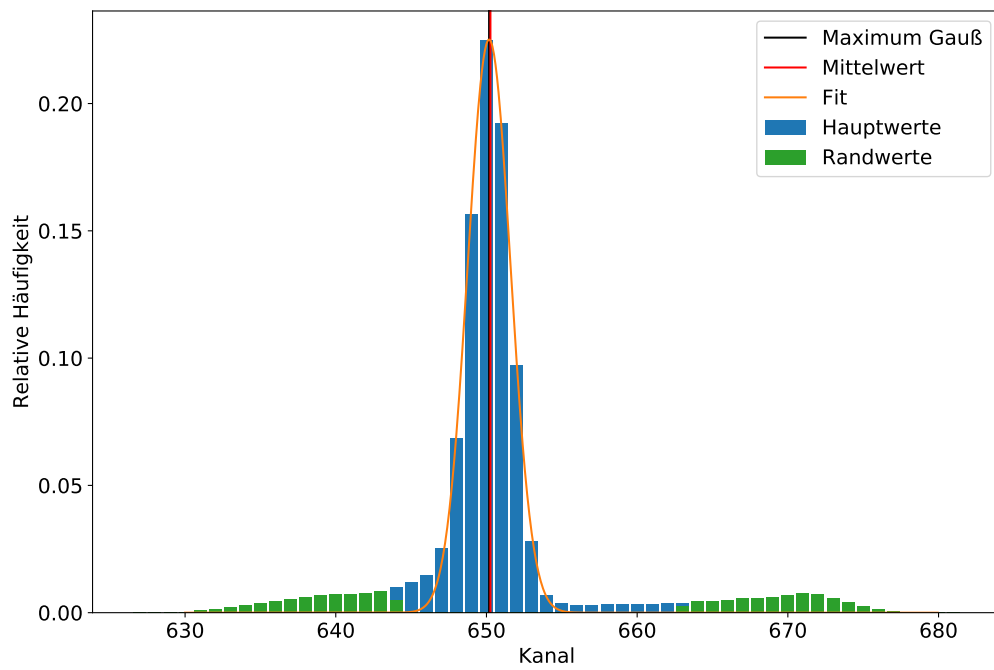


Abbildung B.8: 7 %

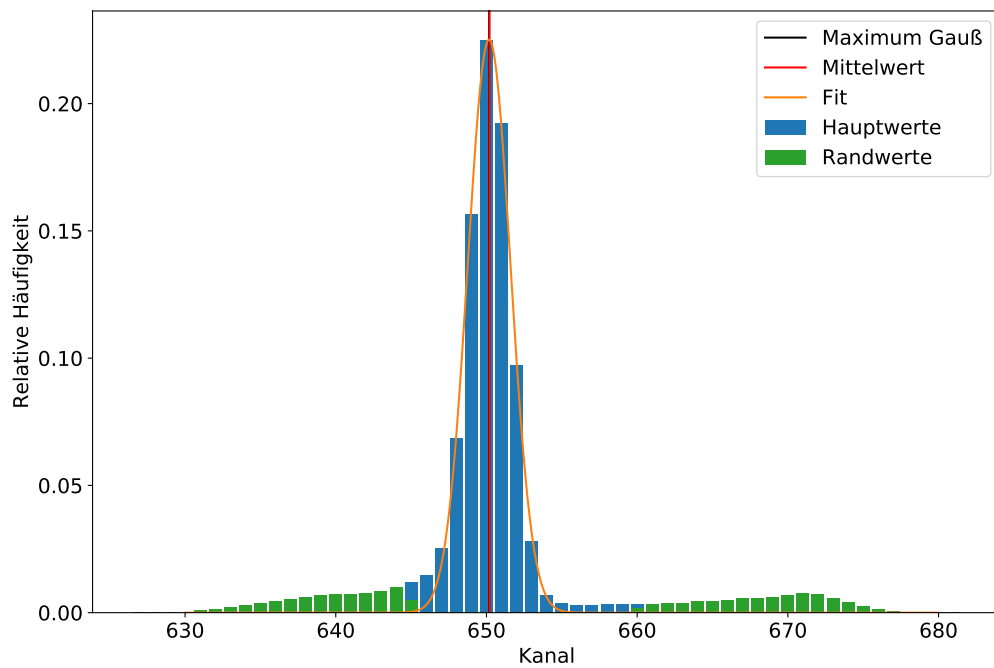


Abbildung B.9: 8 %

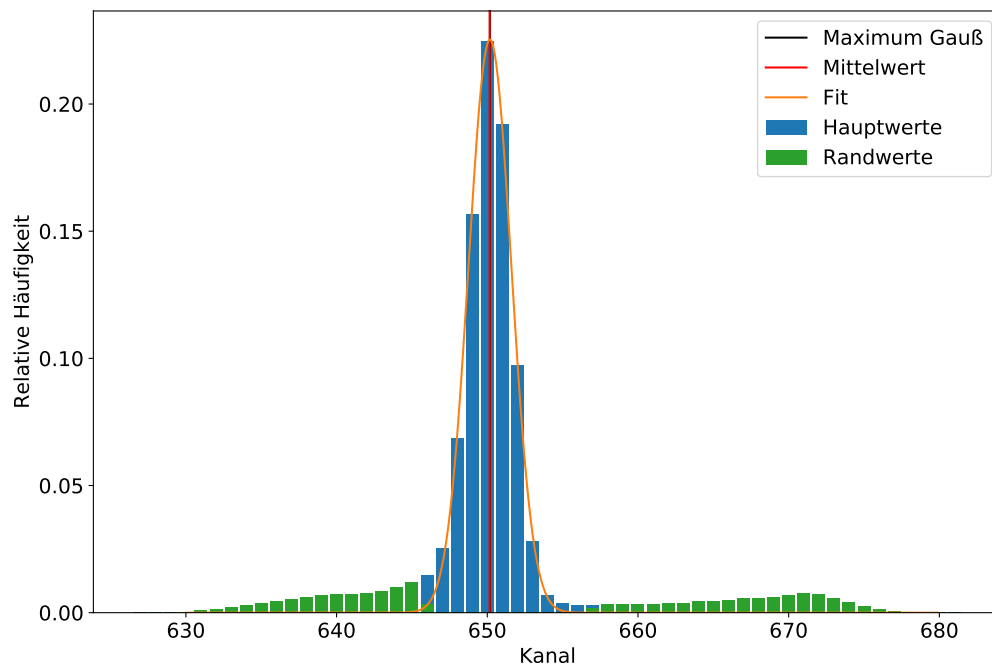


Abbildung B.10: 9 %

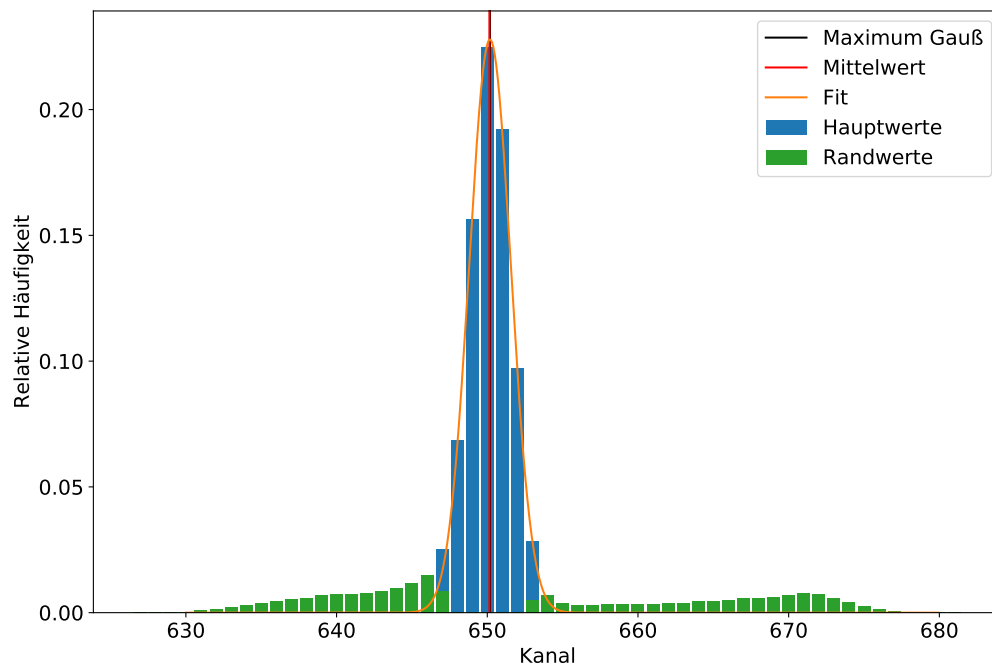


Abbildung B.11: 11 %

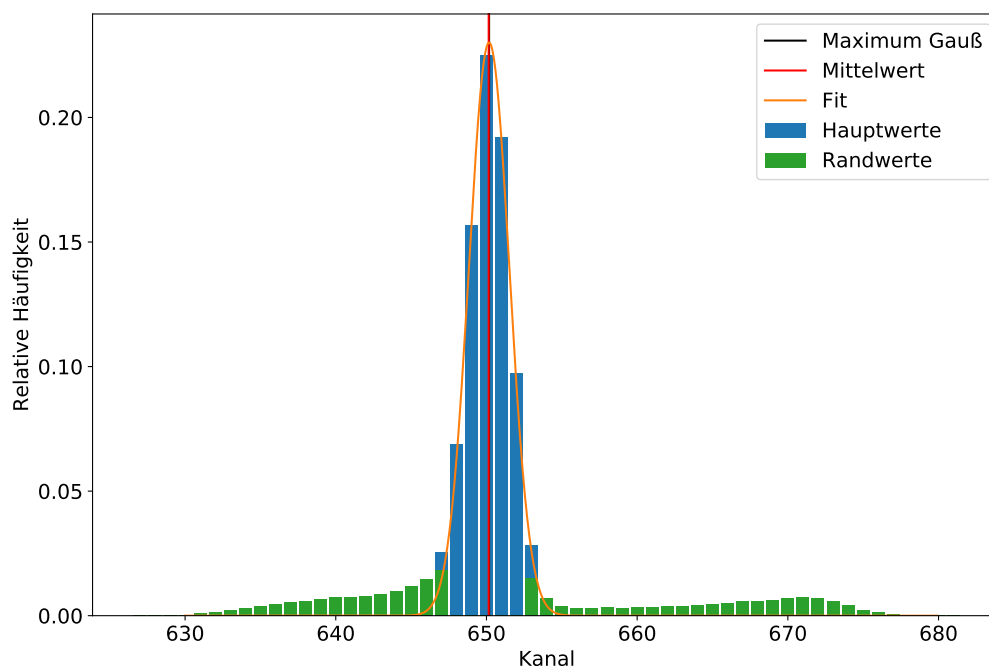


Abbildung B.12: 12 %

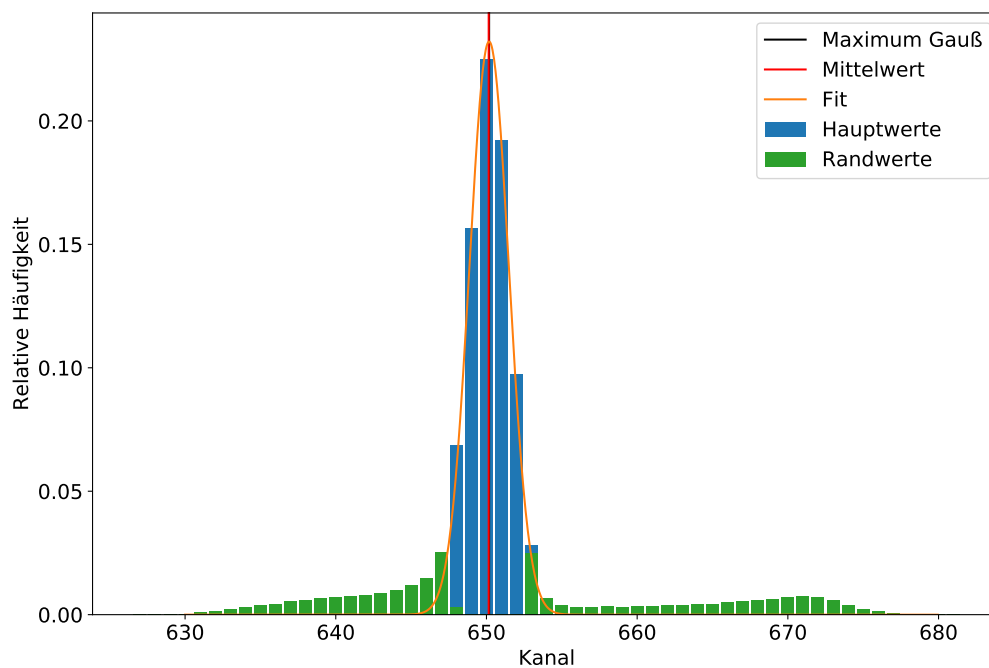


Abbildung B.13: 13 %

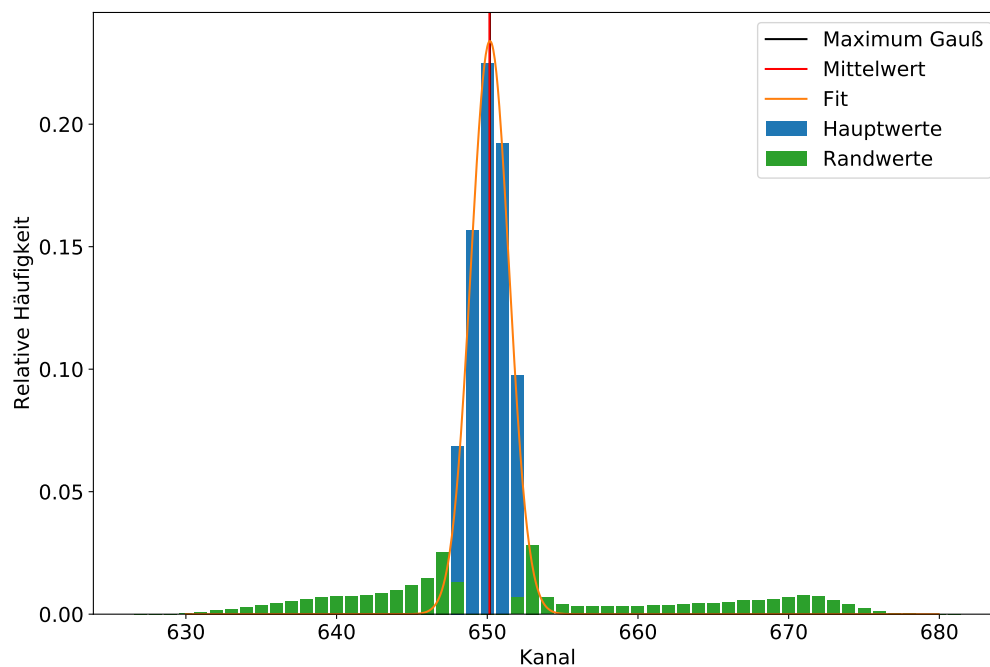


Abbildung B.14: 14 %

## B.2 Auswölbungsmessung

### B.2.1 Messwerte der Sensoren

**Tabelle B.2:** Messwerte des Flussmessgeräts und der beiden Drucksensoren bei der Auswölbungsmessung der Fenstersegmente.

Messung	Flussmessgerät		Sensor 1		Sensor 2	
	Kanal	Fluss [l/h]	Kanal	$p_{\text{diff}}$ [mbar]	Kanal	$p_{\text{diff}}$ [mbar]
1	206	$0,0 \pm 1,00$	626	$0,0 \pm 0,083$	630	$0,0 \pm 0,083$
2	294	$10,54 \pm 1,00$	632	$0,143 \pm 0,083$	635	$0,119 \pm 0,083$
3	384	$21,32 \pm 1,00$	637	$0,263 \pm 0,083$	640	$0,239 \pm 0,083$
4	384	$21,32 \pm 1,00$	642	$0,383 \pm 0,083$	645	$0,359 \pm 0,083$
5	554	$41,68 \pm 1,00$	647	$0,503 \pm 0,083$	649	$0,455 \pm 0,083$
6	640	$51,99 \pm 1,01$	652	$0,622 \pm 0,083$	653	$0,551 \pm 0,083$
7	723	$61,93 \pm 1,01$	658	$0,766 \pm 0,083$	659	$0,694 \pm 0,083$
8	802	$71,39 \pm 1,01$	663	$0,886 \pm 0,083$	664	$0,814 \pm 0,083$
9	847	$76,78 \pm 1,01$	667	$0,982 \pm 0,083$	667	$0,886 \pm 0,083$

**Tabelle B.3:** Messwerte des Flussmessgeräts und der beiden Drucksensoren bei der Auswölbungsmessung der Leisten in horizontaler Orientierung.

Messung	Flussmessgerät		Sensor 1		Sensor 2	
	Kanal	Fluss [l/h]	Kanal	$p_{\text{diff}}$ [mbar]	Kanal	$p_{\text{diff}}$ [mbar]
1	206	$0,0 \pm 1,00$	624	$0,0 \pm 0,083$	629	$0,0 \pm 0,083$
2	294	$10,54 \pm 1,00$	630	$0,143 \pm 0,083$	634	$0,119 \pm 0,083$
3	383	$21,20 \pm 1,00$	635	$0,263 \pm 0,083$	639	$0,239 \pm 0,083$
4	468	$31,38 \pm 1,00$	640	$0,383 \pm 0,083$	644	$0,359 \pm 0,083$
5	559	$42,28 \pm 1,00$	646	$0,527 \pm 0,083$	649	$0,479 \pm 0,083$
6	638	$51,75 \pm 1,01$	651	$0,646 \pm 0,083$	653	$0,575 \pm 0,083$
7	720	$61,57 \pm 1,01$	657	$0,790 \pm 0,083$	658	$0,694 \pm 0,083$
8	801	$71,27 \pm 1,01$	663	$0,934 \pm 0,083$	664	$0,838 \pm 0,083$
9	838	$75,70 \pm 1,01$	666	$1,006 \pm 0,083$	667	$0,910 \pm 0,083$

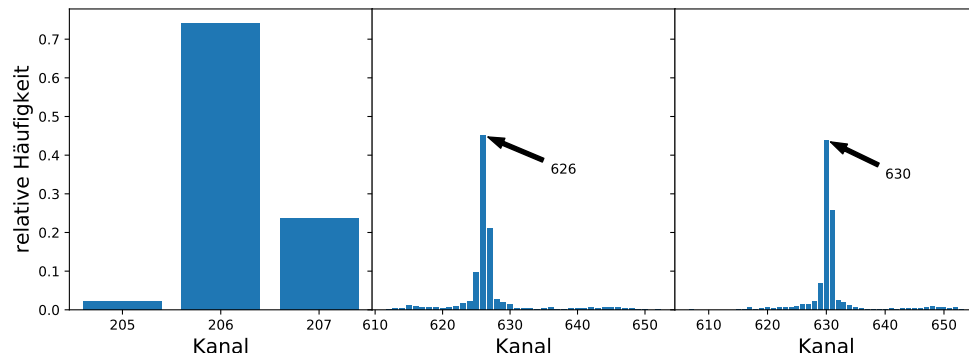


Abbildung B.15: Fenstersegmente Nullmessung

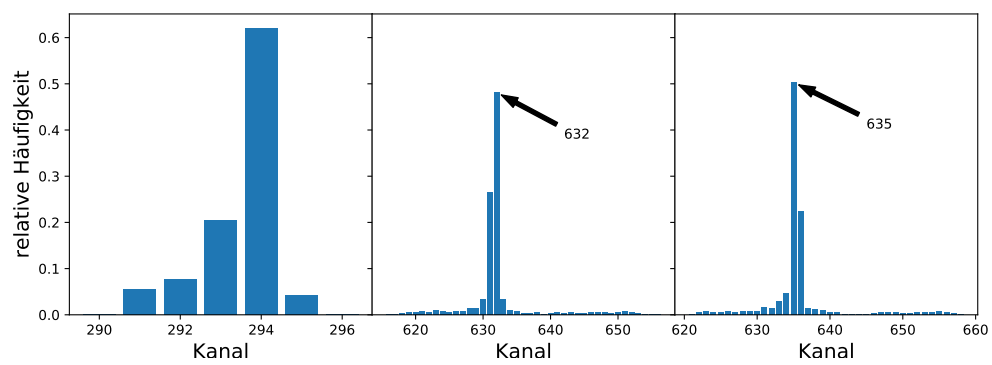


Abbildung B.16: Fenstersegmente Messung 2

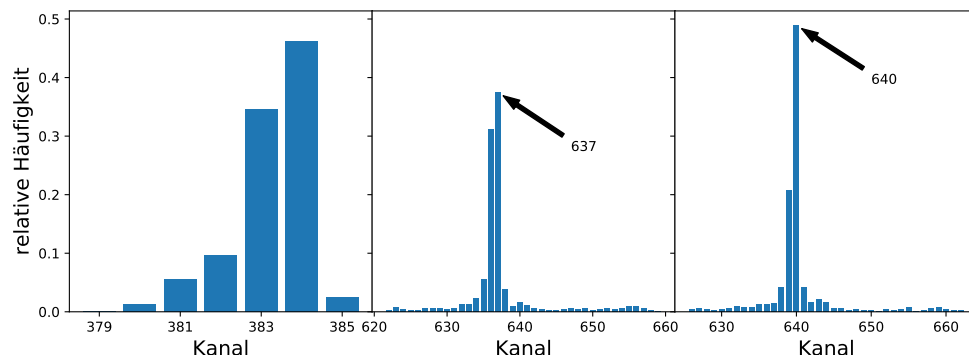


Abbildung B.17: Fenstersegmente Messung 2

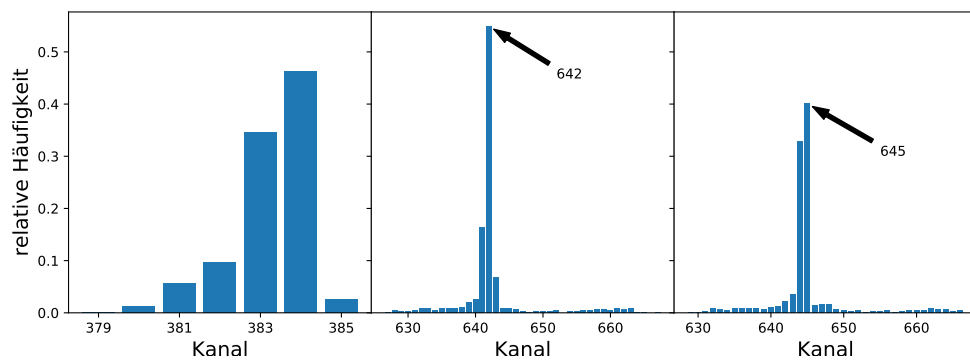


Abbildung B.18: Fenstersegmente Messung 3

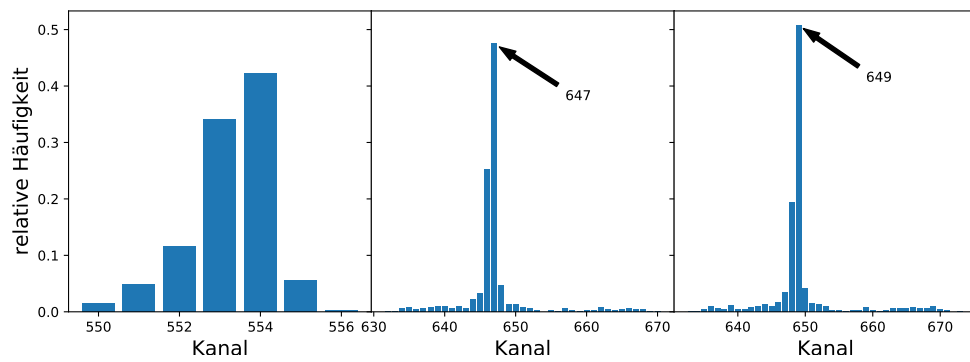


Abbildung B.19: Fenstersegmente Messung 4

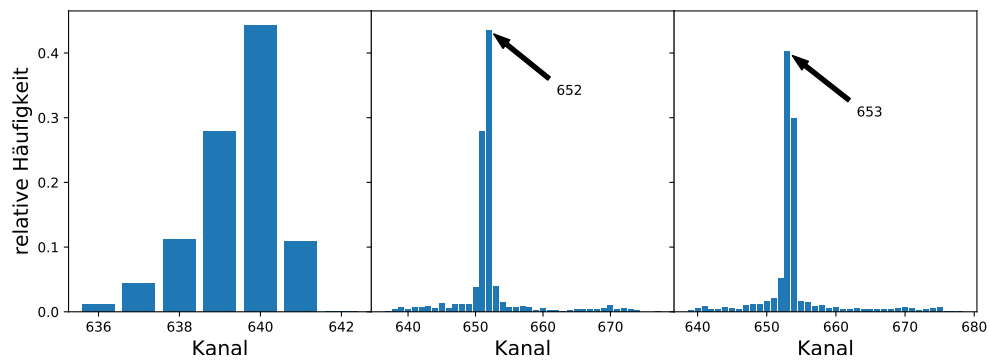


Abbildung B.20: Fenstersegmente Messung 5



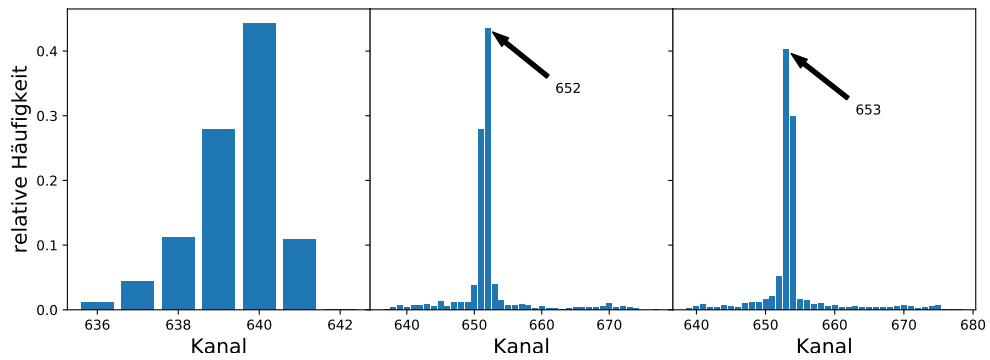


Abbildung B.21: Fenstersegmente Messung 6

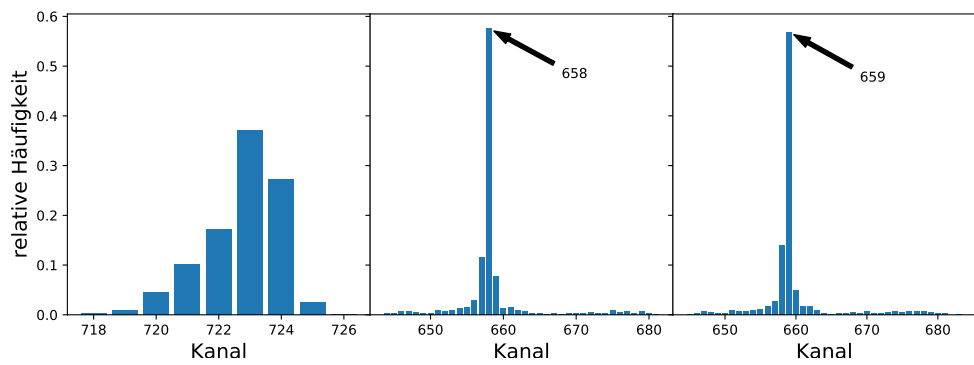


Abbildung B.22: Fenstersegmente Messung 7

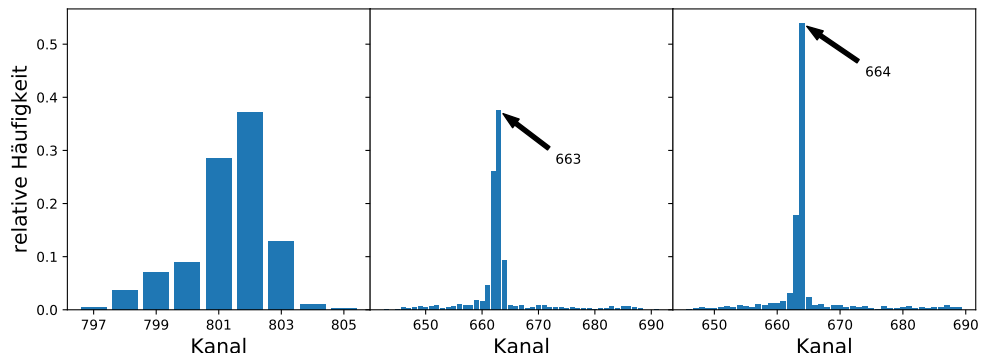


Abbildung B.23: Fenstersegmente Messung 8

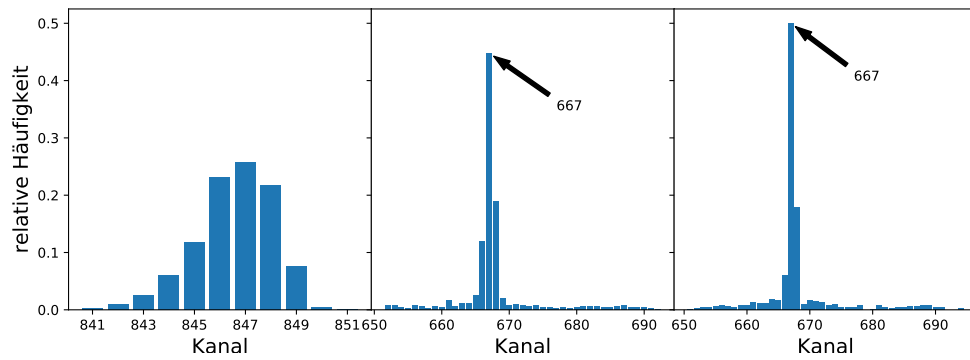


Abbildung B.24: Fenstersegmente Messung 9

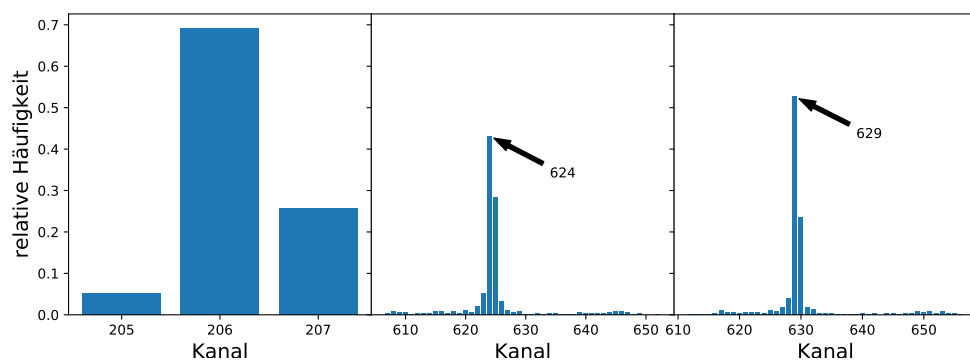


Abbildung B.25: Leisten in horizontaler Orientierung, Nullmessung

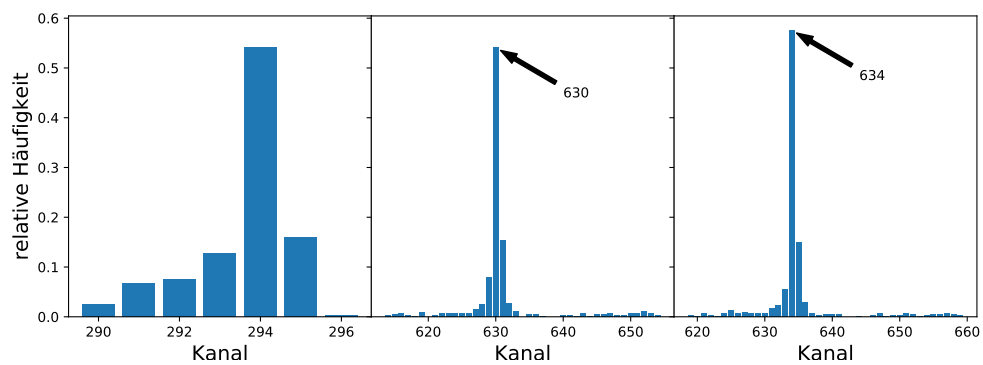


Abbildung B.26: Leisten in horizontaler Orientierung, Messung 2

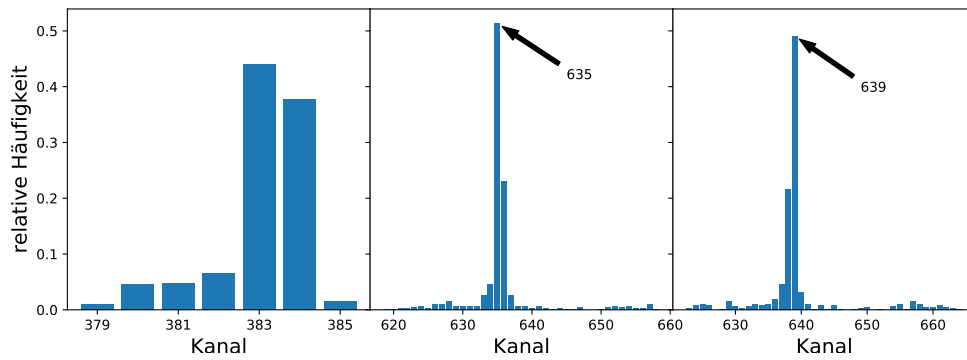


Abbildung B.27: Leisten in horizontaler Orientierung, Messung 2

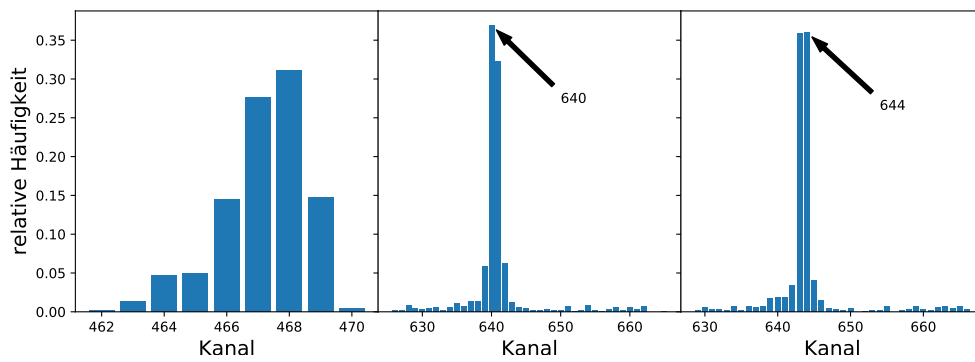


Abbildung B.28: Leisten in horizontaler Orientierung, Messung 3

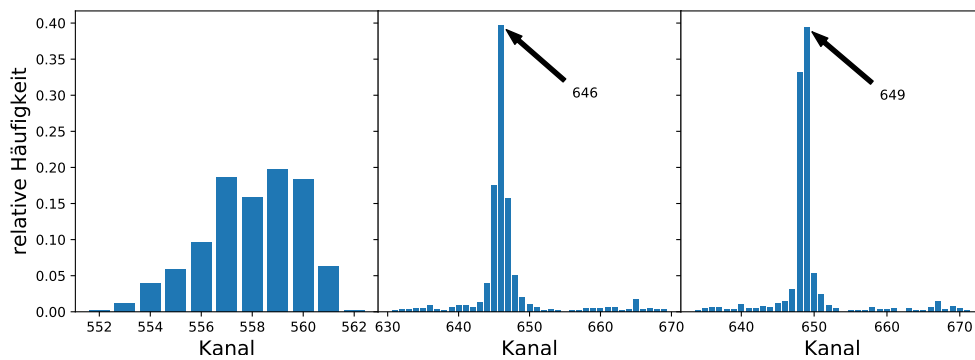


Abbildung B.29: Leisten in horizontaler Orientierung, Messung 4

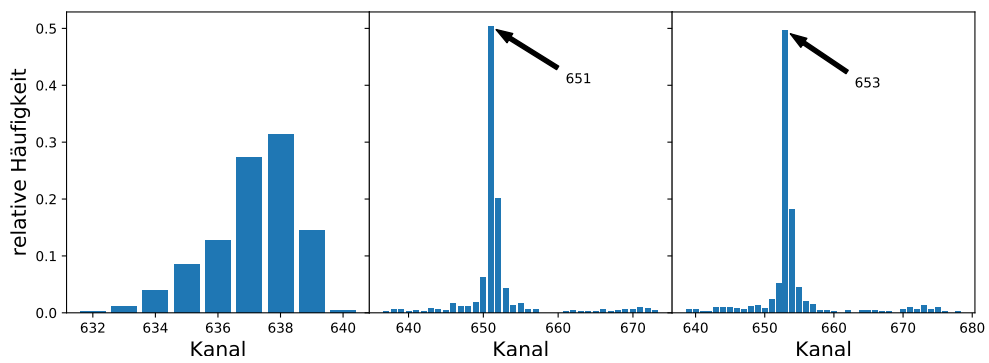


Abbildung B.30: Leisten in horizontaler Orientierung, Messung 5

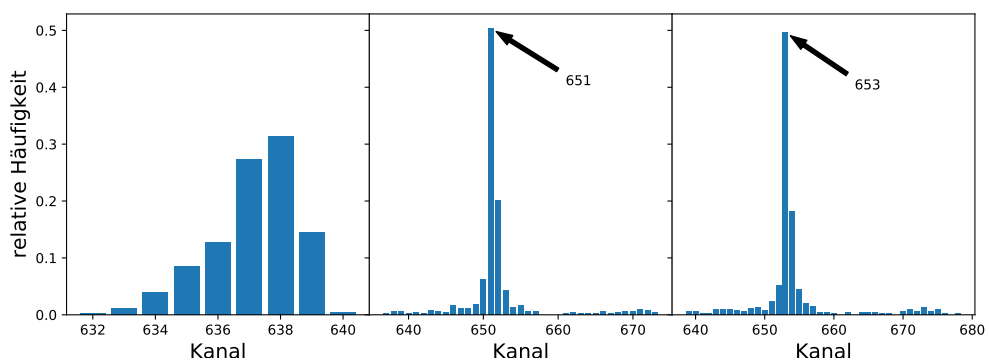


Abbildung B.31: Leisten in horizontaler Orientierung, Messung 6

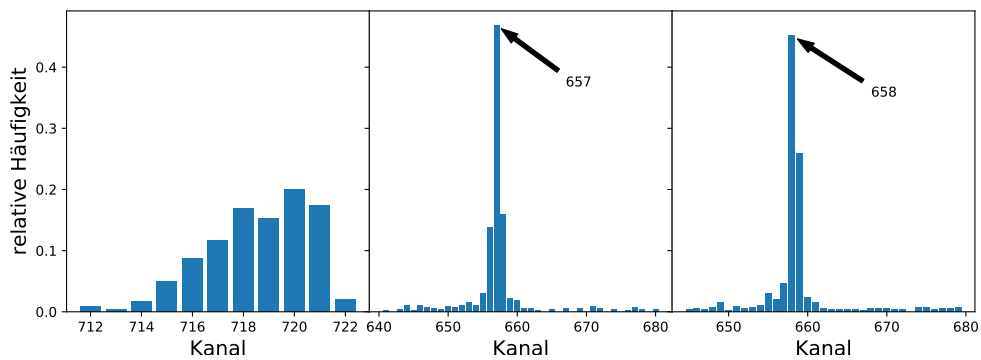


Abbildung B.32: Leisten in horizontaler Orientierung, Messung 7

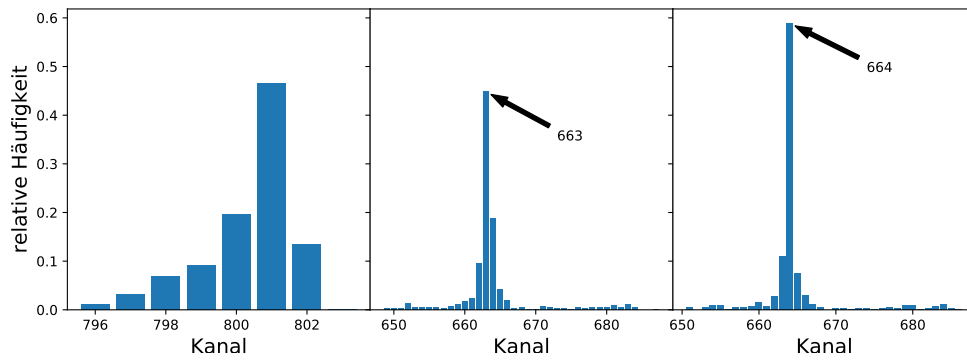


Abbildung B.33: Leisten in horizontaler Orientierung, Messung 8

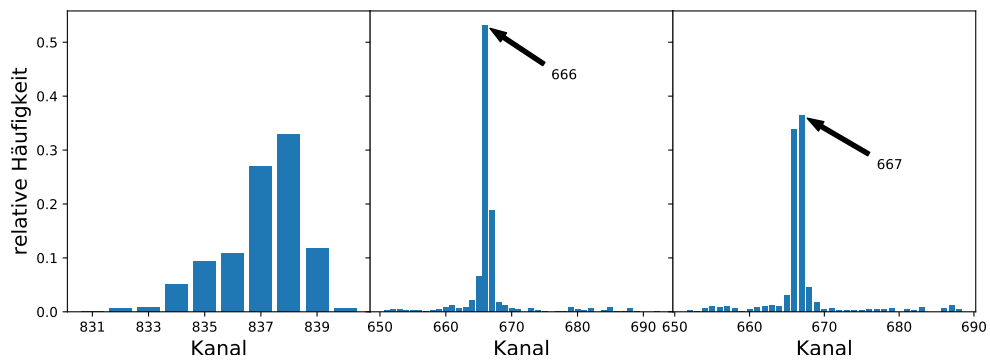


Abbildung B.34: Leisten in horizontaler Orientierung, Messung 9

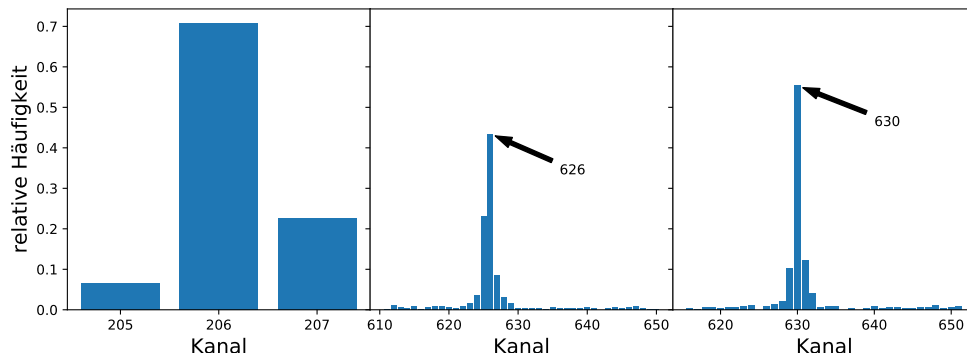


Abbildung B.35: Leisten in vertikaler Orientierung, Nullmessung

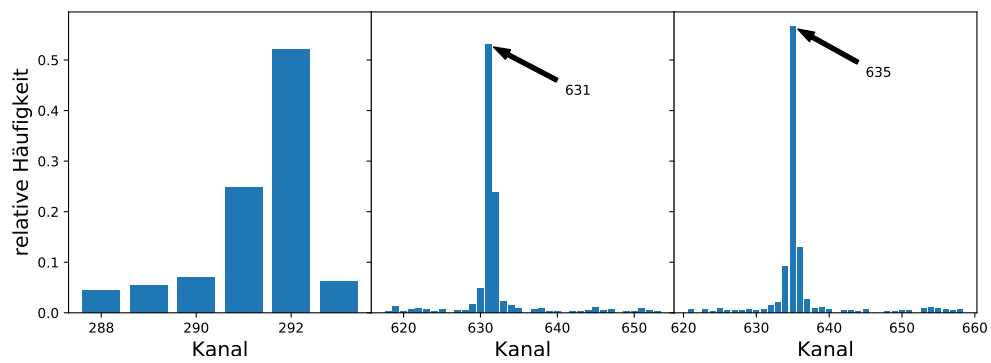


Abbildung B.36: Leisten in vertikaler Orientierung, Messung 2

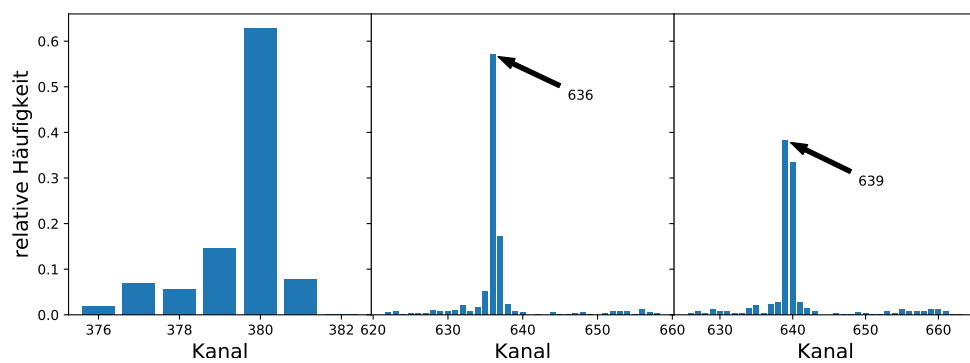


Abbildung B.37: Leisten in vertikaler Orientierung, Messung 2

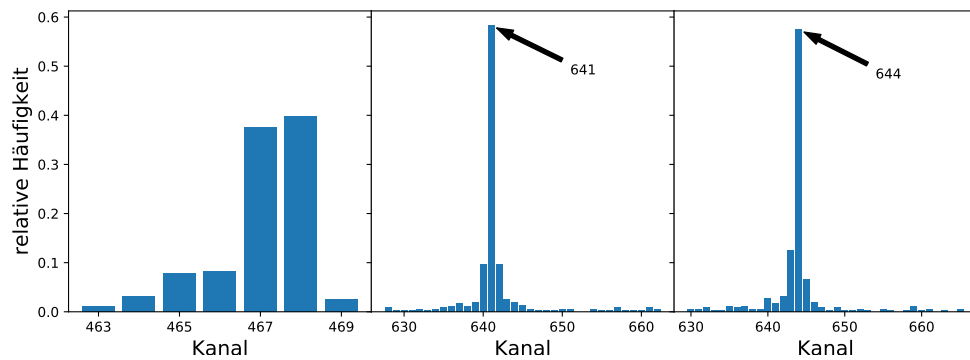


Abbildung B.38: Leisten in vertikaler Orientierung, Messung 3

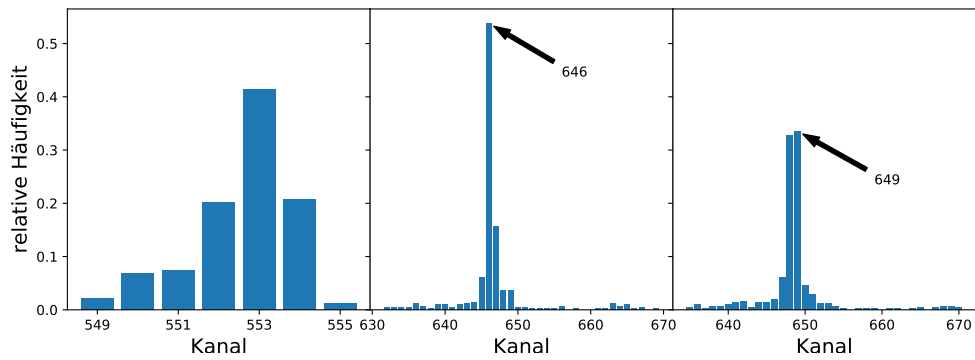


Abbildung B.39: Leisten in vertikaler Orientierung, Messung 4

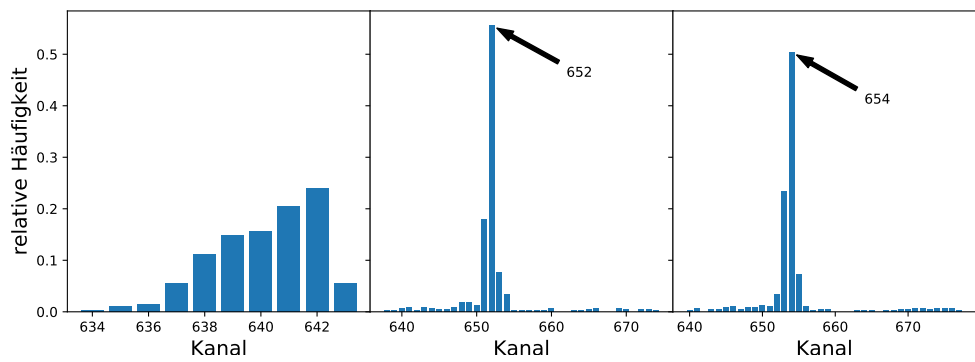


Abbildung B.40: Leisten in vertikaler Orientierung, Messung 5

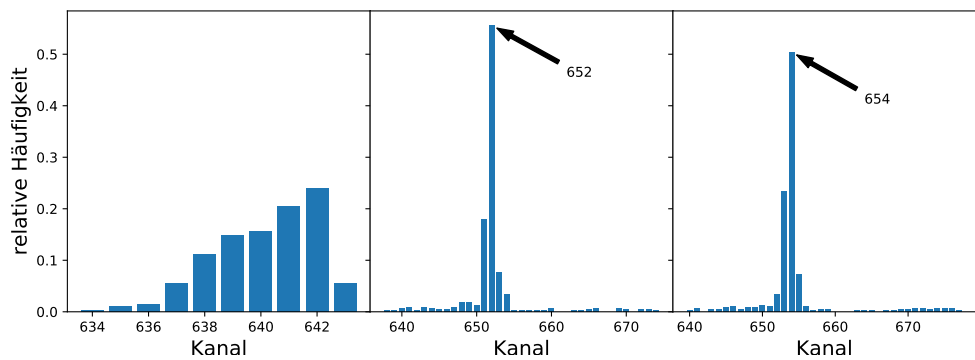


Abbildung B.41: Leisten in vertikaler Orientierung, Messung 6

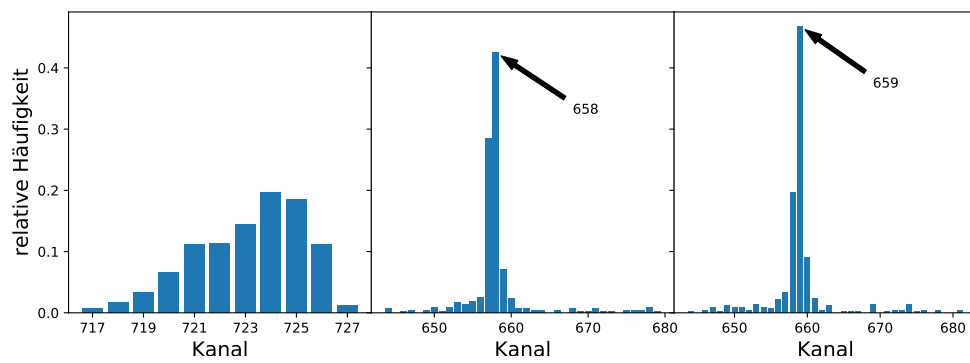


Abbildung B.42: Leisten in vertikaler Orientierung, Messung 7

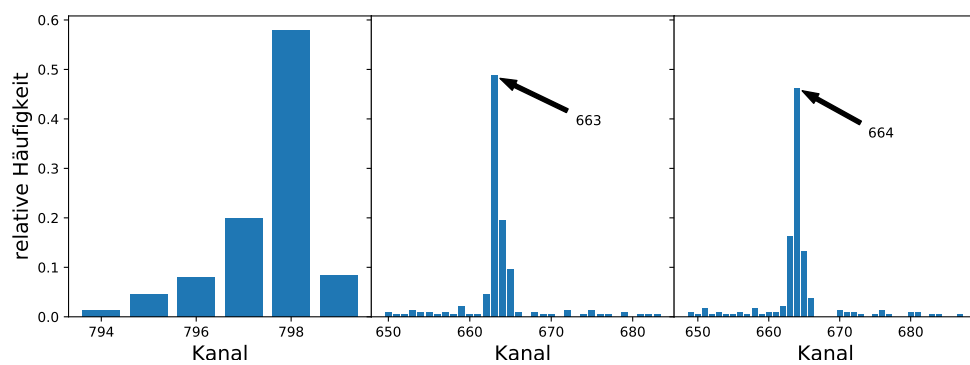


Abbildung B.43: Leisten in vertikaler Orientierung, Messung 8

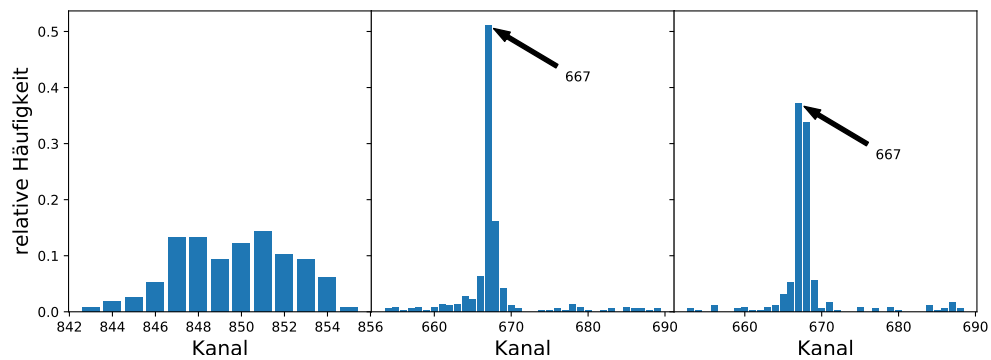


Abbildung B.44: Leisten in vertikaler Orientierung, Messung 9



**Tabelle B.4:** Messwerte des Flussmessgeräts und der beiden Drucksensoren bei der Auswölbungsmessung der Leisten in vertikaler Orientierung.

Messung	Flussmessgerät		Sensor 1		Sensor 2	
	Kanal	Fluss [l/h]	Kanal	$p_{\text{diff}}$ [mbar]	Kanal	$p_{\text{diff}}$ [mbar]
1	206	$0,0 \pm 1,00$	626	$0,0 \pm 0,083$	630	$0,0 \pm 0,083$
2	292	$10,30 \pm 1,00$	631	$0,119 \pm 0,083$	635	$0,119 \pm 0,083$
3	380	$20,84 \pm 1,00$	636	$0,239 \pm 0,083$	639	$0,215 \pm 0,083$
4	468	$31,38 \pm 1,00$	641	$0,359 \pm 0,083$	644	$0,335 \pm 0,083$
5	553	$41,56 \pm 1,00$	646	$0,479 \pm 0,083$	649	$0,455 \pm 0,083$
6	642	$52,23 \pm 1,01$	652	$0,622 \pm 0,083$	654	$0,575 \pm 0,083$
7	724	$62,05 \pm 1,01$	658	$0,766 \pm 0,083$	659	$0,694 \pm 0,083$
8	798	$70,91 \pm 1,01$	663	$0,886 \pm 0,083$	664	$0,814 \pm 0,083$
9	851	$77,26 \pm 1,01$	667	$0,982 \pm 0,083$	667	$0,886 \pm 0,083$

### B.2.2 Gemessene Auslenkungen

**Tabelle B.5:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 2 bei Messung 1.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,04	15	20,11	28	20,11
2	20,01	16	20,12	29	20,13
3	20,04	17	20,11	30	20,11
4	20,03	18	20,07	31	20,07
5	20,08	19	20,1	32	20,08
6	20,12	20	20,1	33	20,09
7	20,11	21	20,07	34	20,11
8	20,14	22	20,11	35	20,11
9	20,13	23	20,14	36	20,1
10	20,16	24	20,11	37	20,15
11	20,16	25	20,09	38	20,11
12	20,15	26	20,14	39	20,17
13	20,15	27	20,13	40	20,16
14	20,1				

**Tabelle B.6:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 2 bei Messung 2.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,06	15	20,08	28	20,09
2	20,07	16	20,07	29	20,1
3	20,05	17	20,03	30	20,07
4	20,01	18	20,08	31	20,05
5	20,01	19	20,08	32	20,04
6	20,05	20	20,10	33	20,05
7	20,09	21	20,02	34	20,05
8	20,06	22	20,06	35	20,05
9	20,15	23	20,09	36	20,04
10	20,15	24	20,09	37	20,05
11	20,17	25	20,02	38	20,11
12	20,17	26	20,06	39	20,09
13	20,11	27	20,07	40	20,09
14	20,08				

**Tabelle B.7:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 2 bei Messung 3.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,07	15	20,01	28	20,03
2	20,04	16	20,00	29	20,06
3	20,08	17	19,97	30	20,05
4	20,02	18	20,03	31	20,02
5	19,99	19	20,06	32	19,98
6	20,04	20	20,09	33	20,04
7	19,97	21	20,00	34	19,97
8	20,04	22	20,06	35	19,99
9	20,13	23	20,02	36	19,98
10	20,17	24	20,05	37	20,04
11	20,14	25	20,02	38	20,04
12	20,13	26	20,02	39	20,06
13	20,08	27	20,02	40	20,07
14	20,00				

**Tabelle B.8:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 2 bei Messung 4.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,06	15	19,98	28	20,0
2	20,06	16	20,01	29	20,06
3	20,01	17	20,00	30	20,06
4	19,97	18	20,04	31	20,05
5	19,92	19	20,08	32	20,01
6	19,95	20	20,14	33	19,99
7	20,00	21	20,07	34	19,97
8	20,01	22	20,04	35	19,96
9	20,09	23	19,95	36	19,99
10	20,16	24	20,04	37	20,00
11	20,16	25	20,00	38	20,09
12	20,14	26	20,00	39	20,07
13	20,05	27	19,98	40	20,11
14	19,95				

**Tabelle B.9:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 2 bei Messung 5.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,06	15	19,89	28	20,00
2	20,04	16	19,88	29	20,04
3	19,97	17	19,93	30	20,02
4	19,94	18	20,02	31	20,03
5	19,95	19	20,06	32	19,97
6	19,94	20	20,08	33	19,96
7	20,01	21	20,06	34	19,98
8	20,10	22	19,98	35	19,98
9	20,10	23	19,95	36	19,93
10	20,14	24	19,89	37	19,96
11	20,13	25	19,87	38	19,97
12	20,08	26	19,92	39	20,02
13	19,99	27	19,93	40	20,10
14	19,92				

**Tabelle B.10:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 2 bei Messung 6.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,10	15	19,87	28	19,91
2	20,03	16	19,88	29	19,95
3	19,98	17	19,89	30	20,06
4	19,93	18	19,97	31	20,04
5	19,84	19	20,01	32	19,95
6	19,89	20	20,13	33	19,95
7	19,95	21	20,04	34	19,89
8	19,98	22	19,96	35	19,91
9	20,02	23	19,91	36	19,90
10	20,15	24	19,9	37	19,97
11	20,18	25	19,83	38	19,97
12	20,06	26	19,90	39	20,01
13	20,02	27	19,91	40	20,14
14	19,96				

**Tabelle B.11:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 2 bei Messung 7.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,05	15	19,86	28	19,90
2	19,98	16	19,84	29	20,08
3	19,87	17	19,87	30	20,02
4	19,84	18	19,90	31	19,95
5	19,84	19	20,07	32	19,93
6	19,87	20	20,07	33	19,88
7	19,94	21	20,03	34	19,85
8	20,03	22	19,99	35	19,84
9	20,05	23	19,83	36	19,93
10	20,20	24	19,80	37	19,91
11	20,18	25	19,83	38	19,95
12	20,06	26	19,84	39	19,99
13	20,04	27	19,86	40	20,09
14	19,89				

**Tabelle B.12:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 2 bei Messung 8.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,02	15	19,7	28	19,81
2	19,95	16	19,71	29	19,94
3	19,85	17	19,76	30	20,02
4	19,76	18	19,86	31	19,96
5	19,73	19	19,98	32	19,85
6	19,75	20	20,11	33	19,79
7	19,78	21	19,98	34	19,74
8	19,89	22	20,00	35	19,71
9	20,08	23	19,80	36	19,72
10	20,16	24	19,76	37	19,77
11	20,12	25	19,71	38	19,85
12	20,07	26	19,72	39	19,93
13	19,95	27	19,72	40	20,07
14	19,79				

**Tabelle B.13:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 2 bei Messung 9.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,05	15	19,67	28	19,82
2	19,93	16	19,65	29	19,9
3	19,82	17	19,74	30	20,00
4	19,74	18	19,86	31	19,96
5	19,64	19	19,99	32	19,83
6	19,68	20	20,08	33	19,81
7	19,77	21	19,97	34	19,72
8	19,86	22	19,86	35	19,72
9	20,03	23	19,75	36	19,70
10	20,13	24	19,71	37	19,70
11	20,11	25	19,74	38	19,85
12	19,98	26	19,69	39	19,93
13	19,83	27	19,77	40	20,05
14	19,74				

**Tabelle B.14:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 3 bei Messung 1.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,14	15	20,17	28	20,17
2	20,19	16	20,20	29	20,28
3	20,21	17	20,24	30	20,26
4	20,21	18	20,21	31	20,16
5	20,23	19	20,27	32	20,19
6	20,22	20	20,29	33	20,22
7	20,21	21	20,12	34	20,20
8	20,25	22	20,13	35	20,23
9	20,31	23	20,15	36	20,23
10	20,32	24	20,18	37	20,29
11	20,16	25	20,19	38	20,28
12	20,18	26	20,21	39	20,26
13	20,18	27	20,23	40	20,22
14	20,2				

**Tabelle B.15:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 3 bei Messung 2.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,14	15	20,18	28	20,28
2	20,16	16	20,21	29	20,24
3	20,16	17	20,21	30	20,30
4	20,19	18	20,29	31	20,19
5	20,17	19	20,29	32	20,19
6	20,16	20	20,31	33	20,18
7	20,18	21	20,14	34	20,16
8	20,27	22	20,17	35	20,17
9	20,29	23	20,16	36	20,18
10	20,29	24	20,15	37	20,19
11	20,17	25	20,17	38	20,17
12	20,17	26	20,18	39	20,18
13	20,17	27	20,21	40	20,17
14	20,18				

**Tabelle B.16:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 3 bei Messung 3.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,15	15	20,13	28	20,19
2	20,18	16	20,15	29	20,21
3	20,15	17	20,18	30	20,22
4	20,13	18	20,18	31	20,17
5	20,11	19	20,23	32	20,18
6	20,19	20	20,10	33	20,16
7	20,23	21	20,08	34	20,17
8	20,22	22	20,12	35	20,14
9	20,29	23	20,12	36	20,13
10	20,31	24	20,13	37	20,14
11	20,16	25	20,12	38	20,12
12	20,14	26	20,15	39	20,17
13	20,14	27	20,20	40	20,09
14	20,15				

**Tabelle B.17:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 3 bei Messung 4.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,14	15	20,08	28	20,22
2	20,18	16	20,1	29	20,26
3	20,10	17	20,17	30	20,23
4	20,10	18	20,19	31	20,17
5	20,10	19	20,30	32	20,13
6	20,09	20	20,31	33	20,14
7	20,10	21	20,12	34	20,10
8	20,19	22	20,13	35	20,10
9	20,28	23	20,15	36	20,09
10	20,31	24	20,11	37	20,11
11	20,16	25	20,09	38	20,13
12	20,13	26	20,11	39	20,16
13	20,08	27	20,13	40	20,15
14	20,09				

**Tabelle B.18:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 3 bei Messung 5.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,16	15	20,05	28	20,15
2	20,15	16	20,07	29	20,17
3	20,11	17	20,07	30	20,28
4	20,05	18	20,17	31	20,19
5	20,07	19	20,28	32	20,11
6	20,08	20	20,31	33	20,10
7	20,14	21	20,12	34	20,11
8	20,21	22	20,08	35	20,10
9	20,27	23	20,06	36	20,14
10	20,34	24	20,04	37	20,13
11	20,13	25	20,05	38	20,18
12	20,09	26	20,07	39	20,12
13	20,05	27	20,11	40	20,12
14	20,10				



**Tabelle B.19:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 3 bei Messung 6.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,17	15	19,99	28	20,04
2	20,14	16	20,03	29	20,17
3	20,08	17	20,09	30	20,23
4	20,04	18	20,14	31	20,23
5	19,98	19	20,21	32	20,13
6	19,98	20	20,30	33	20,04
7	20,03	21	20,10	34	20,03
8	20,13	22	20,06	35	20,01
9	20,19	23	20,05	36	20,01
10	20,30	24	20,05	37	20,01
11	20,17	25	19,99	38	20,07
12	20,14	26	20,02	39	20,11
13	20,04	27	20,04	40	20,15
14	20,0				

**Tabelle B.20:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 3 bei Messung 7.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,15	15	19,96	28	20,05
2	20,11	16	19,96	29	20,15
3	20,01	17	20,05	30	20,20
4	19,95	18	20,13	31	20,14
5	19,97	19	20,19	32	20,07
6	19,96	20	20,24	33	20,02
7	20,01	21	20,02	34	20,00
8	20,10	22	20,05	35	19,95
9	20,20	23	19,98	36	19,95
10	20,32	24	19,93	37	19,99
11	20,19	25	19,98	38	20,03
12	20,14	26	19,95	39	20,07
13	20,06	27	19,98	40	20,14
14	20,01				

**Tabelle B.21:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 3 bei Messung 8.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,15	15	19,85	28	20,00
2	20,08	16	19,89	29	20,10
3	20,00	17	19,94	30	20,18
4	19,92	18	20,05	31	20,14
5	19,84	19	20,19	32	20,03
6	19,85	20	20,29	33	19,97
7	19,89	21	20,06	34	19,90
8	20,06	22	19,97	35	19,88
9	20,18	23	19,95	36	19,84
10	20,31	24	19,94	37	19,96
11	20,18	25	19,86	38	19,97
12	20,12	26	19,86	39	20,03
13	20,02	27	19,95	40	20,19
14	19,88				

**Tabelle B.22:** Gemessene Auslenkungen für Fenstersegment 3 bei Messung 9.

Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]	Loch	Messwert [mm]
1	20,11	15	19,83	28	20,00
2	20,06	16	19,86	29	20,14
3	19,97	17	19,93	30	20,14
4	19,87	18	20,03	31	20,15
5	19,85	19	20,16	32	20,01
6	19,85	20	20,26	33	19,94
7	19,86	21	20,02	34	19,87
8	20,08	22	19,96	35	19,79
9	20,21	23	19,89	36	19,82
10	20,26	24	19,81	37	19,85
11	20,18	25	19,8	38	19,92
12	20,06	26	19,76	39	20,00
13	19,98	27	19,87	40	20,12
14	19,89				

**Tabelle B.23:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Horizontaler Orientierung bei Messung 1

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.84	54.84	54.89	54.93	54.88	54.87	0.0
2	54.71	54.74	54.71	54.75	54.68	54.71	0.0
3	54.67	54.69	54.62	54.61	54.63	54.64	0.0
4	54.62	54.6	54.66	54.61	54.66	54.62	0.0
5	54.54	54.57	54.55	54.58	54.54	54.55	0.0
6	54.63	54.71	54.65	54.63	54.65	54.65	0.0
7	54.8	54.78	54.86	54.89	54.92	54.85	0.0

**Tabelle B.24:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Horizontaler Orientierung bei Messung 2

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.84	54.84	54.82	54.85	54.8	54.83	0.045
2	54.64	54.64	54.62	54.59	54.58	54.61	0.103
3	54.48	54.51	54.49	54.49	54.52	54.49	0.145
4	54.52	54.54	54.54	54.5	54.45	54.51	0.119
5	54.39	54.42	54.42	54.36	54.4	54.39	0.158
6	54.51	54.61	54.66	54.55	54.58	54.58	0.072
7	54.79	54.72	54.77	54.67	54.75	54.73	0.110

**Tabelle B.25:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Horizontaler Orientierung bei Messung 3

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.77	54.82	54.84	54.79	54.8	54.80	0.072
2	54.54	54.56	54.59	54.57	54.52	54.55	0.161
3	54.4	54.42	54.46	54.38	54.39	54.41	0.233
4	54.34	54.31	54.37	54.41	54.42	54.37	0.259
5	54.41	54.36	54.38	54.37	54.34	54.37	0.184
6	54.51	54.56	54.58	54.58	54.53	54.55	0.101
7	54.82	54.86	54.89	54.87	54.81	54.85	0.0

**Tabelle B.26:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Horizontaler Orientierung bei Messung 4

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.79	54.8	54.84	54.81	54.77	54.80	0.073
2	54.45	54.43	54.47	54.48	54.47	54.45	0.258
3	54.32	54.35	54.37	54.29	54.33	54.33	0.311
4	54.25	54.31	54.27	54.26	54.24	54.26	0.363
5	54.31	54.24	54.26	54.25	54.31	54.27	0.282
6	54.41	54.46	54.43	54.4	54.44	54.42	0.225
7	54.78	54.85	54.86	54.83	54.8	54.82	0.026

**Tabelle B.27:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Horizontaler Orientierung bei Messung 5

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.76	54.74	54.75	54.77	54.78	54.76	0.115
2	54.42	54.39	54.33	54.41	54.44	54.39	0.319
3	54.22	54.22	54.24	54.22	54.24	54.22	0.415
4	54.21	54.24	54.21	54.18	54.24	54.21	0.414
5	54.15	54.16	54.1	54.14	54.12	54.13	0.422
6	54.33	54.37	54.42	54.4	54.37	54.37	0.275
7	54.71	54.8	54.73	54.72	54.68	54.72	0.122

**Tabelle B.28:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Horizontaler Orientierung bei Messung 6

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.73	54.71	54.73	54.77	54.73	54.73	0.141
2	54.39	54.34	54.36	54.36	54.36	54.36	0.355
3	54.14	54.08	54.14	54.09	54.1	54.11	0.533
4	54.08	54.04	54.05	54.04	54.06	54.05	0.576
5	54.07	54.08	54.06	54.03	54.07	54.06	0.494
6	54.39	54.35	54.33	54.35	54.34	54.35	0.301
7	54.72	54.79	54.81	54.68	54.75	54.75	0.100

**Tabelle B.29:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Horizontaler Orientierung bei Messung 7

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.68	54.68	54.73	54.73	54.74	54.71	0.163
2	54.37	54.31	54.25	54.27	54.28	54.29	0.421
3	54.04	54.01	53.91	53.94	53.93	53.96	0.677
4	53.87	53.88	53.96	53.89	53.82	53.88	0.745
5	53.94	53.9	53.94	53.92	53.98	53.93	0.620
6	54.28	54.33	54.31	54.29	54.28	54.29	0.355
7	54.78	54.75	54.81	54.79	54.77	54.77	0.070

**Tabelle B.30:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Horizontaler Orientierung bei Messung 8

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.67	54.67	54.66	54.66	54.71	54.67	0.201
2	54.15	54.13	54.17	54.18	54.21	54.16	0.550
3	53.83	53.88	53.83	53.85	53.8	53.83	0.805
4	53.68	53.71	53.68	53.71	53.67	53.69	0.939
5	53.71	53.78	53.78	53.74	53.76	53.75	0.801
6	54.18	54.14	54.15	54.21	54.21	54.17	0.475
7	54.76	54.84	54.73	54.77	54.71	54.76	0.088

**Tabelle B.31:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Horizontaler Orientierung bei Messung 9

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.65	54.67	54.61	54.64	54.66	54.64	0.229
2	54.12	54.06	54.09	54.08	54.12	54.09	0.623
3	53.76	53.7	53.72	53.72	53.69	53.71	0.925
4	53.68	53.65	53.61	53.65	53.6	53.63	0.991
5	53.74	53.72	53.68	53.76	53.64	53.70	0.847
6	54.1	54.11	54.16	54.14	54.15	54.13	0.522
7	54.76	54.79	54.81	54.73	54.76	54.77	0.079

**Tabelle B.32:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Vertikaler Orientierung bei Messung 1

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.95	54.93	54.94	54.94	54.96	54.94	0.0
2	54.87	54.86	54.84	54.93	54.86	54.87	0.0
3	54.77	54.72	54.68	54.68	54.7	54.71	0.0
4	54.66	54.68	54.73	54.66	54.73	54.69	0.0
5	54.52	54.49	54.55	54.52	54.53	54.52	0.0
6	54.78	54.79	54.79	54.82	54.78	54.79	0.0
7	55.05	55.01	55.04	55.02	54.98	55.02	0.0

**Tabelle B.33:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Vertikaler Orientierung bei Messung 2

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.95	54.91	54.91	54.92	54.92	54.92	0.021
2	54.82	54.87	54.79	54.82	54.76	54.81	0.060
3	54.52	54.55	54.54	54.57	54.51	54.53	0.172
4	54.5	54.53	54.58	54.53	54.51	54.53	0.161
5	54.48	54.45	54.42	54.42	54.4	54.43	0.088
6	54.72	54.74	54.71	54.7	54.72	54.71	0.073
7	54.89	54.85	54.83	54.86	54.89	54.86	0.156

**Tabelle B.34:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Vertikaler Orientierung bei Messung 3

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.9	54.89	54.87	54.89	54.89	54.88	0.055
2	54.71	54.71	54.79	54.73	54.73	54.73	0.137
3	54.46	54.46	54.46	54.41	54.44	54.44	0.263
4	54.49	54.51	54.48	54.48	54.51	54.49	0.198
5	54.46	54.5	54.35	54.41	54.42	54.42	0.094
6	54.67	54.72	54.7	54.68	54.7	54.69	0.097
7	54.93	54.92	54.91	54.91	54.96	54.92	0.094

**Tabelle B.35:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Vertikaler Orientierung bei Messung 4

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.9	54.88	54.84	54.87	54.83	54.86	0.079
2	54.62	54.63	54.66	54.66	54.65	54.64	0.228
3	54.32	54.37	54.33	54.35	54.37	54.34	0.362
4	54.34	54.36	54.31	54.33	54.32	54.33	0.359
5	54.25	54.25	54.25	54.28	54.25	54.25	0.266
6	54.57	54.54	54.61	54.56	54.56	54.56	0.223
7	54.96	54.85	54.85	54.86	54.84	54.87	0.148

**Tabelle B.36:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Vertikaler Orientierung bei Messung 5

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.82	54.85	54.81	54.74	54.75	54.79	0.149
2	54.6	54.57	54.53	54.53	54.53	54.55	0.320
3	54.3	54.26	54.22	54.23	54.24	54.25	0.460
4	54.19	54.21	54.22	54.25	54.16	54.20	0.485
5	54.11	54.14	54.07	54.12	54.14	54.11	0.406
6	54.53	54.52	54.55	54.45	54.54	54.51	0.273
7	54.84	54.88	54.83	54.85	54.88	54.85	0.163

**Tabelle B.37:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Vertikaler Orientierung bei Messung 6

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.85	54.85	54.83	54.81	54.83	54.83	0.109
2	54.48	54.46	54.45	54.45	54.49	54.46	0.406
3	54.04	54.03	54.02	54.04	54.04	54.03	0.675
4	54.02	54.05	54.04	54.04	54.02	54.03	0.658
5	53.99	53.97	53.98	54.02	53.96	53.98	0.538
6	54.44	54.4	54.45	54.42	54.44	54.43	0.361
7	54.81	54.83	54.8	54.82	54.82	54.81	0.204

**Tabelle B.38:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Vertikaler Orientierung bei Messung 7

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.7	54.78	54.85	54.77	54.77	54.77	0.169
2	54.37	54.35	54.37	54.37	54.39	54.37	0.501
3	53.87	53.9	53.94	53.89	53.92	53.90	0.806
4	53.87	53.87	53.88	53.85	53.88	53.87	0.821
5	53.83	53.78	53.82	53.81	53.83	53.81	0.708
6	54.43	54.31	54.3	54.27	54.33	54.32	0.463
7	54.85	54.76	54.81	54.83	54.81	54.81	0.208

**Tabelle B.39:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Vertikaler Orientierung bei Messung 8

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.83	54.8	54.84	54.84	54.77	54.81	0.128
2	54.37	54.33	54.27	54.31	54.28	54.31	0.560
3	53.76	53.8	53.78	53.79	53.8	53.78	0.923
4	53.73	53.73	53.7	53.74	53.72	53.72	0.967
5	53.75	53.7	53.7	53.7	53.72	53.71	0.807
6	54.24	54.29	54.25	54.25	54.24	54.25	0.537
7	54.81	54.78	54.83	54.8	54.77	54.79	0.222

**Tabelle B.40:** Messwerte der Abstandsmessung an den Carbon-Leisten in Vertikaler Orientierung bei Messung 9

Messpunkt	Messwert [mm]					Mittelwert [mm]	
	1	2	3	4	5	Vor	Nach Abzug der Nullmessung
1	54.78	54.73	54.72	54.75	54.74	54.74	0.200
2	54.27	54.3	54.25	54.27	54.27	54.27	0.599
3	53.69	53.71	53.73	53.67	53.74	53.70	1.001
4	53.56	53.6	53.63	53.63	53.57	53.59	1.093
5	53.61	53.63	53.6	53.62	53.62	53.61	0.906
6	54.28	54.12	54.17	54.12	54.14	54.16	0.625
7	54.75	54.73	54.75	54.7	54.66	54.71	0.301



## B.2.3 Parabelfits

**Tabelle B.41:** Werte der Parabelfits der Auswoelbungsmessung der Diagonalen von Fenstersegment 2.

Messung	Maximum	Parabelfit		
		A [1/mm]	B [ ]	C [mm]
1	$0,00 \pm 0,12$	$(-3,65 \pm 0,00) \cdot 10^{-173}$	$(-1,56 \pm 0,00) \cdot 10^{-171}$	$(6,47 \pm 0,00) \cdot 10^{-170}$
2	$0,08 \pm 0,12$	$(-1,12 \pm 0,31) \cdot 10^{-5}$	$(2,37 \pm 1,35) \cdot 10^{-4}$	$(4,42 \pm 0,99) \cdot 10^{-2}$
3	$0,14 \pm 0,12$	$(-1,93 \pm 4,43) \cdot 10^{-55}$	$(2,71 \pm 1,88) \cdot 10^{-4}$	$0,09 \pm 0,01$
4	$0,17 \pm 0,12$	$(-2,79 \pm 0,40) \cdot 10^{-5}$	$(1,24 \pm 1,74) \cdot 10^{-4}$	$0,12 \pm 0,01$
5	$0,24 \pm 0,12$	$(-3,02 \pm 0,54) \cdot 10^{-5}$	$(-2,16 \pm 23,3) \cdot 10^{-5}$	$0,16 \pm 0,01$
6	$0,24 \pm 0,12$	$(-4,12 \pm 0,43) \cdot 10^{-5}$	$(-4,12 \pm 0,43) \cdot 10^{-5}$	$(3,97 \pm 1,86) \cdot 10^{-4}$
7	$0,28 \pm 0,12$	$(-4,58 \pm 0,35) \cdot 10^{-5}$	$(3,24 \pm 15,21) \cdot 10^{-5}$	$(0,23 \pm 0,01$
8	$0,41 \pm 0,12$	$(-6,60 \pm 0,49) \cdot 10^{-5}$	$(4,50 \pm 20,86) \cdot 10^{-4}$	$0,35 \pm 0,015$
9	$0,47 \pm 0,12$	$(-7,22 \pm 0,53) \cdot 10^{-5}$	$(-4,14 \pm 22,75) \cdot 10^{-5}$	$0,40 \pm 0,01$

**Tabelle B.42:** Werte der Parabelfits der Auswoelbungsmessung der Senkrechten von Fenstersegment 2.

Messung	Maximum	Parabelfit]		
		A [1/mm]	B [ ]	C [mm]
1	$0,0 \pm 0,12$	$(-5,66 \pm 0,00) \cdot 10^{-168}$	$(-7,44 \pm 0,00) \cdot 10^{-166}$	$(-1,97 \pm 0,00) \cdot 10^{-165}$
2	$0,09 \pm 0,12$	$(-5,75 \pm 5,12) \cdot 10^{-6}$	$(-2,29 \pm 1,54) \cdot 10^{-4}$	$0,06 \pm 0,00$
3	$0,14 \pm 0,12$	$(-1,36 \pm 0,56) \cdot 10^{-6}$	$(-9,93 \pm 17,00) \cdot 10^{-5}$	$0,10 \pm 0,00$
4	$0,19 \pm 0,12$	$(-3,43 \pm 0,82) \cdot 10^{-5}$	$(6,87 \pm 24,70) \cdot 10^{-5}$	$0,13 \pm 0,01$
5	$0,21 \pm 0,12$	$(-4,80 \pm 0,73) \cdot 10^{-5}$	$(-1,90 \pm 2,20) \cdot 10^{-4}$	$0,19 \pm 0,01$
6	$0,26 \pm 0,12$	$(-6,39 \pm 0,69) \cdot 10^{-5}$	$(6,36 \pm 20,84) \cdot 10^{-5}$	$0,23 \pm 0,01$
7	$0,31 \pm 0,12$	$(-6,96 \pm 1,09) \cdot 10^{-5}$	$(7,61 \pm 33,00) \cdot 10^{-6}$	$0,27 \pm 0,01$
8	$0,42 \pm 0,12$	$(-1,10 \pm 0,00) \cdot 10^{-4}$	$(2,24 \pm 2,12) \cdot 10^{-4}$	$0,40 \pm 0,01$
9	$0,44 \pm 0,12$	$(-1,05 \pm 0,00) \cdot 10^{-4}$	$(-1,50 \pm 2,4) \cdot 10^{-4}$	$0,41 \pm 0,01$

**Tabelle B.43:** Werte der Parabelfits der Auswoelbungsmessungder Diagonalen von Fenstersegment 3.

Messung	Maximum	Parabelfit]		
		A [1/mm]	B [ ]	C [mm]
1	$0,0 \pm 0,12$	$(-3,6 \pm 0,0) \cdot 10^{-173}$	$(-1,5 \pm 0,0) \cdot 10^{-171}$	$(6,4 \pm 0,0) \cdot 10^{-170}$
2	$0,05 \pm 0,12$	$(-3,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-6}$	$-1,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-6}$	$0,019 \pm 0,011$
3	$0,18 \pm 0,12$	$(-1,8 \pm 5,1) \cdot 10^{-6}$	$2,5 \pm 2,1) \cdot 10^{-6}$	$0,047 \pm 0,016$
4	$0,12 \pm 0,12$	$(-2,16 \pm 0,28) \cdot 10^{-5}$	$(-2,29 \pm 1,19) \cdot 10^{-4}$	$0,11 \pm 0,00$
5	$0,16 \pm 0,12$	$(-2,58 \pm 0,33) \cdot 10^{-5}$	$(-3,55 \pm 1,41) \cdot 10^{-4}$	$0,13 \pm 0,01$
6	$0,25 \pm 0,12$	$(-3,72 \pm 0,33) \cdot 10^{-5}$	$(9,72 \pm 14,27) \cdot 10^{-5}$	$0,20 \pm 0,01$
7	$0,26 \pm 0,12$	$(-4,19 \pm 0,38) \cdot 10^{-5}$	$(1,26 \pm 1,63) \cdot 10^{-4}$	$0,23 \pm 0,01$
8	$0,39 \pm 0,12$	$(-6,23 \pm 0,39) \cdot 10^{-5}$	$(9,72 \pm 16,91) \cdot 10^{-5}$	$0,33 \pm 0,012$
9	$0,37 \pm 0,12$	$(-5,965 \pm 0,40) \cdot 10^{-5}$	$1,81 \pm 17,05) \cdot 10^{-6}$	$0,34 \pm 0,01$

**Tabelle B.44:** Werte der Parabelfits der Auswoelbungsmessungder Senkrechten von Fenstersegment 3.

Messung	Maximum	Parabelfit]		
		A [1/mm]	B [ ]	C [mm]
1	$0,0 \pm 0,12$	$(-5,66 \pm 0,00) \cdot 10^{-168}$	$(-7,44 \pm 0,00) \cdot 10^{-166}$	$(-1,97 \pm 0,00) \cdot 10^{-165}$
2	$0,10 \pm 0,12$	$(-1,76 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$	$(-4,94 \pm 3,17) \cdot 10^{-4}$	$0,04 \pm 0,01$
3	$0,16 \pm 0,12$	$(-9,76 \pm 9,76) \cdot 10^{-6}$	$(-6,60 \pm 2,93) \cdot 10^{-4}$	$0,07 \pm 0,01$
4	$0,17 \pm 0,12$	$(-3,35 \pm 1,11) \cdot 10^{-5}$	$(-3,43 \pm 3,35) \cdot 10^{-4}$	$0,10 \pm 0,01$
5	$0,16 \pm 0,12$	$(-3,74 \pm 0,83) \cdot 10^{-5}$	$(-4,66 \pm 2,52) \cdot 10^{-4}$	$0,13 \pm 0,01$
6	$0,27 \pm 0,12$	$(-6,91 \pm 0,93) \cdot 10^{-5}$	$(-4,27 \pm 2,81) \cdot 10^{-4}$	$0,21 \pm 0,01$
7	$0,30 \pm 0,12$	$(-7,03 \pm 0,81) \cdot 10^{-5}$	$(-0,455 \pm 2,44) \cdot 10^{-4}$	$0,26 \pm 0,01$
8	$0,39 \pm 0,12$	$(-9,98 \pm 0,87) \cdot 10^{-5}$	$(-1,78 \pm 2,64) \cdot 10^{-4}$	$0,33 \pm 0,01$
9	$0,44 \pm 0,12$	$(-1,18 \pm 0,10) \cdot 10^{-4}$	$(-6,40 \pm 3,20) \cdot 10^{-4}$	$0,40 \pm 0,01$

**Tabelle B.45:** Werte der Parabelfits der Auswoelbungsmessungder Carbon-Leisten in horizontaler Orientierung.

Messung	Maximum	Parabelfit]		
		A [1/mm]	B [ ]	C [mm]
1	$0,0 \pm 0,09$	$(-1,29 \pm 0,00) \cdot 10^{-167}$	$(-3,55 \pm 0,00) \cdot 10^{-166}$	$(7,96 \pm 0,00) \cdot 10^{-167}$
2	$0,15 \pm 0,09$	$(-5,05 \pm 2,42) \cdot 10^{-5}$	$4,16 \pm 05,03) \cdot 10^{-4}$	$0,13 \pm 0,01$
3	$0,25 \pm 0,09$	$(-1,59 \pm 0,13) \cdot 10^{-4}$	$(-1,14 \pm 2,84) \cdot 10^{-4}$	$0,23 \pm 0,01$
4	$0,36 \pm 0,09$	$(-2,26 \pm 0,17) \cdot 10^{-4}$	$(-7,08 \pm 3,69) \cdot 10^{-4}$	$0,35 \pm 0,01$
5	$0,42 \pm 0,09$	$(-2,46 \pm 0,16) \cdot 10^{-4}$	$(-1,90 \pm 3,48) \cdot 10^{-4}$	$0,43 \pm 0,012$
6	$0,57 \pm 0,09$	$(-3,45 \pm 0,20) \cdot 10^{-4}$	$(-8,15 \pm 4,21) \cdot 10^{-4}$	$0,55 \pm 0,01$
7	$0,74 \pm 0,09$	$(-4,71 \pm 0,32) \cdot 10^{-4}$	$(-1,40 \pm 6,69) \cdot 10^{-4}$	$0,70 \pm 0,024$
8	$0,93 \pm 0,09$	$(-5,89 \pm 0,30) \cdot 10^{-4}$	$(-1,47 \pm 0,63) \cdot 10^{-3}$	$0,89 \pm 0,02$
9	$0,99 \pm 0,09$	$(-6,39 \pm 0,20) \cdot 10^{-4}$	$(-2,114,32) \cdot 10^{-4}$	$0,97 \pm 0,013$

**Tabelle B.46:** Werte der Parabelfits der Auswoelbungsmessung der Carbon-Leisten in vertikaler Orientierung.

Messung	Maximum	Parabelfit]		
		A [1/mm]	B [ ]	C [mm]
1	$0,00 \pm 0,09$	$(-1,29 \pm 0,00) \cdot 10^{-167}$	$(-3,55 \pm 0,00) \cdot 10^{-166}$	$(7,96 \pm 0,00) \cdot 10^{-165}$
2	$0,17 \pm 0,09$	$(-4,44 \pm 4,28) \cdot 10^{-5}$	$(1,02 \pm 0,89) \cdot 10^{-3}$	$0,13 \pm 0,03$
3	$0,26 \pm 0,09$	$(-9,22 \pm 4,80) \cdot 10^{-5}$	$(-4,04 \pm 9,99) \cdot 10^{-4}$	$0,18 \pm 0,03$
4	$0,36 \pm 0,09$	$(-1,80 \pm 0,32) \cdot 10^{-4}$	$(2,97 \pm 6,71) \cdot 10^{-4}$	$0,34 \pm 0,02$
5	$0,48 \pm 0,09$	$(-2,46 \pm 0,24) \cdot 10^{-4}$	$(-3,09 \pm 5,16) \cdot 10^{-4}$	$0,46 \pm 0,01$
6	$0,67 \pm 0,09$	$(-3,89 \pm 0,52) \cdot 10^{-4}$	$(1,66 \pm 10,81) \cdot 10^{-4}$	$0,64 \pm 0,03$
7	$0,82 \pm 0,09$	$(-4,91 \pm 0,40) \cdot 10^{-4}$	$(-1,79 \pm 8,35) \cdot 10^{-4}$	$0,80 \pm 0,03$
8	$0,96 \pm 0,09$	$(-6,05 \pm 0,48) \cdot 10^{-4}$	$(3,62 \pm 10,06) \cdot 10^{-4}$	$0,94 \pm 0,03$
9	$1,09 \pm 0,09$	$(-6,27 \pm 0,54) \cdot 10^{-4}$	$(7,79 \pm 01,12) \cdot 10^{-4}$	$1,03 \pm 0,04$

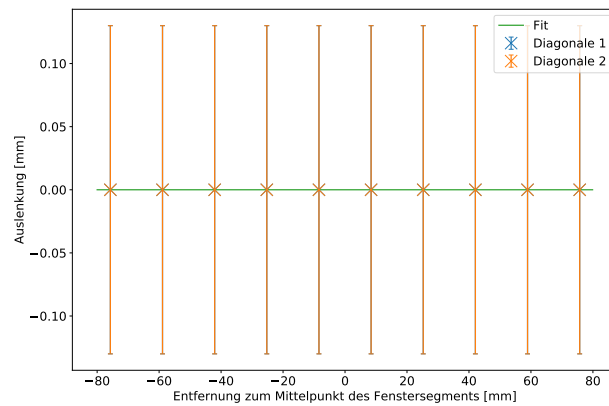


Abbildung B.45: Fenstersegment 2, Diagonal, Fluss 1

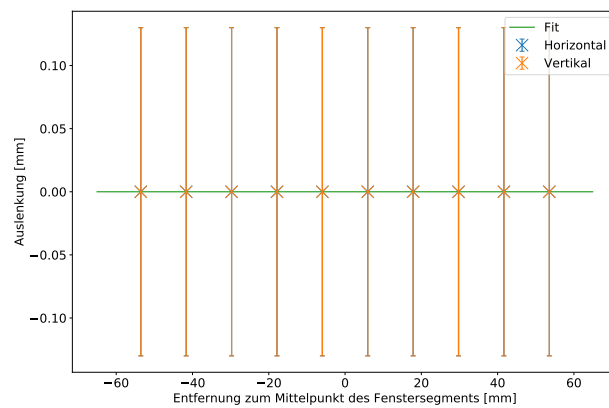


Abbildung B.46: Fenstersegment 2, Senkrecht, Fluss 1

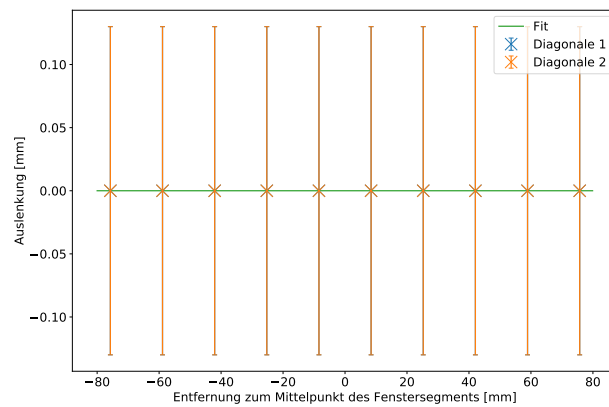


Abbildung B.47: Fenstersegment 3, Diagonal, Fluss 1

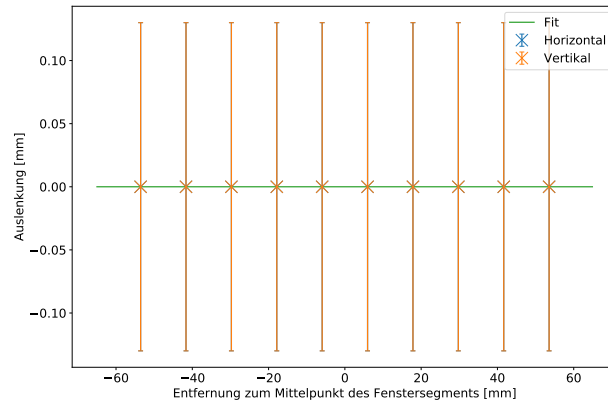


Abbildung B.48: Fenstersegment 3, Senkrecht, Fluss 1

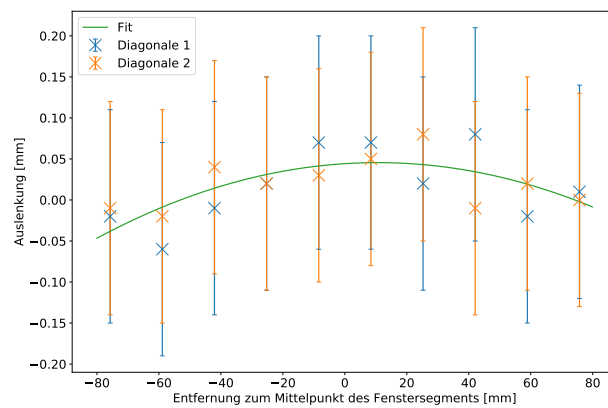


Abbildung B.49: Fenstersegment 2, Diagonal, Fluss 2

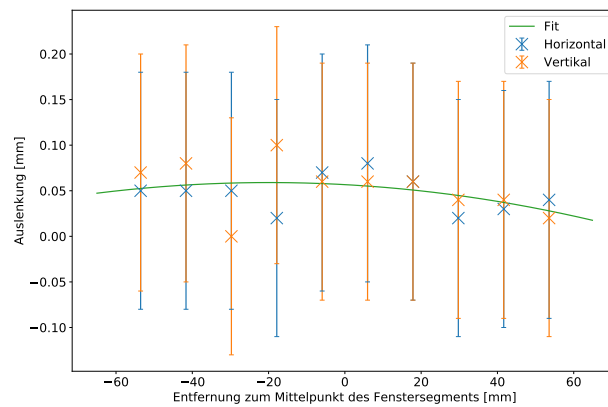


Abbildung B.50: Fenstersegment 2, Senkrecht, Fluss 2

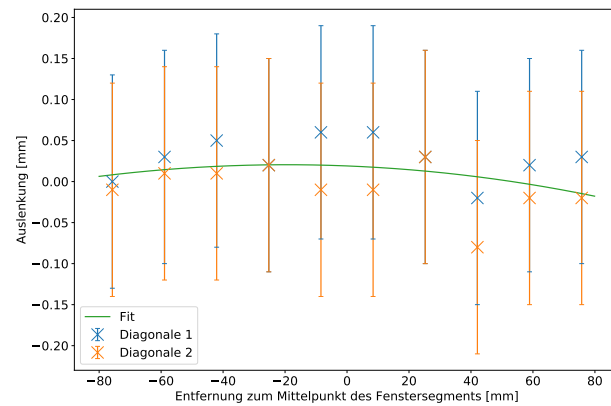


Abbildung B.51: Fenstersegment 3, Diagonal, Fluss 2

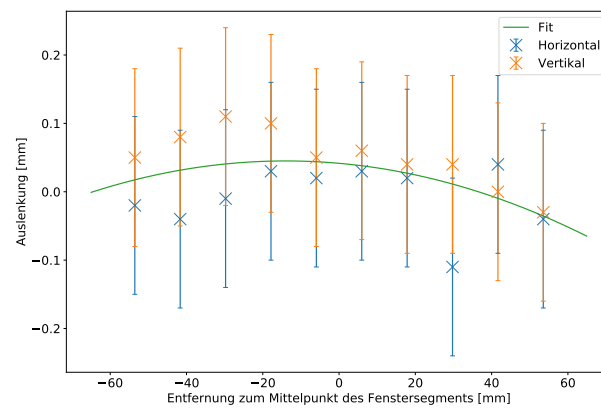


Abbildung B.52: Fenstersegment 3, Senkrecht, Fluss 2

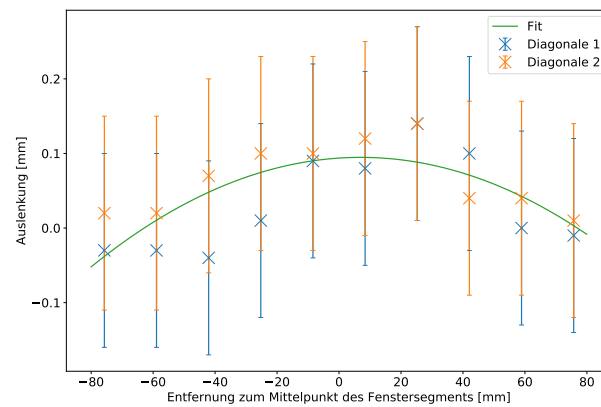


Abbildung B.53: Fenstersegment 2, Diagonal, Fluss 3

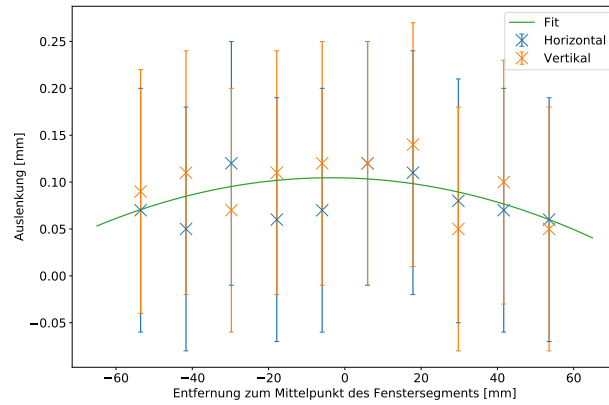


Abbildung B.54: Fenstersegment 2, Senkrecht, Fluss 3

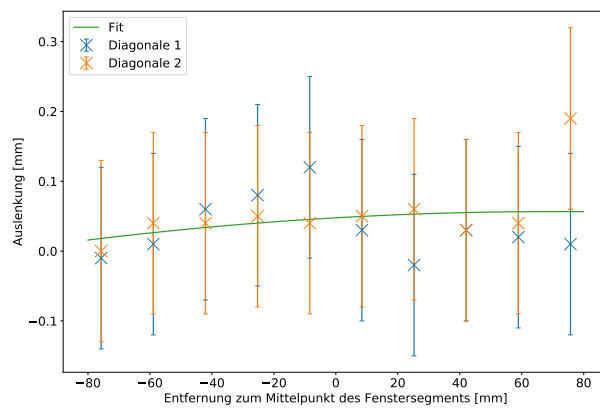


Abbildung B.55: Fenstersegment 3, Diagonal, Fluss 3

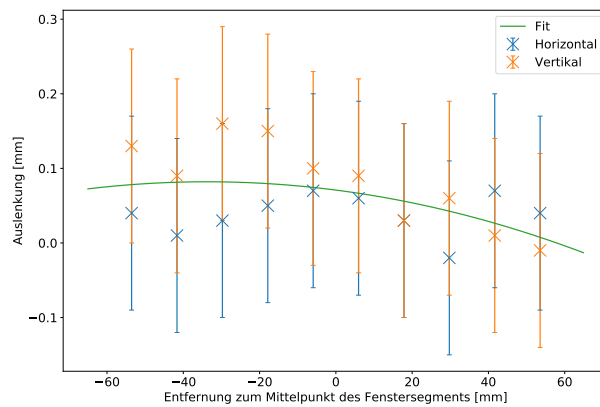


Abbildung B.56: Fenstersegment 3, Senkrecht, Fluss 3

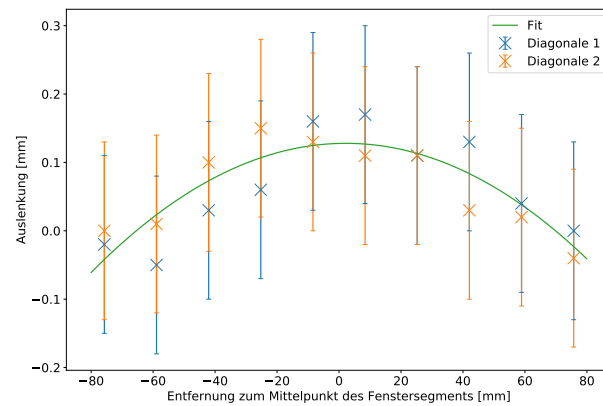


Abbildung B.57: Fenstersegment 2, Diagonal, Fluss 4

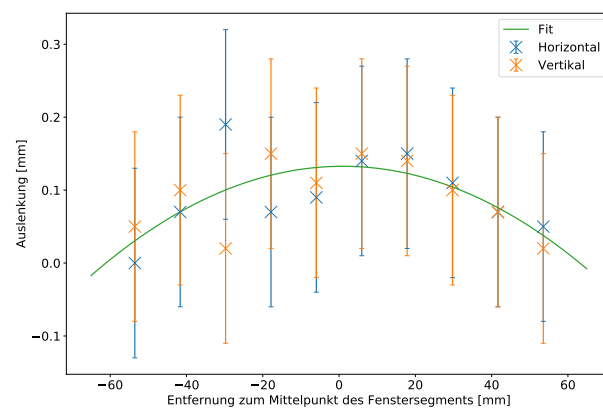


Abbildung B.58: Fenstersegment 2, Senkrecht, Fluss 4

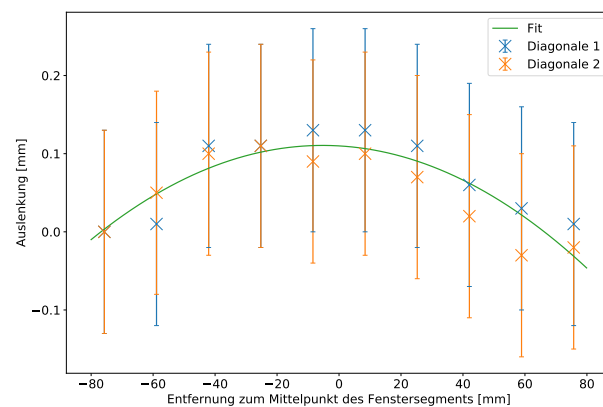


Abbildung B.59: Fenstersegment 3, Diagonal, Fluss 4



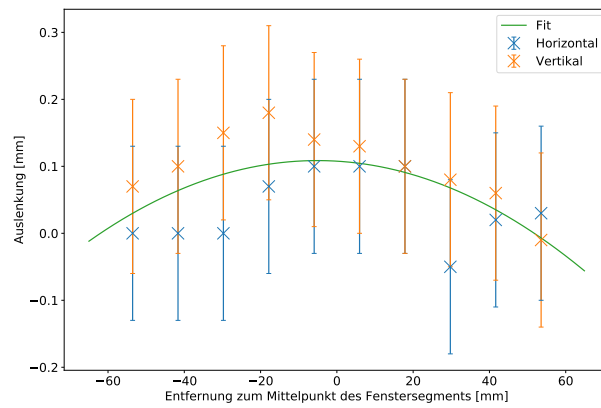


Abbildung B.60: Fenstersegment 3, Senkrecht, Fluss 4

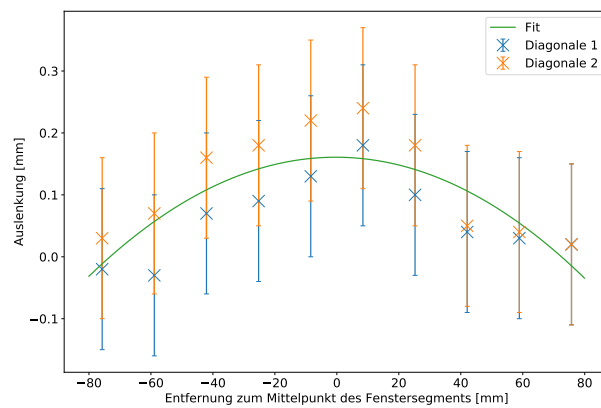


Abbildung B.61: Fenstersegment 2, Diagonal, Fluss 5

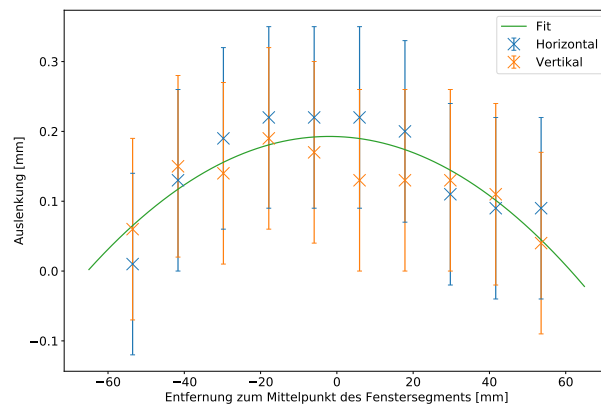


Abbildung B.62: Fenstersegment 2, Senkrecht, Fluss 5

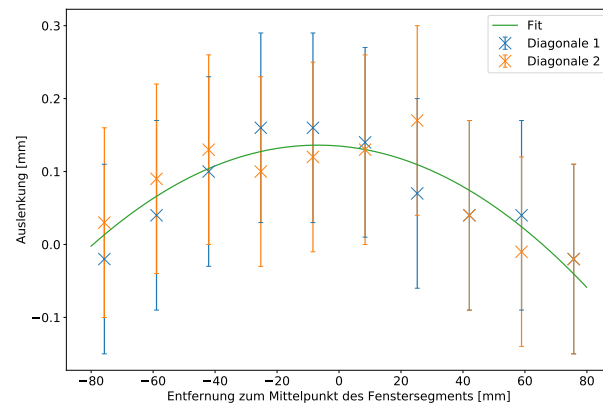


Abbildung B.63: Fenstersegment 3, Diagonal, Fluss 5

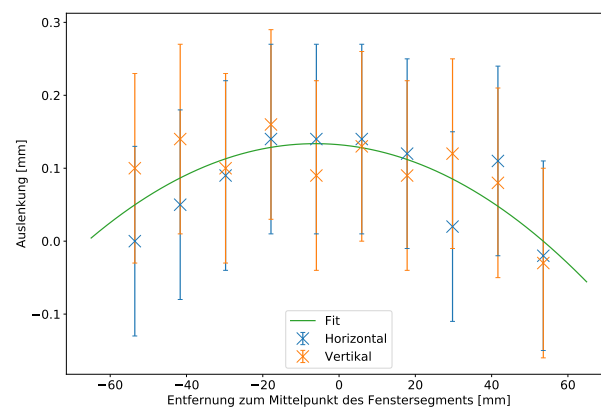


Abbildung B.64: Fenstersegment 3, Senkrecht, Fluss 5

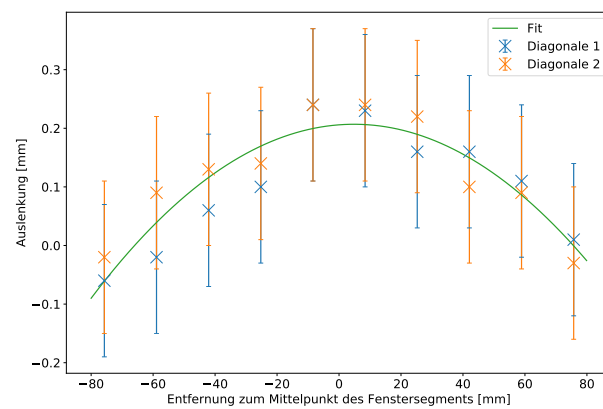


Abbildung B.65: Fenstersegment 2, Diagonal, Fluss 6

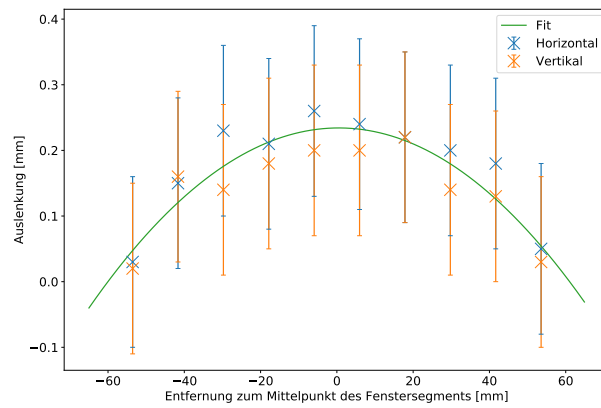


Abbildung B.66: Fenstersegment 2, Senkrecht, Fluss 6

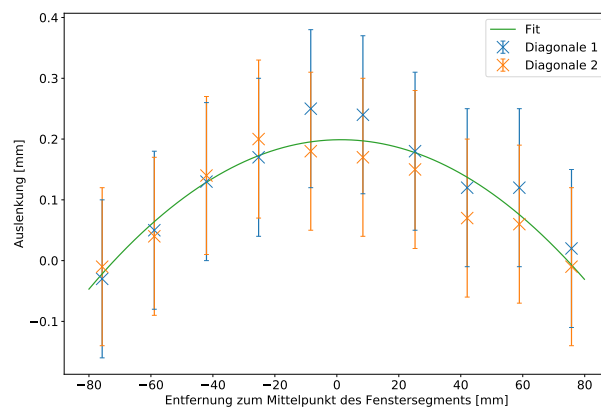


Abbildung B.67: Fenstersegment 3, Diagonal, Fluss 6

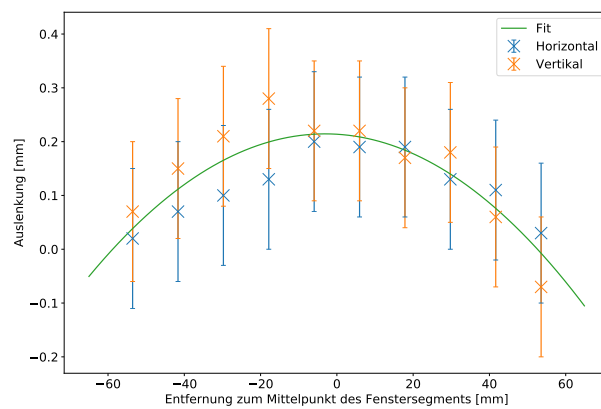


Abbildung B.68: Fenstersegment 3, Senkrecht, Fluss 6

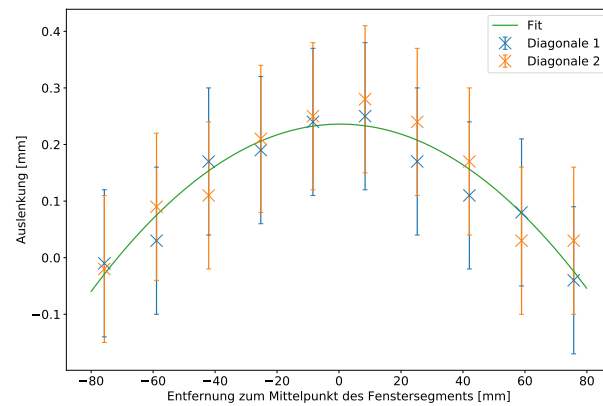


Abbildung B.69: Fenstersegment 2, Diagonal, Fluss 7

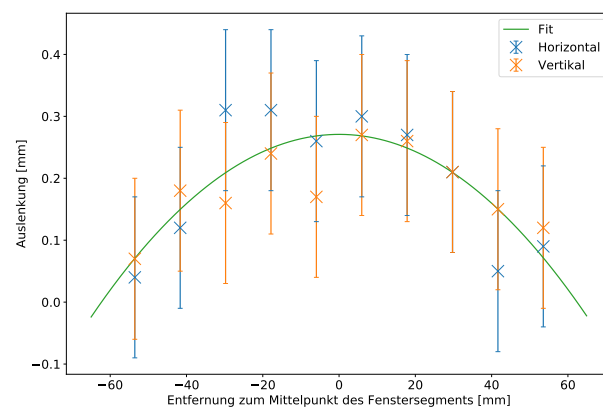


Abbildung B.70: Fenstersegment 2, Senkrecht, Fluss 7

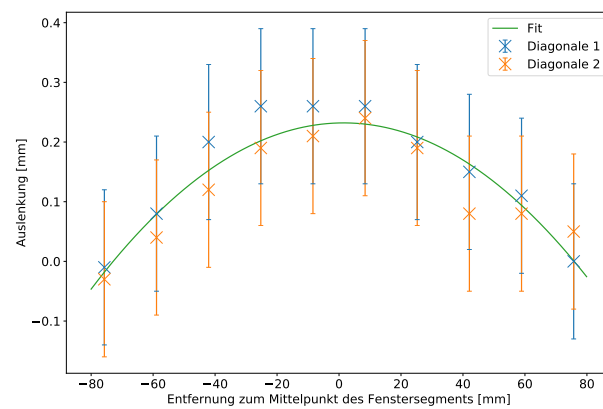


Abbildung B.71: Fenstersegment 3, Diagonal, Fluss 7

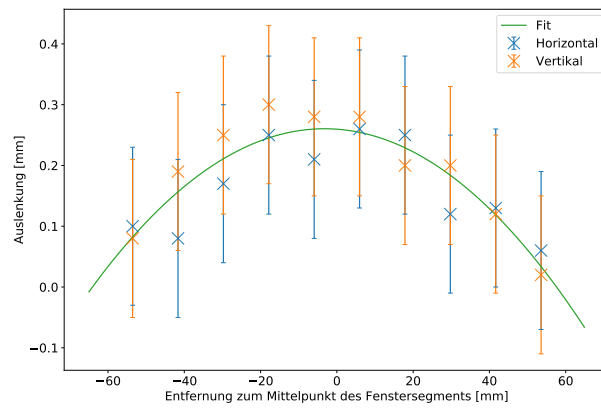


Abbildung B.72: Fenstersegment 3, Senkrecht, Fluss 7

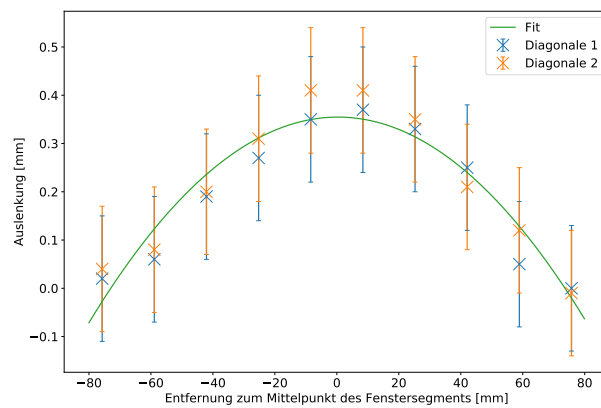


Abbildung B.73: Fenstersegment 2, Diagonal, Fluss 8

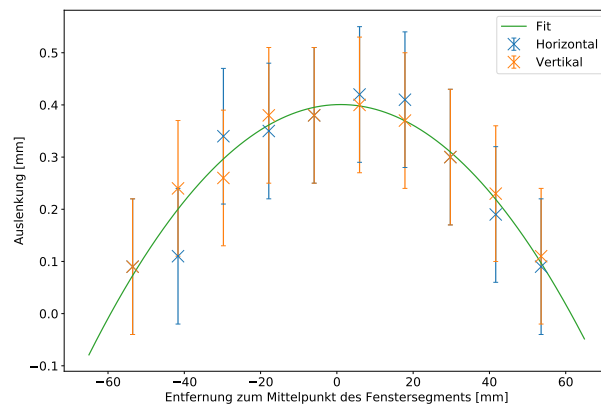


Abbildung B.74: Fenstersegment 2, Senkrecht, Fluss 8

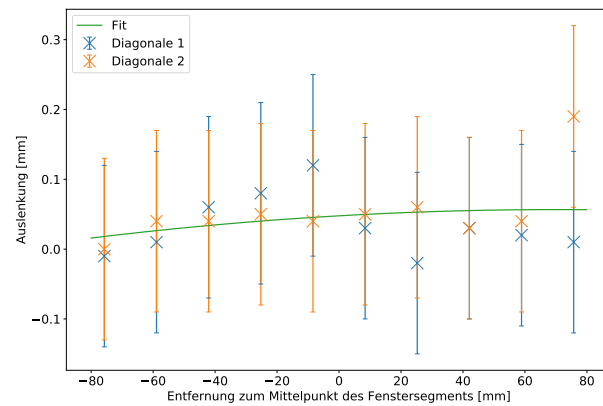


Abbildung B.75: Fenstersegment 3, Diagonal, Fluss 8

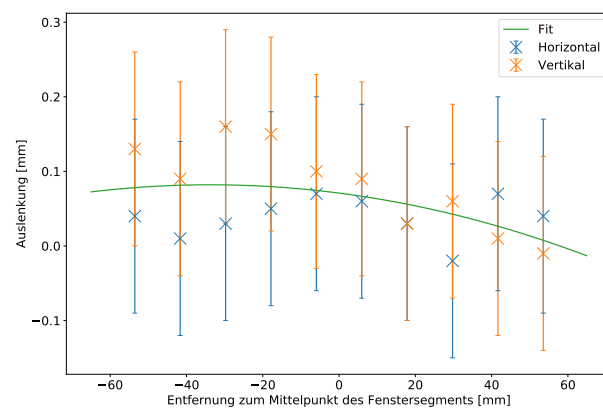


Abbildung B.76: Fenstersegment 3, Senkrecht, Fluss 8

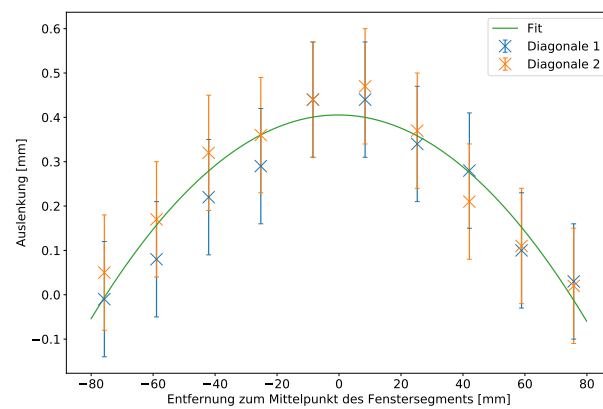


Abbildung B.77: Fenstersegment 2, Diagonal, Fluss 9

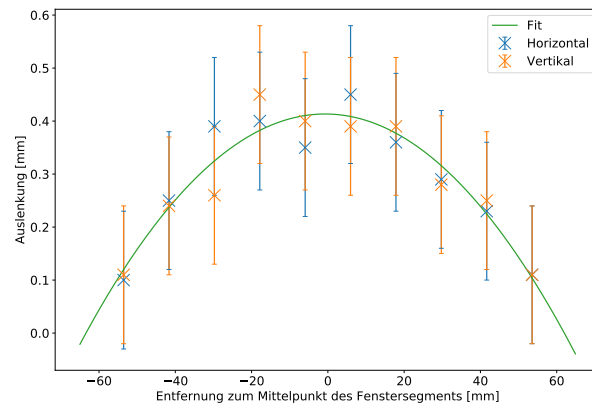


Abbildung B.78: Fenstersegment 2, Senkrecht, Fluss 9

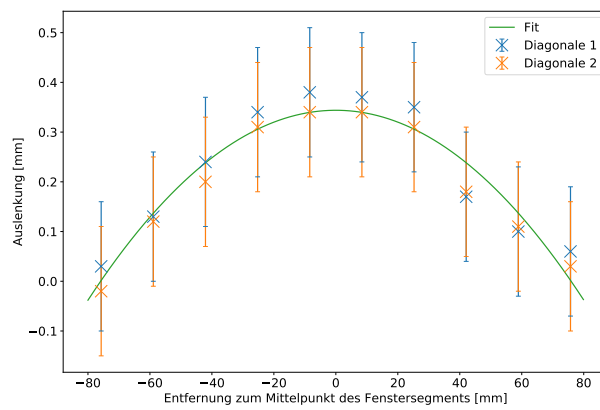


Abbildung B.79: Fenstersegment 3, Diagonal, Fluss 9

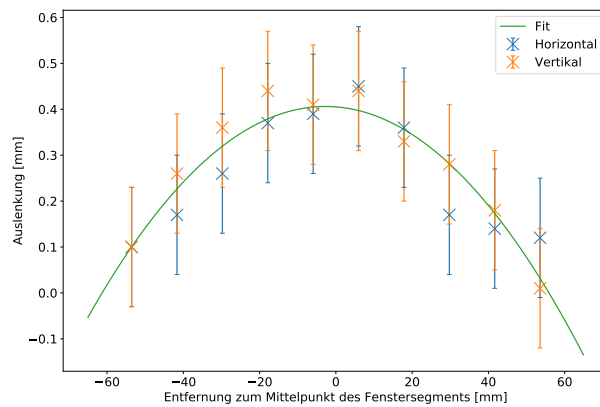


Abbildung B.80: Fenstersegment 3, Senkrecht, Fluss 9

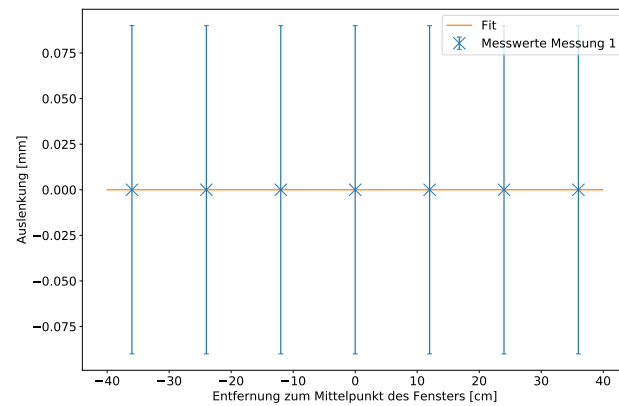


Abbildung B.81: Leisten Horizontal Fluss 1

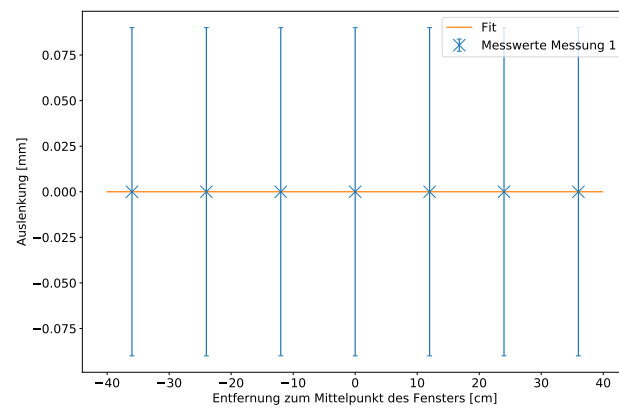


Abbildung B.82: Leisten Vertikal Fluss 1

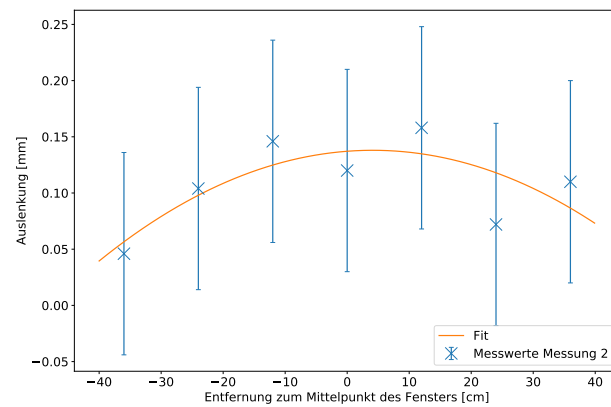


Abbildung B.83: Leisten Horizontal Fluss 2



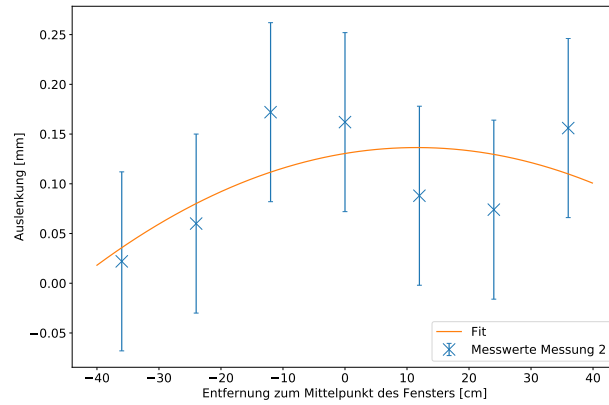


Abbildung B.84: Leisten Vertikal Fluss 2

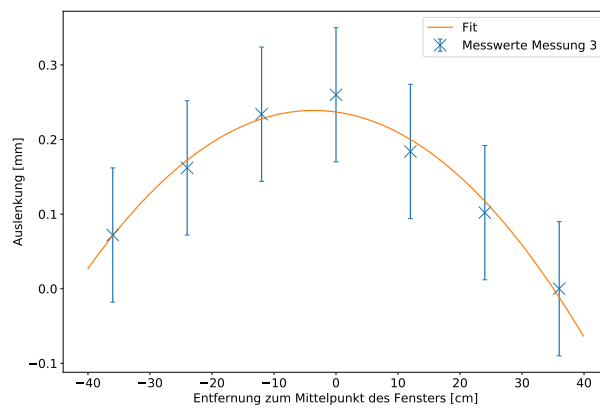


Abbildung B.85: Leisten Horizontal Fluss 3

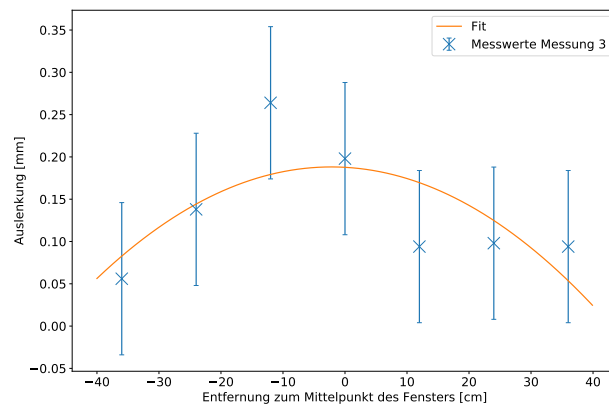


Abbildung B.86: Leisten Vertikal Fluss 3

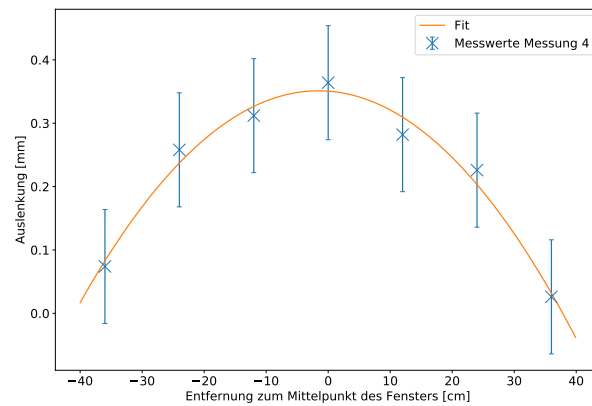


Abbildung B.87: Leisten Horizontal Fluss 4

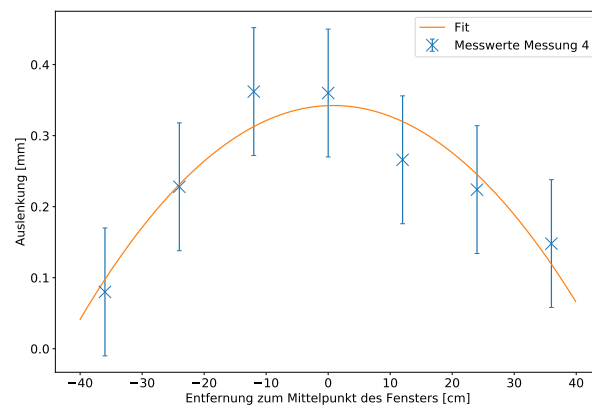


Abbildung B.88: Leisten Vertikal Fluss 4

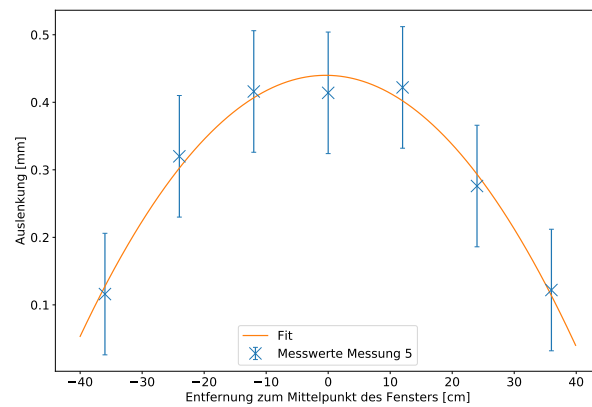


Abbildung B.89: Leisten Horizontal Fluss 5

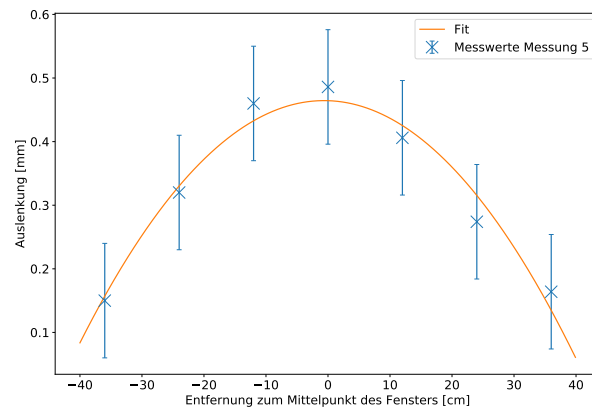


Abbildung B.90: Leisten Vertikal Fluss 5

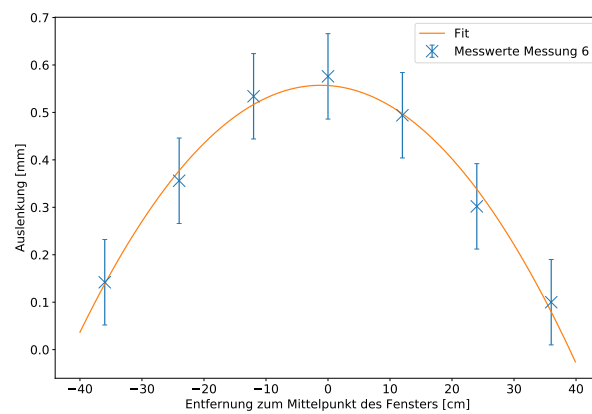


Abbildung B.91: Leisten Horizontal Fluss 6

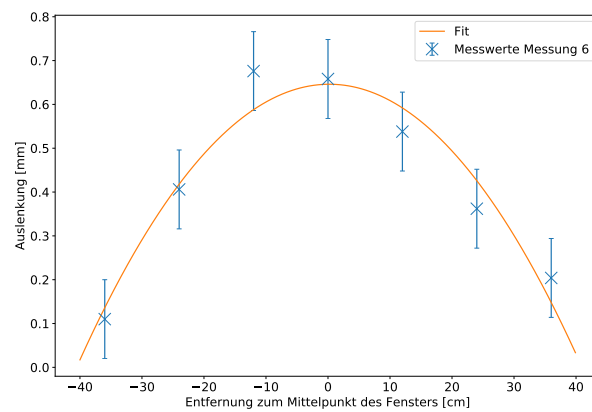


Abbildung B.92: Leisten Vertikal Fluss 6

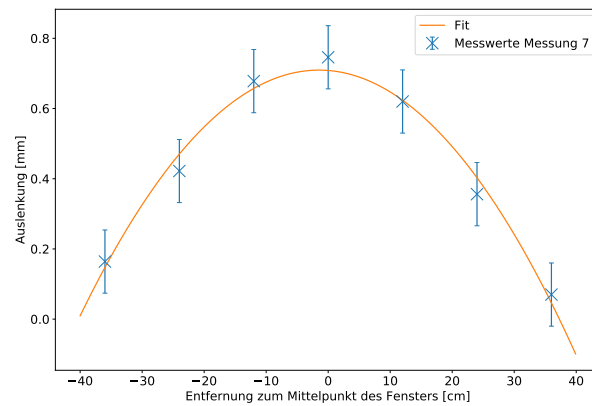


Abbildung B.93: Leisten Horizontal Fluss 7

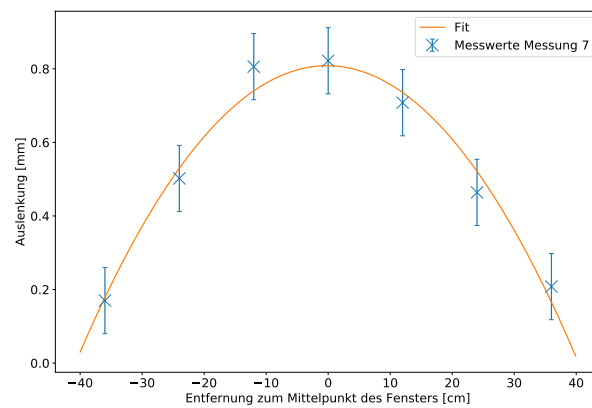


Abbildung B.94: Leisten Vertikal Fluss 7

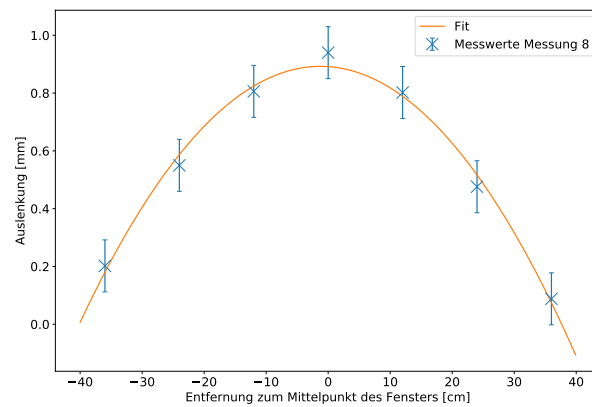


Abbildung B.95: Leisten Horizontal Fluss 8

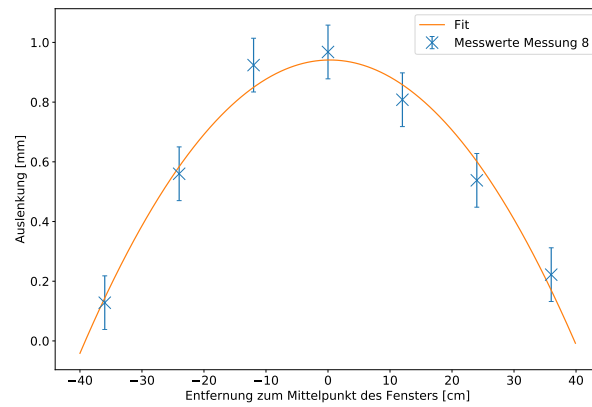


Abbildung B.96: Leisten Vertikal Fluss 8

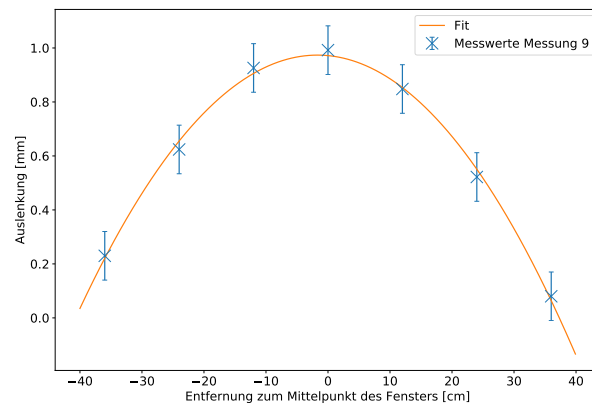


Abbildung B.97: Leisten Horizontal Fluss 9

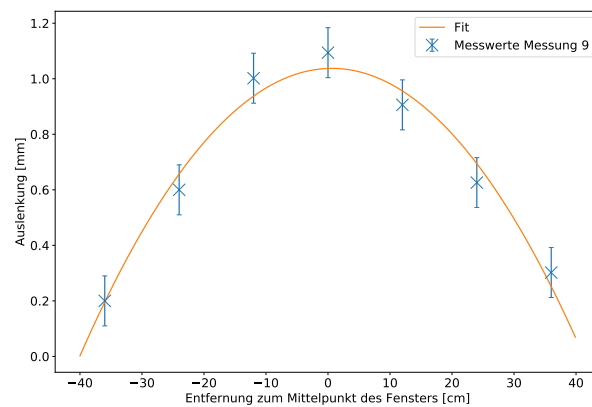
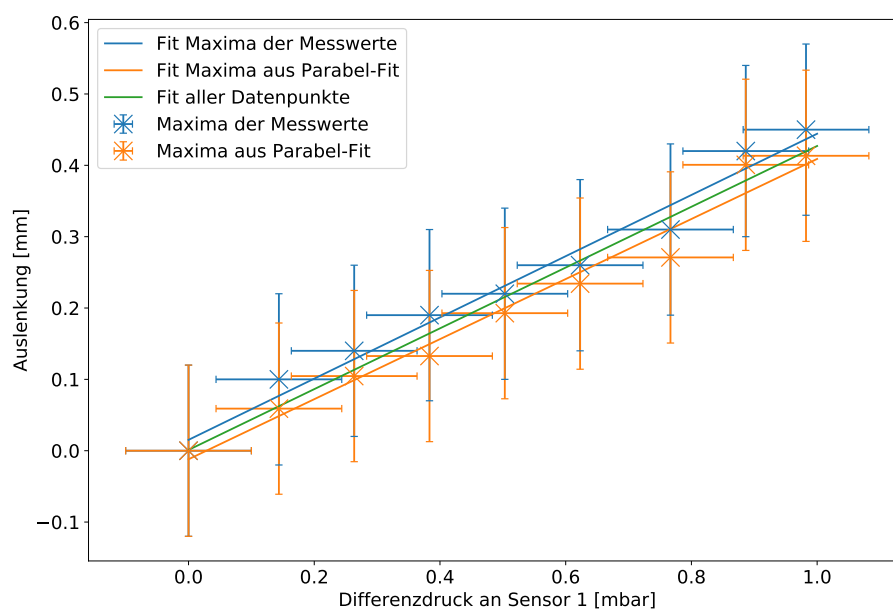


Abbildung B.98: Leisten Vertikal Fluss 9

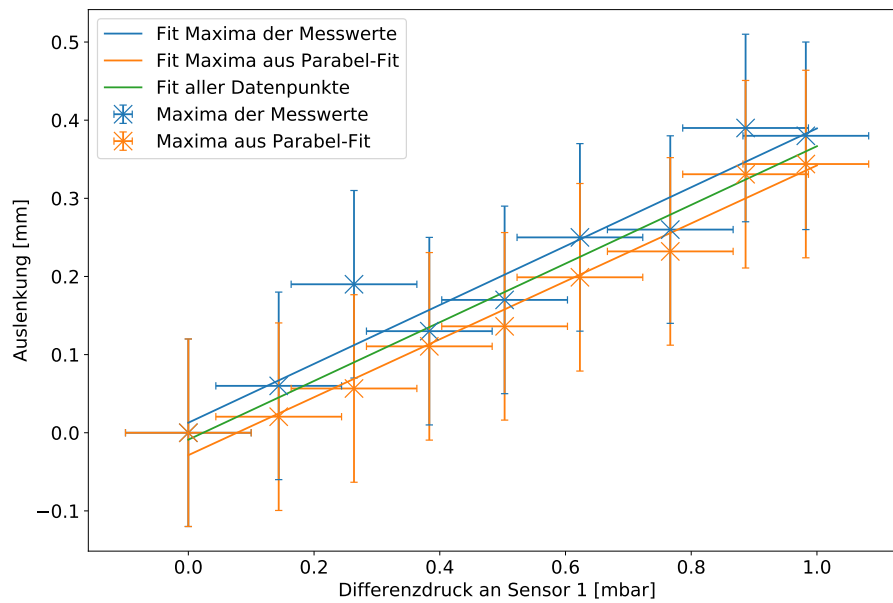
### B.2.4 Maximale Auslenkungen

**Tabelle B.47:** Parameter der linearen Fits der Maxima der Auswölbung.

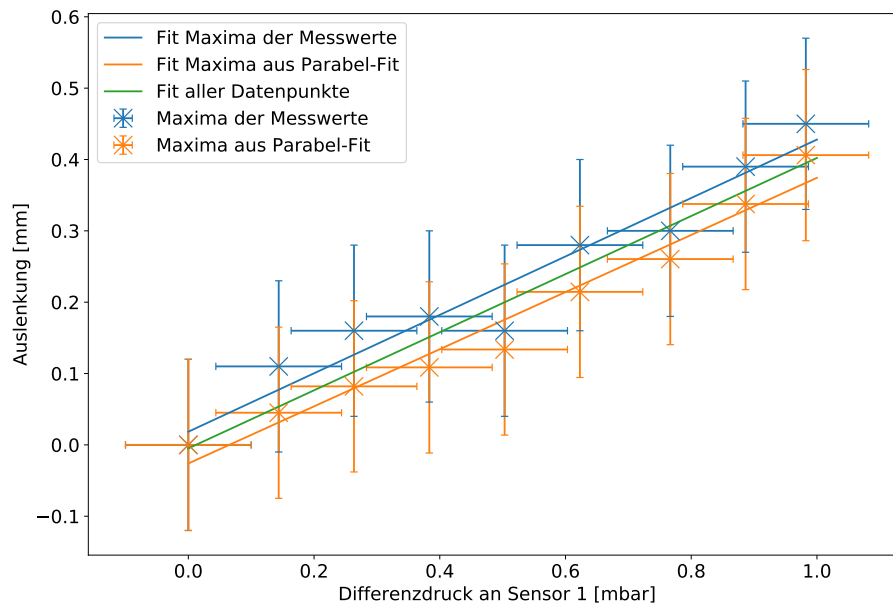
	Orientierung	Fitwerte	m	b
Fenstersegment 2	Diagonal	Gemessene Maxima	$0,43 \pm 0,03$	$0,005 \pm 0,020$
		Maxima aus Parabelfits	$0,39 \pm 0,02$	$-0,01 \pm 0,01$
		Beide zusammen	$0,41 \pm 0,02$	$-0,01 \pm 0,01$
	Senkrecht	Gemessene Maxima	$0,43 \pm 0,02$	$0,02 \pm 0,01$
		Maxima aus Parabelfits	$0,42 \pm 0,02$	$-0,01 \pm 0,01$
		Beide zusammen	$0,42 \pm 0,02$	$0,001 \pm 0,012$
Fenstersegment 3	Diagonal	Gemessene Maxima	$0,37 \pm 0,04$	$0,01 \pm 0,02$
		Maxima aus Parabelfits	$0,37 \pm 0,02$	$-0,03 \pm 0,01$
		Beide zusammen	$0,37 \pm 0,02$	$-0,01 \pm 0,01$
	Senkrecht	Gemessene Maxima	$0,40 \pm 0,03$	$0,02 \pm 0,02$
		Maxima aus Parabelfits	$0,40 \pm 0,02$	$-0,03 \pm 0,01$
Leisten	Horizontal	Beide zusammen	$0,96 \pm 0,02$	$-0,01 \pm 0,01$
	Vertikal	Beide zusammen	$1,08 \pm 0,02$	$-0,01 \pm 0,01$
	Gesamt		$1,02 \pm 0,02$	$-0,01 \pm 0,01$



**Abbildung B.99:** Die bestimmten Maxima der Messung der Auslenkung an den Senkrechten an Fenstersegment 2.



**Abbildung B.100:** Die bestimmten Maxima der Messung der Auslenkung an den Diagonalen von Fenstersegment 3.



**Abbildung B.101:** Die bestimmten Maxima der Messung der Auslenkung an den Senkrechten von Fenstersegment 3.

## B.3 Messung des Druckverlusts

### B.3.1 Messwerte der Sensoren

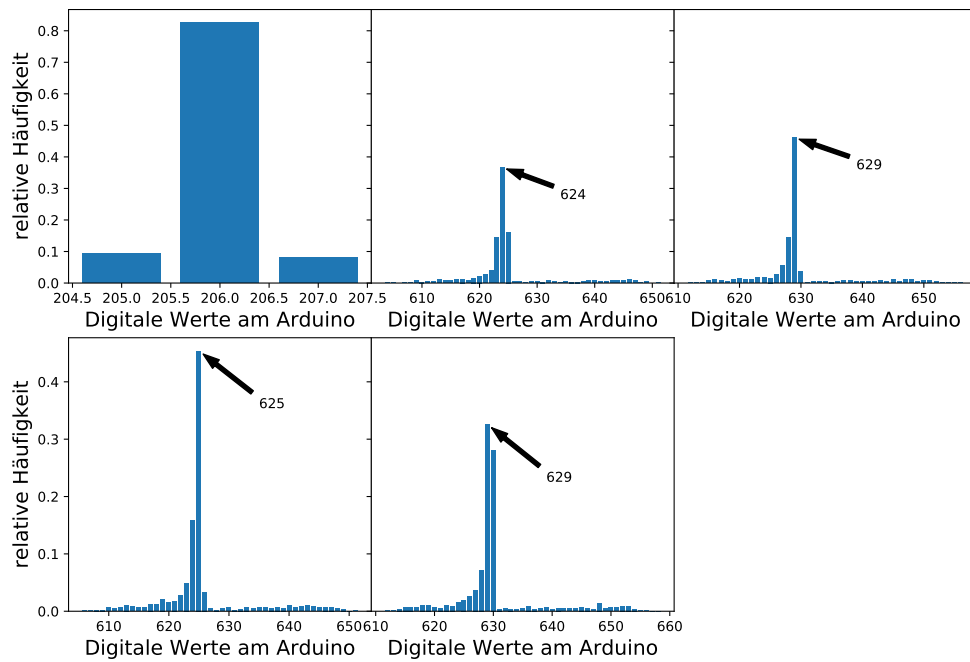


Abbildung B.102: Histogramme der Messung 1 mit angeschlossener Kammer.



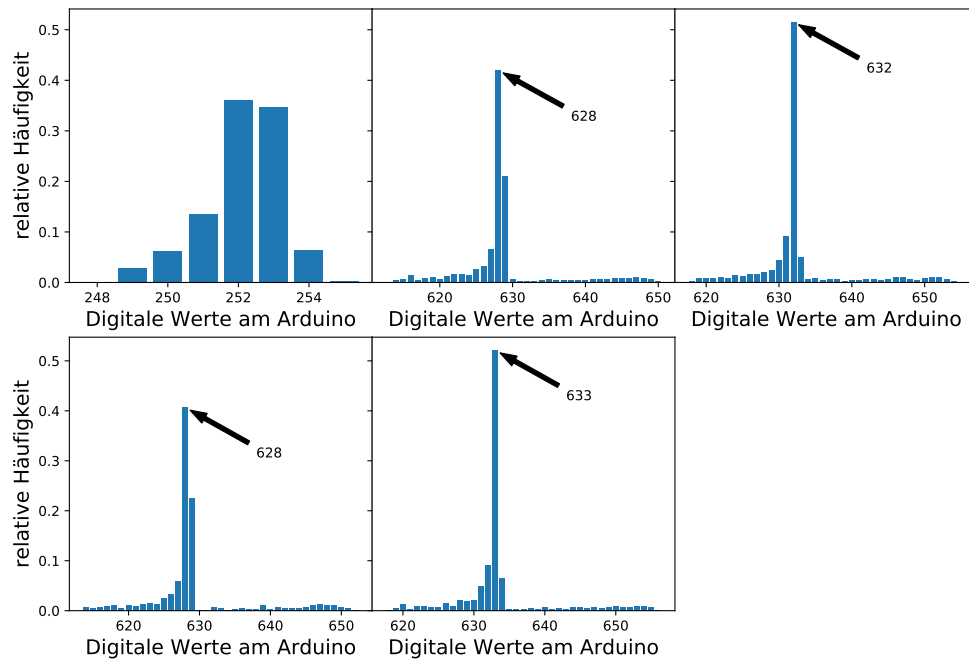


Abbildung B.103: Histogramme der Messung 2 mit angeschlossener Kammer.

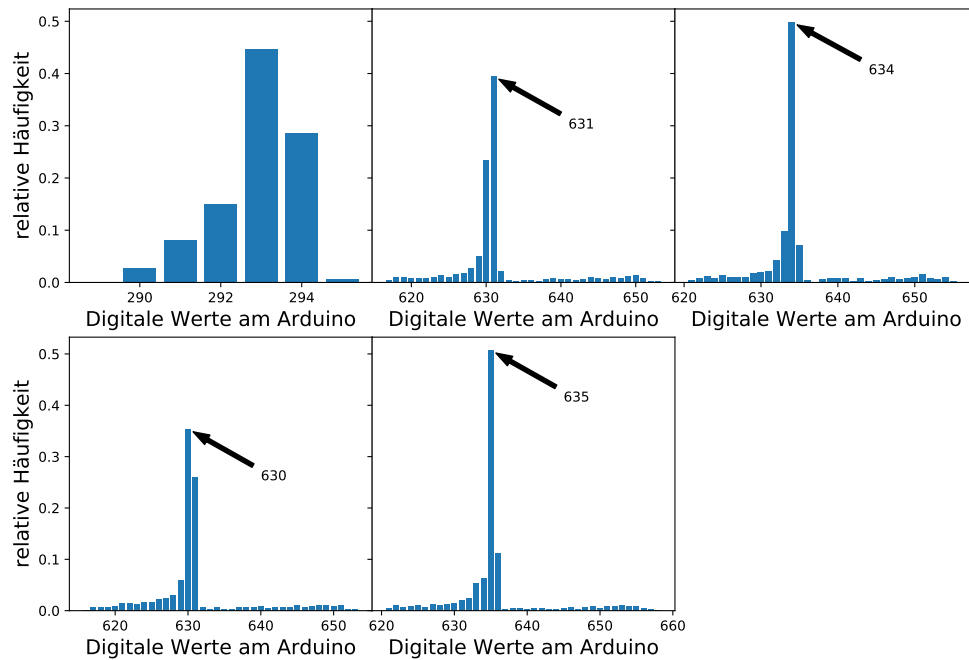


Abbildung B.104: Histogramme der Messung 3 mit angeschlossener Kammer.

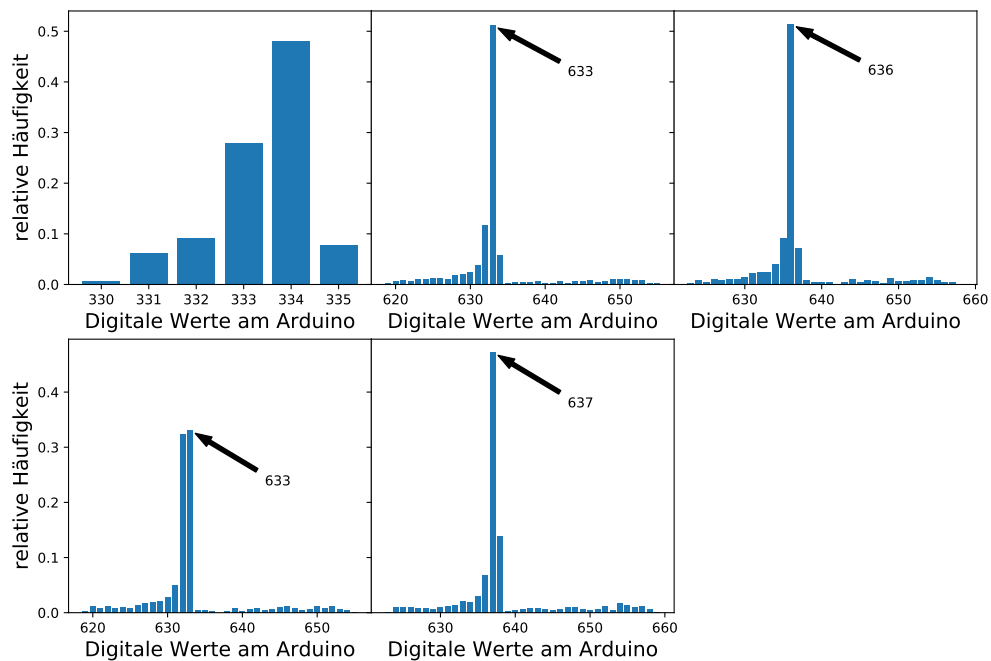


Abbildung B.105: Histogramme der Messung 4 mit angeschlossener Kammer.

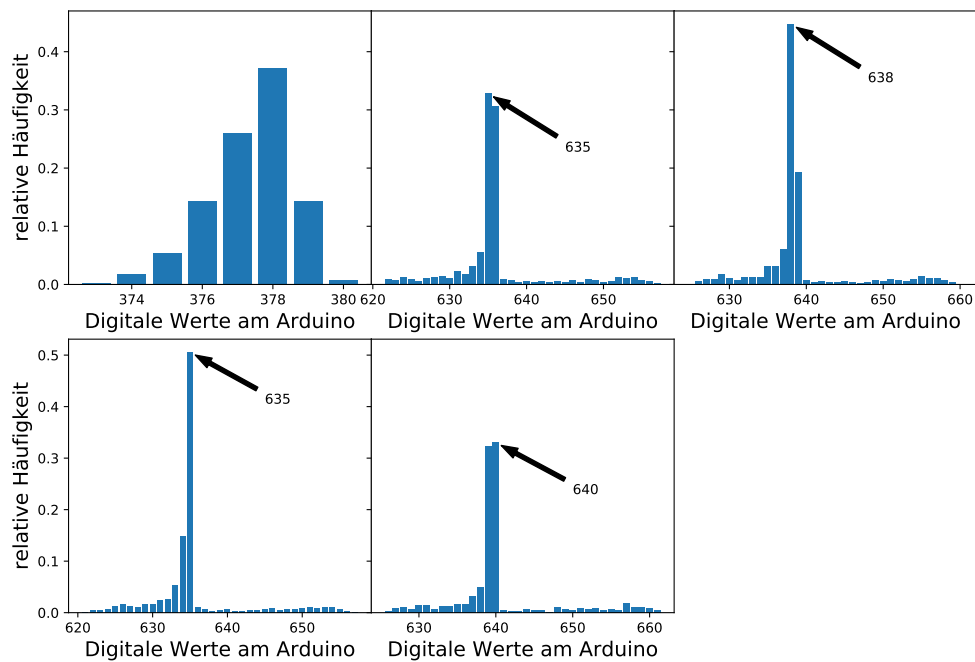


Abbildung B.106: Histogramme der Messung 5 mit angeschlossener Kammer.

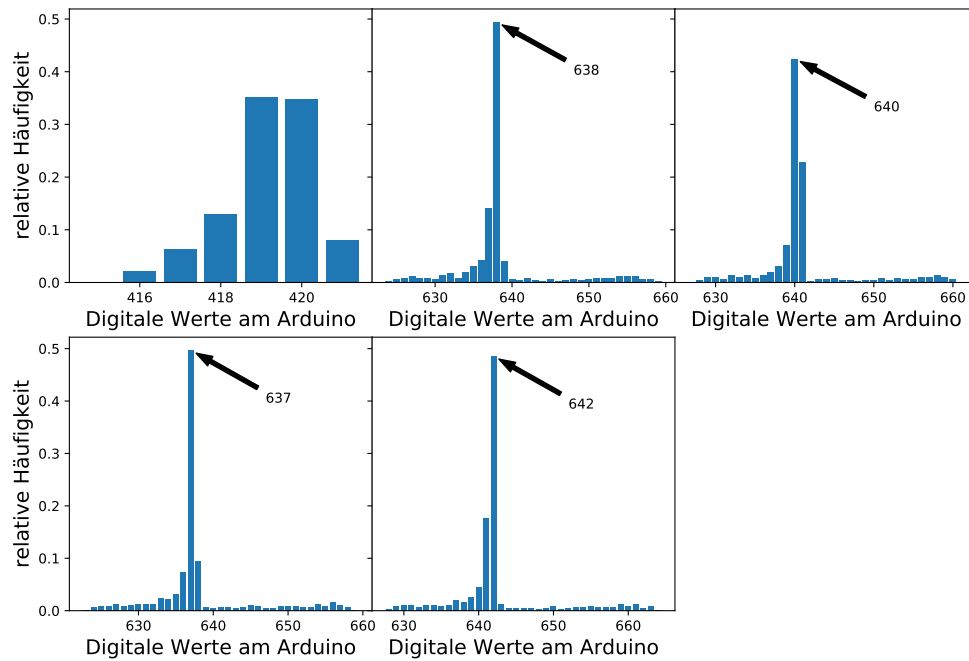


Abbildung B.107: Histogramme der Messung 6 mit angeschlossener Kammer.

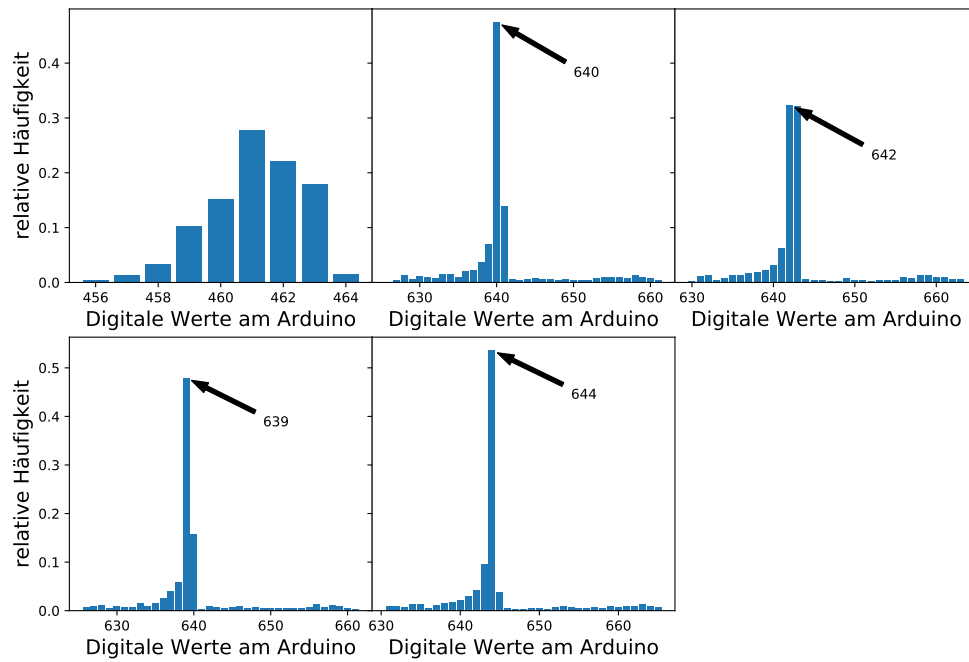


Abbildung B.108: Histogramme der Messung 7 mit angeschlossener Kammer.

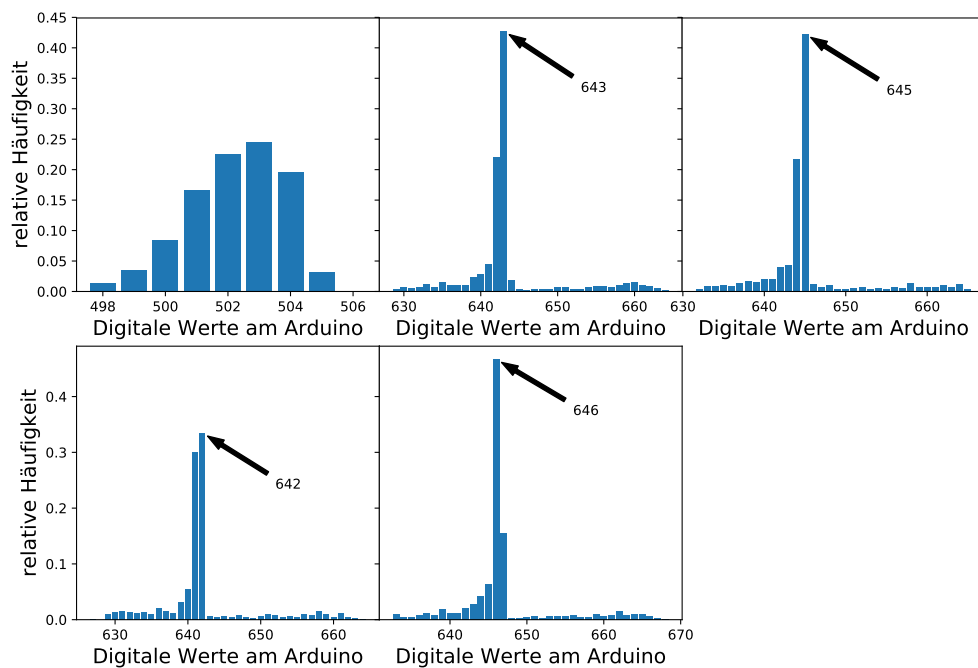


Abbildung B.109: Histogramme der Messung 8 mit angeschlossener Kammer.

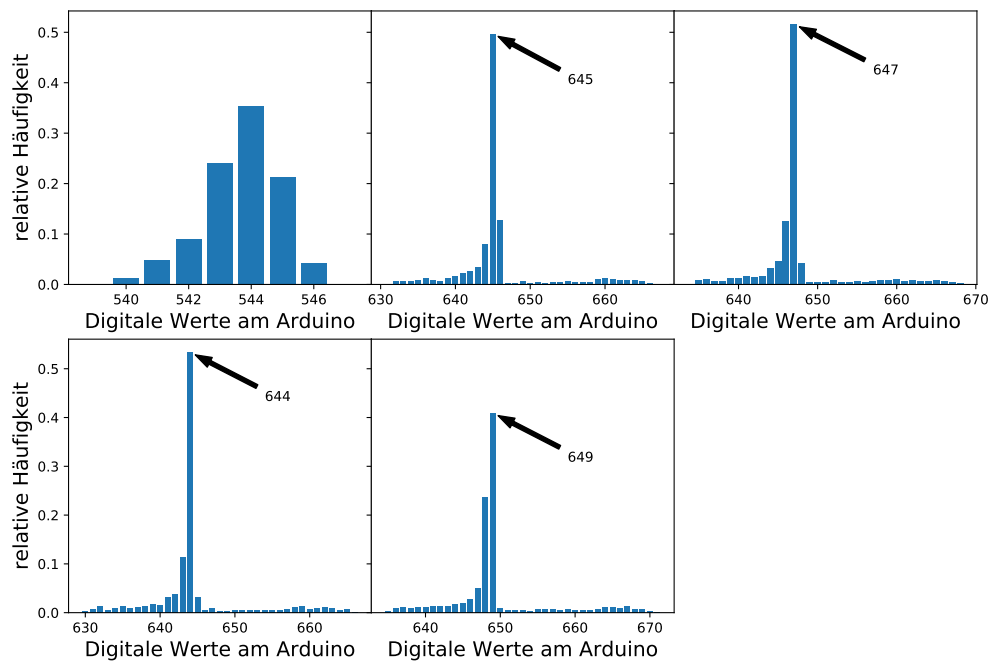


Abbildung B.110: Histogramme der Messung 9 mit angeschlossener Kammer.

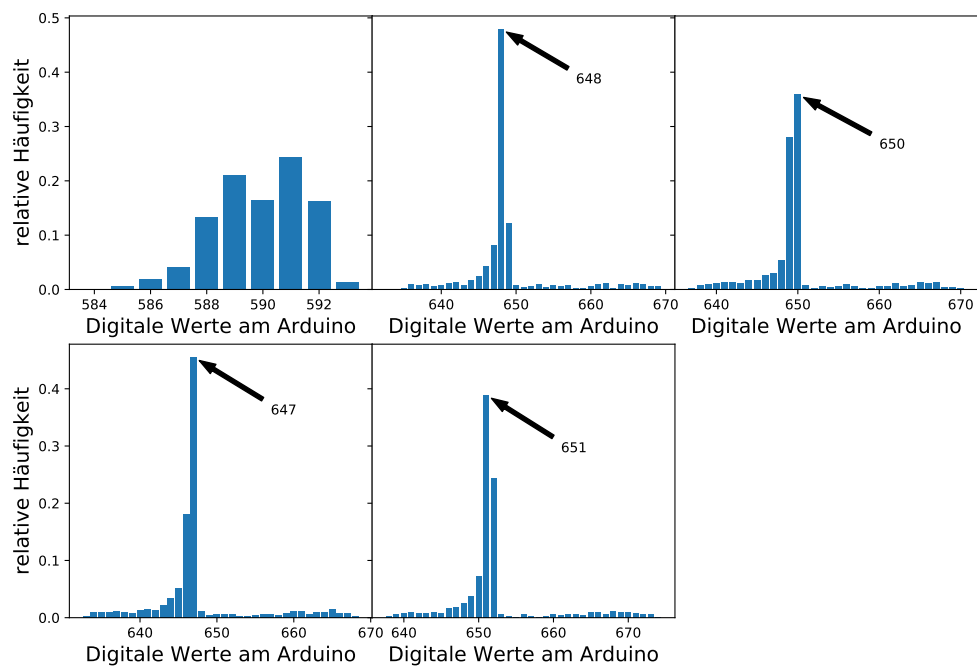


Abbildung B.111: Histogramme der Messung 10 mit angeschlossener Kammer.

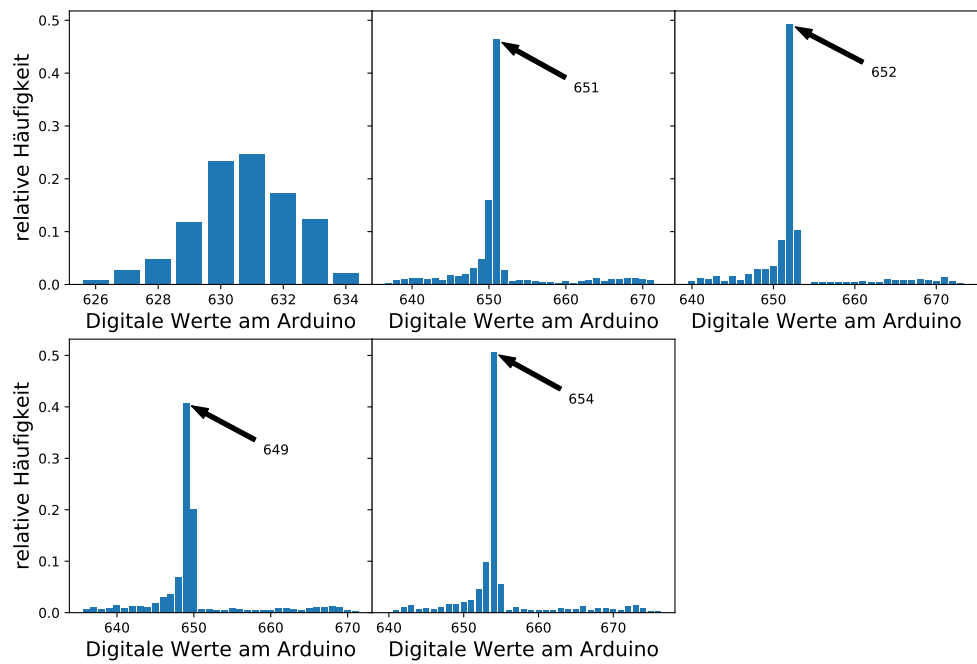


Abbildung B.112: Histogramme der Messung 11 mit angeschlossener Kammer.

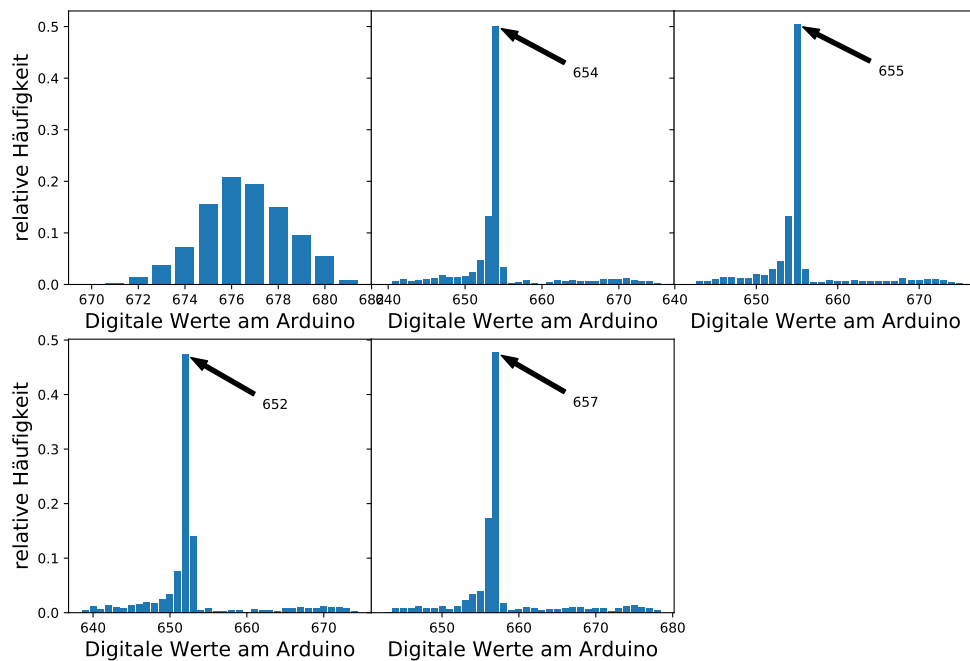


Abbildung B.113: Histogramme der Messung 12 mit angeschlossener Kammer.

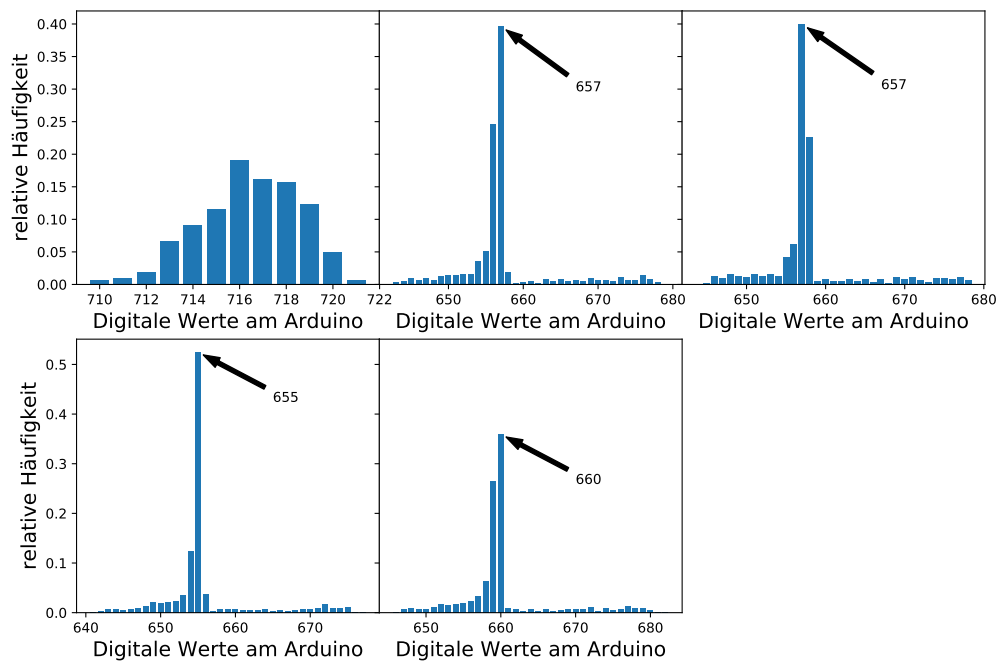


Abbildung B.114: Histogramme der Messung 13 mit angeschlossener Kammer.

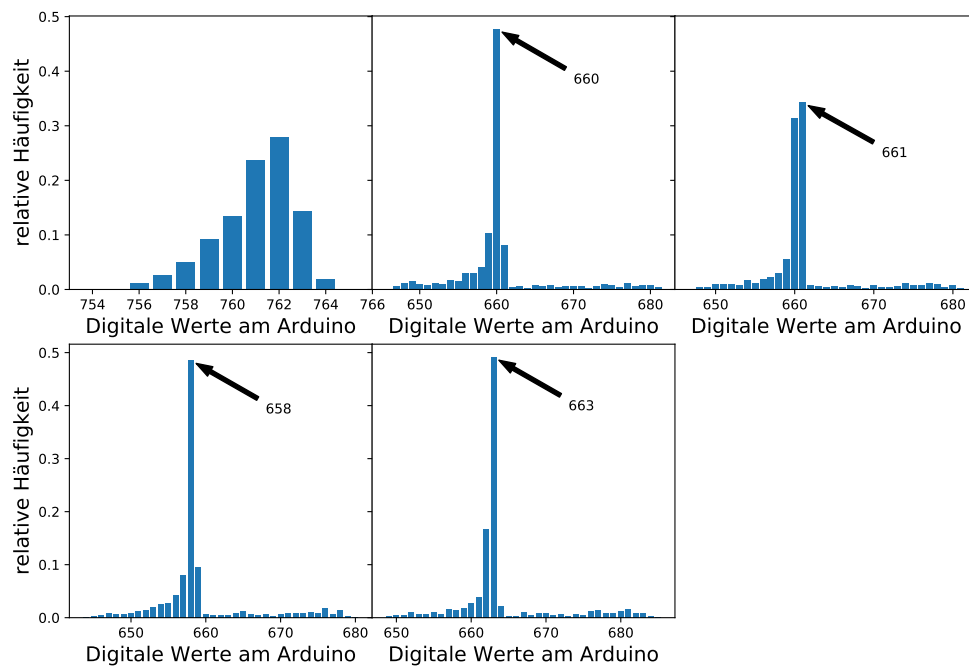


Abbildung B.115: Histogramme der Messung 14 mit angeschlossener Kammer.

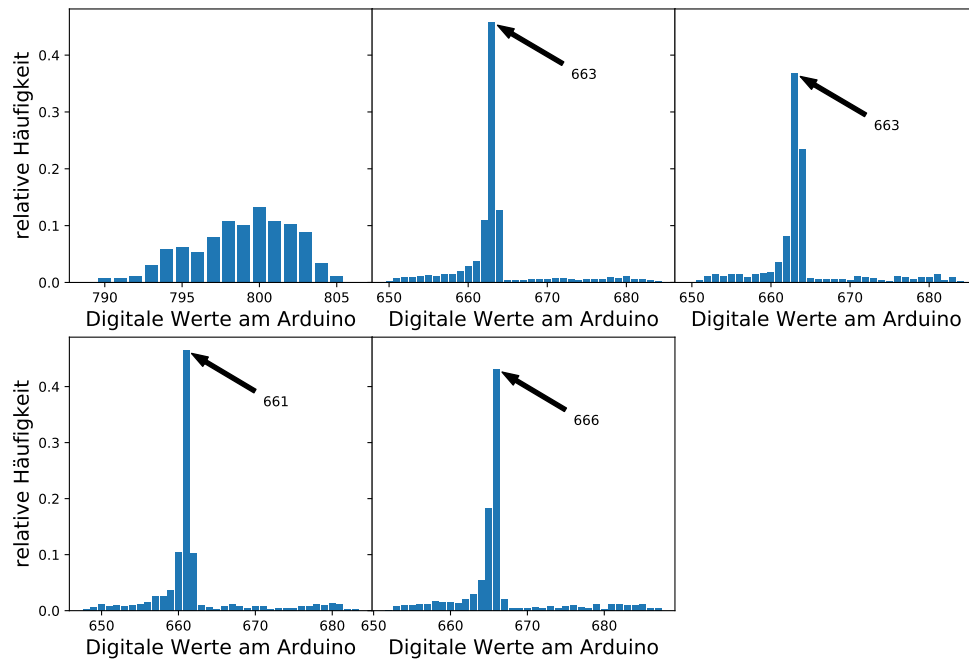


Abbildung B.116: Histogramme der Messung 15 mit angeschlossener Kammer.

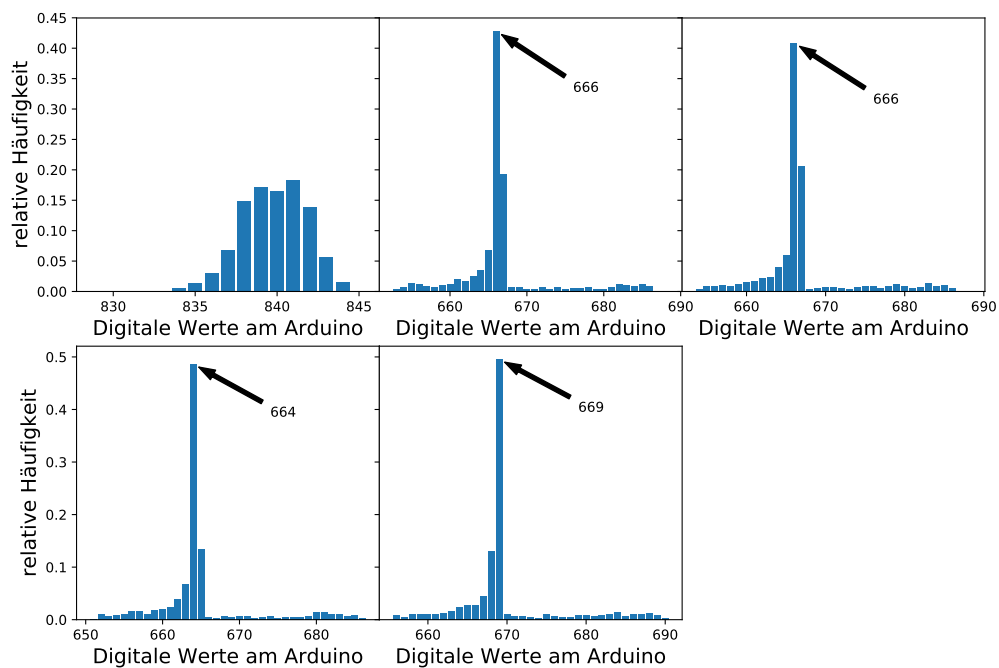


Abbildung B.117: Histogramme der Messung 16 mit angeschlossener Kammer.

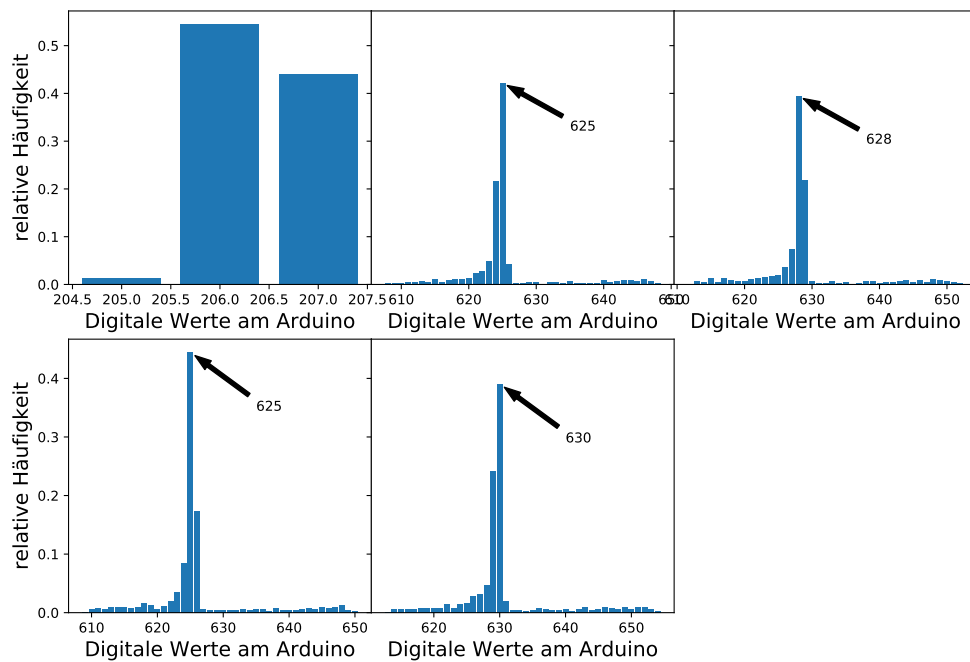


Abbildung B.118: Histogramme der Messung 1 ohne angeschlossener Kammer.



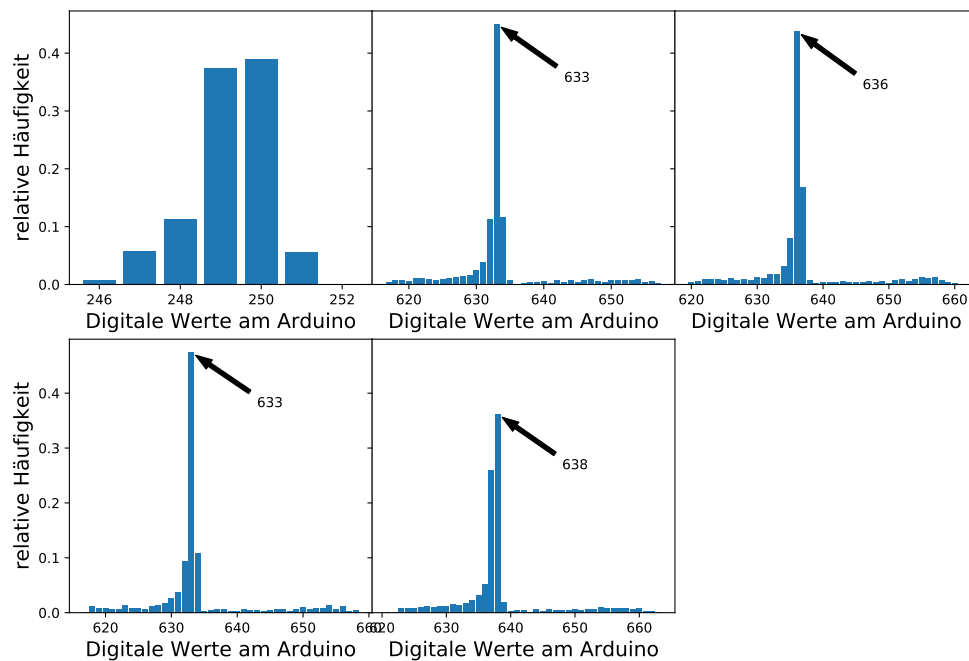


Abbildung B.119: Histogramme der Messung 2 ohne angeschlossener Kammer.

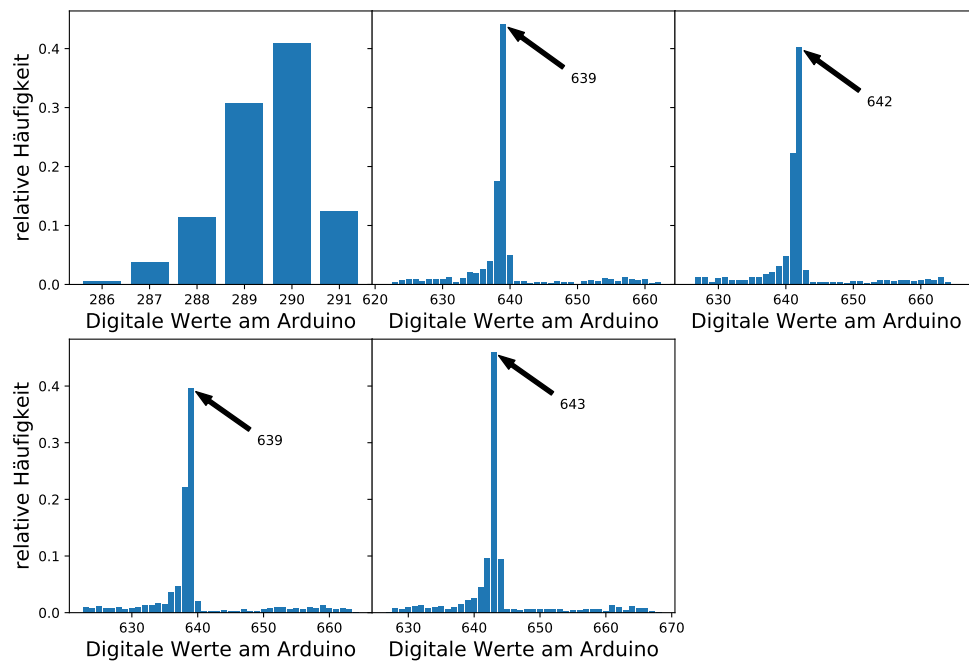


Abbildung B.120: Histogramme der Messung 3 ohne angeschlossener Kammer.

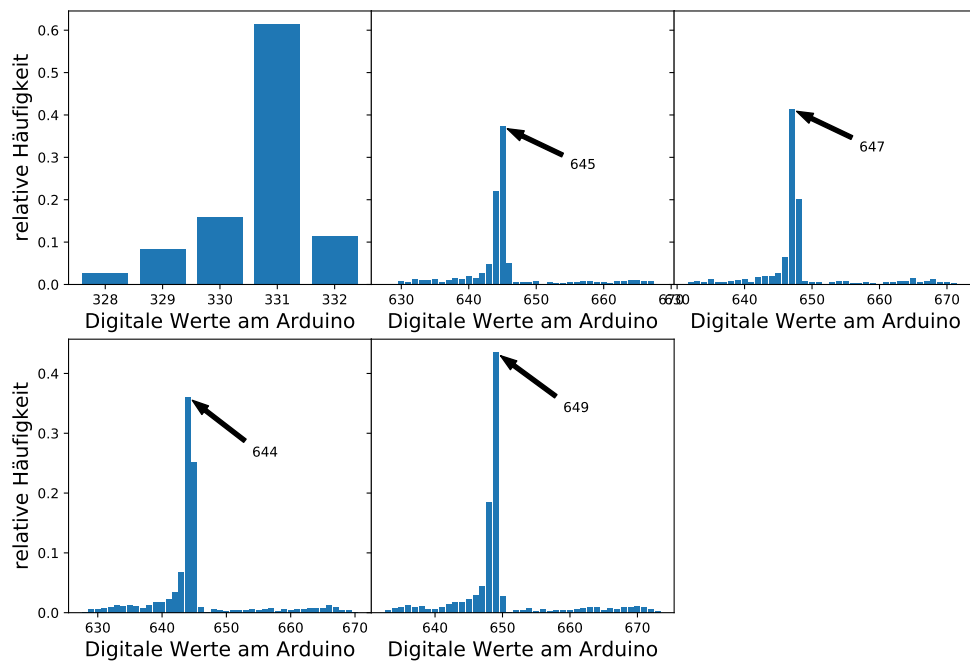


Abbildung B.121: Histogramme der Messung 4 ohne angeschlossener Kammer.

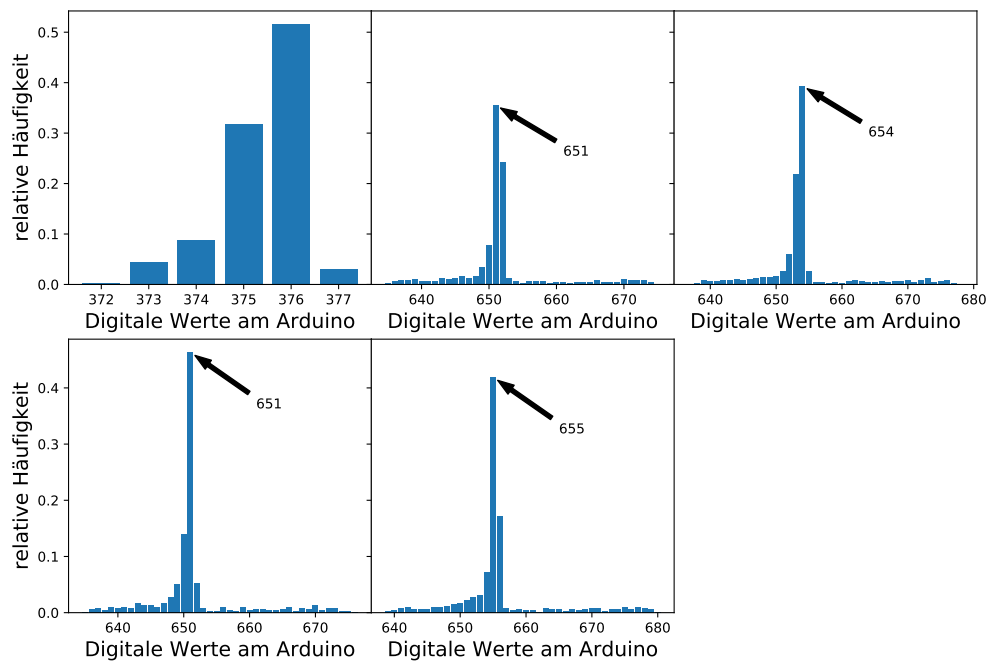


Abbildung B.122: Histogramme der Messung 5 ohne angeschlossener Kammer.

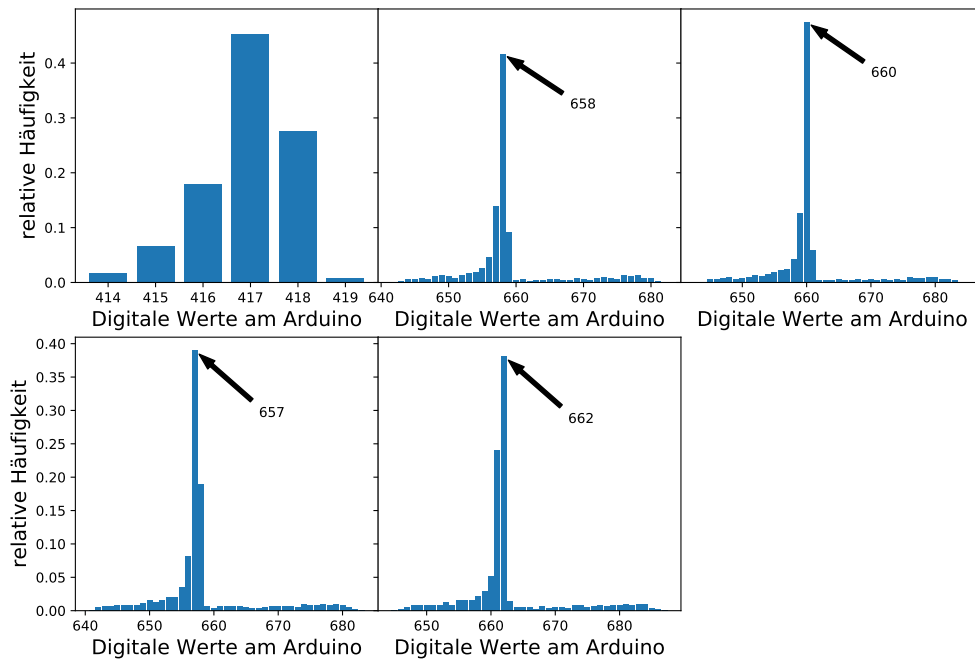


Abbildung B.123: Histogramme der Messung 6 ohne angeschlossener Kammer.

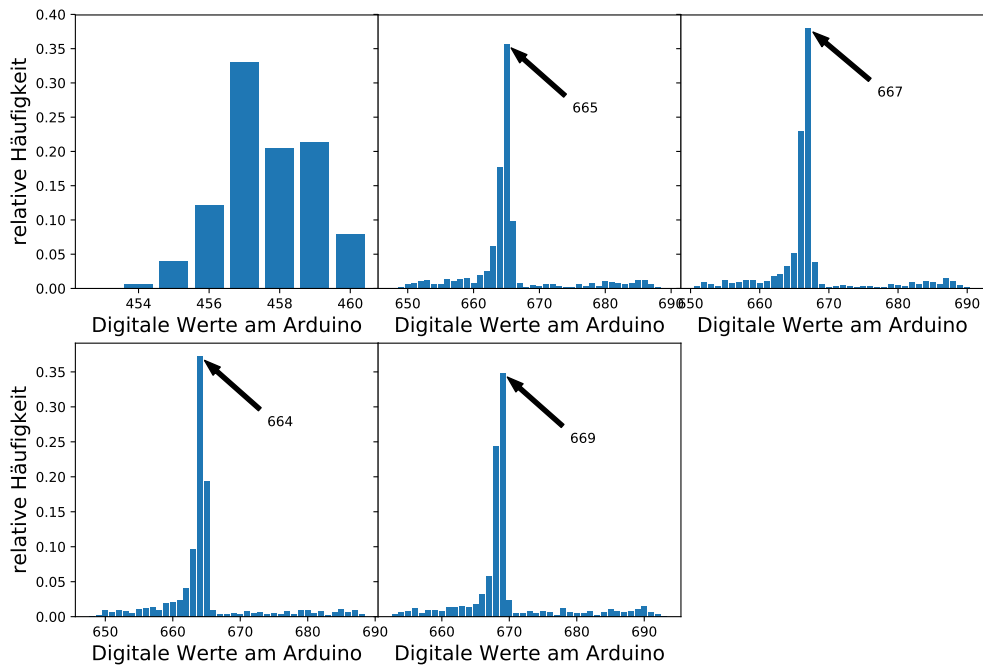


Abbildung B.124: Histogramme der Messung 7 ohne angeschlossener Kammer.

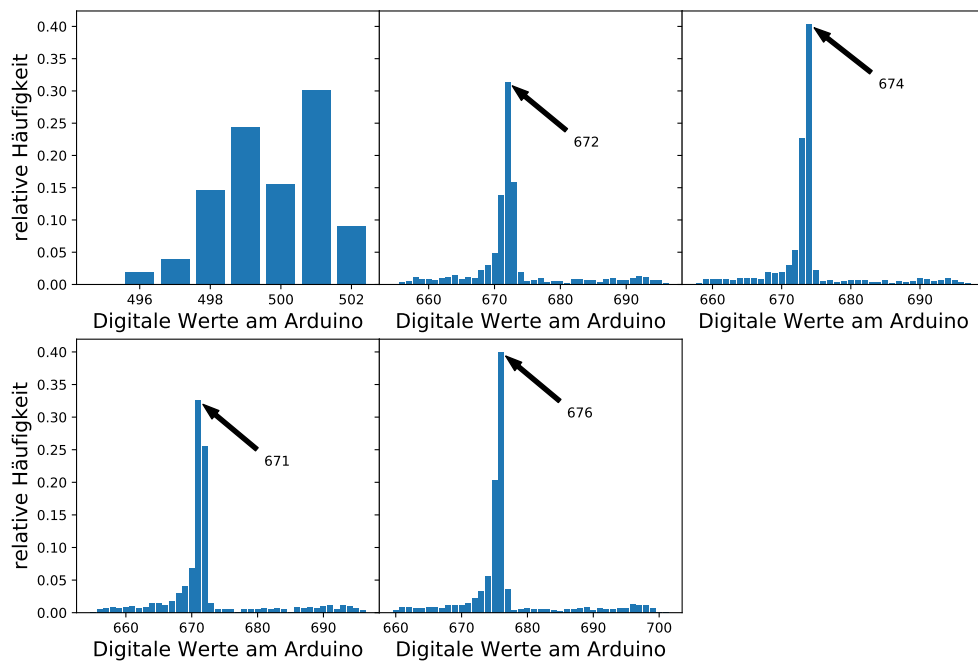


Abbildung B.125: Histogramme der Messung 8 ohne angeschlossener Kammer.

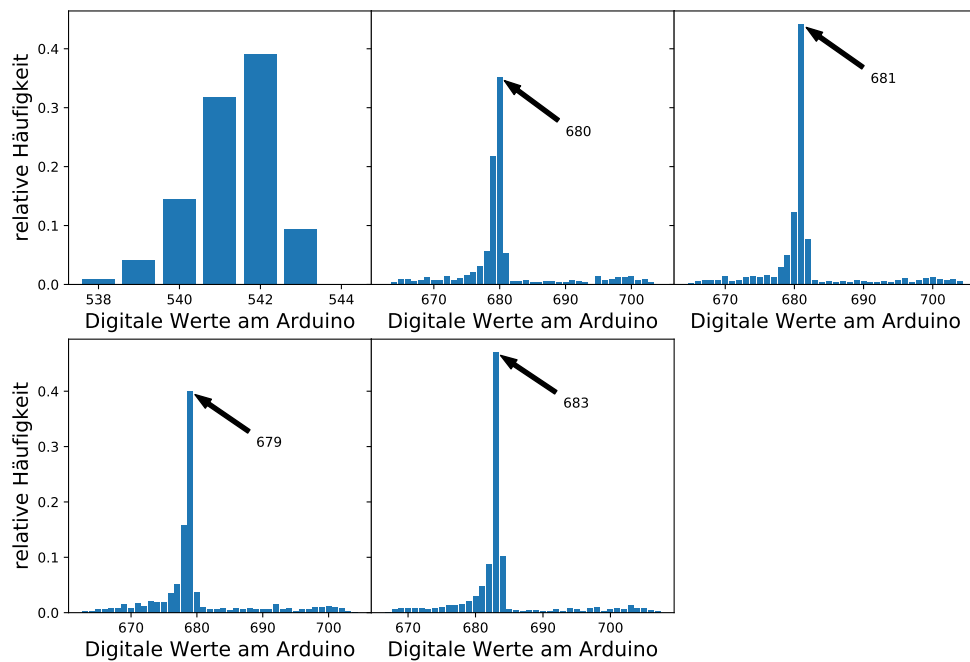


Abbildung B.126: Histogramme der Messung 9 ohne angeschlossener Kammer.

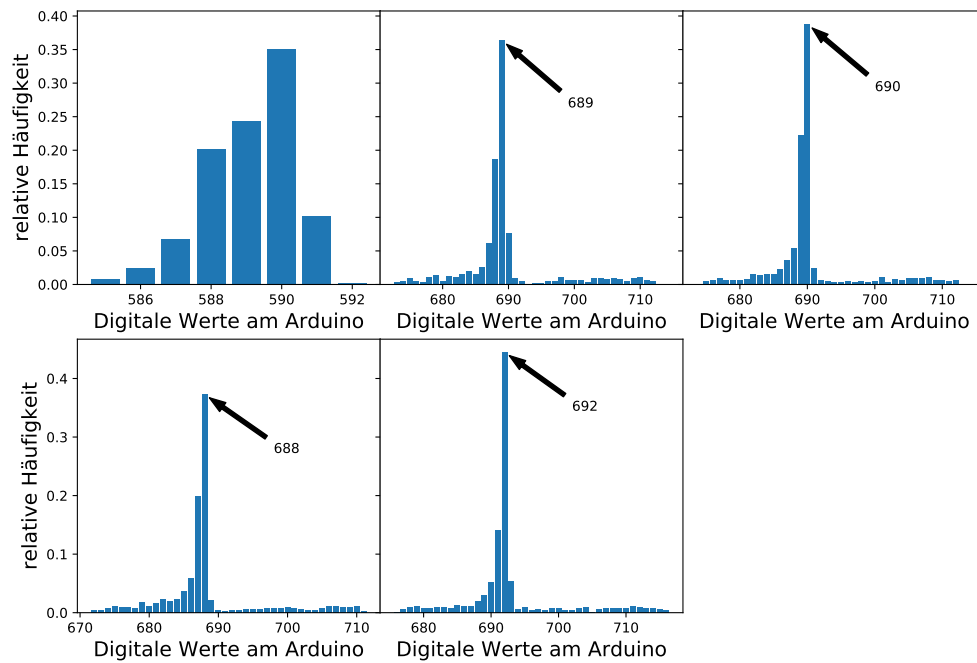


Abbildung B.127: Histogramme der Messung 10 ohne angeschlossener Kammer.

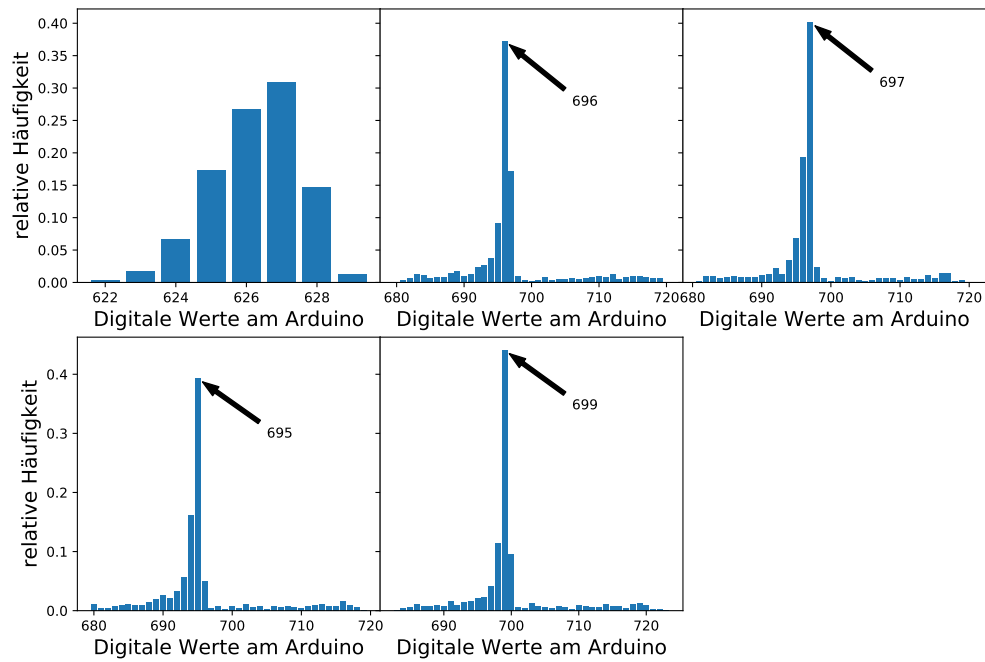


Abbildung B.128: Histogramme der Messung 11 ohne angeschlossener Kammer.

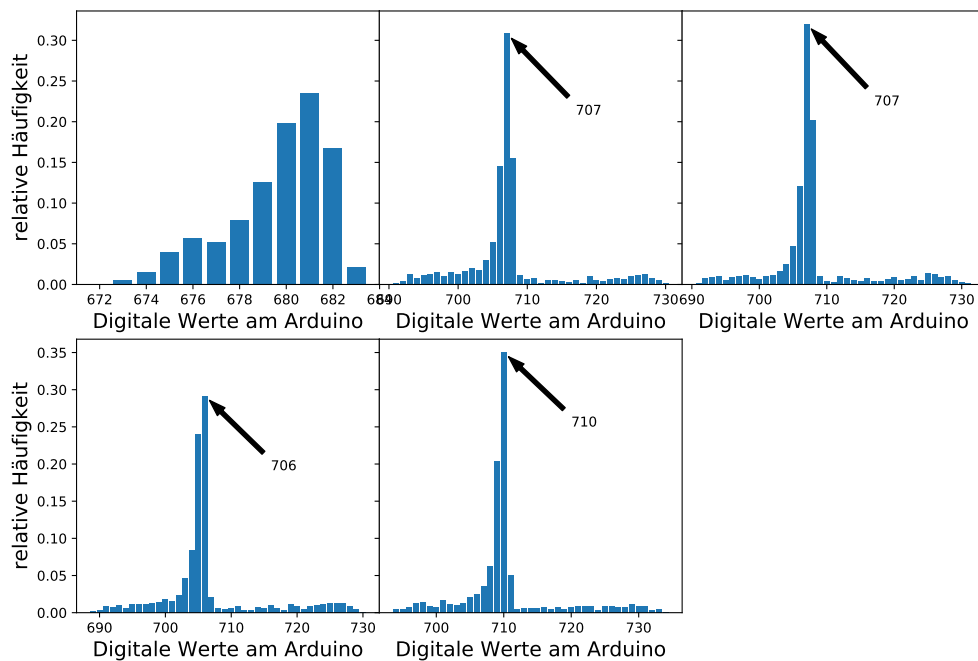


Abbildung B.129: Histogramme der Messung 12 ohne angeschlossener Kammer.

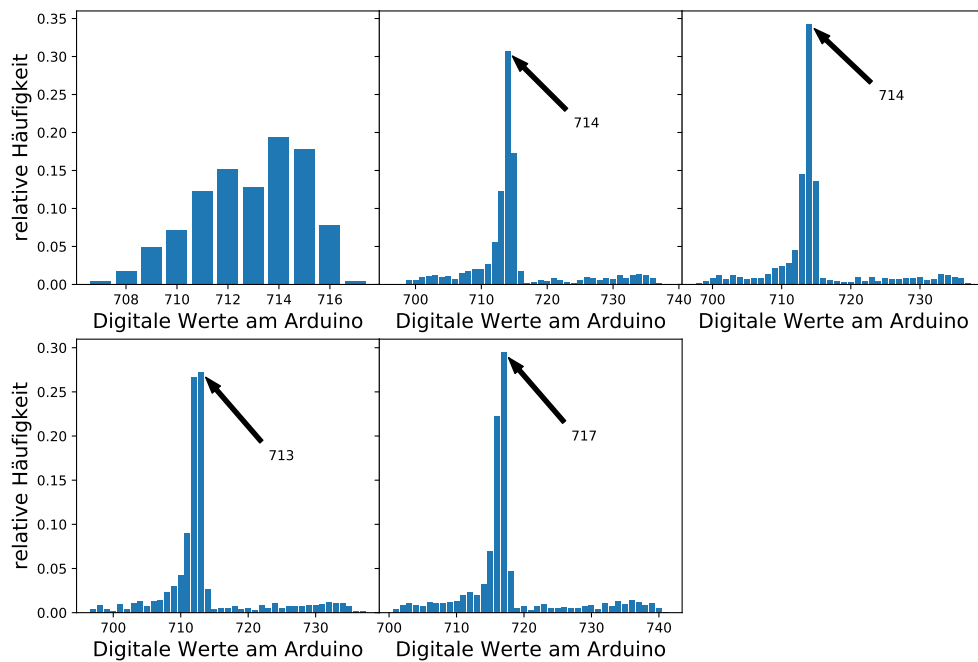


Abbildung B.130: Histogramme der Messung 13 ohne angeschlossener Kammer.

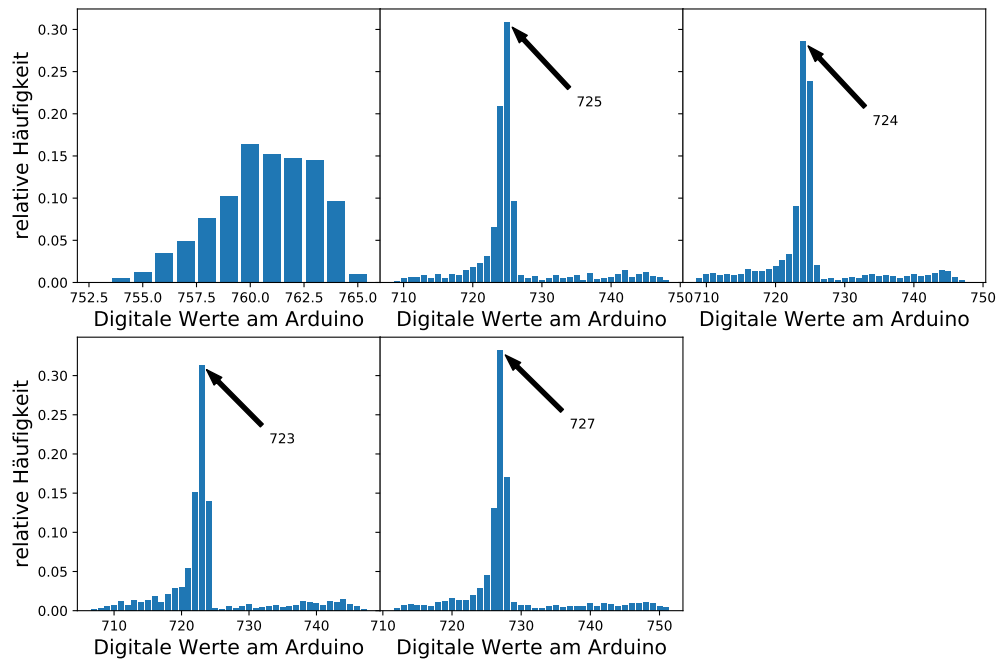


Abbildung B.131: Histogramme der Messung 14 ohne angeschlossener Kammer.

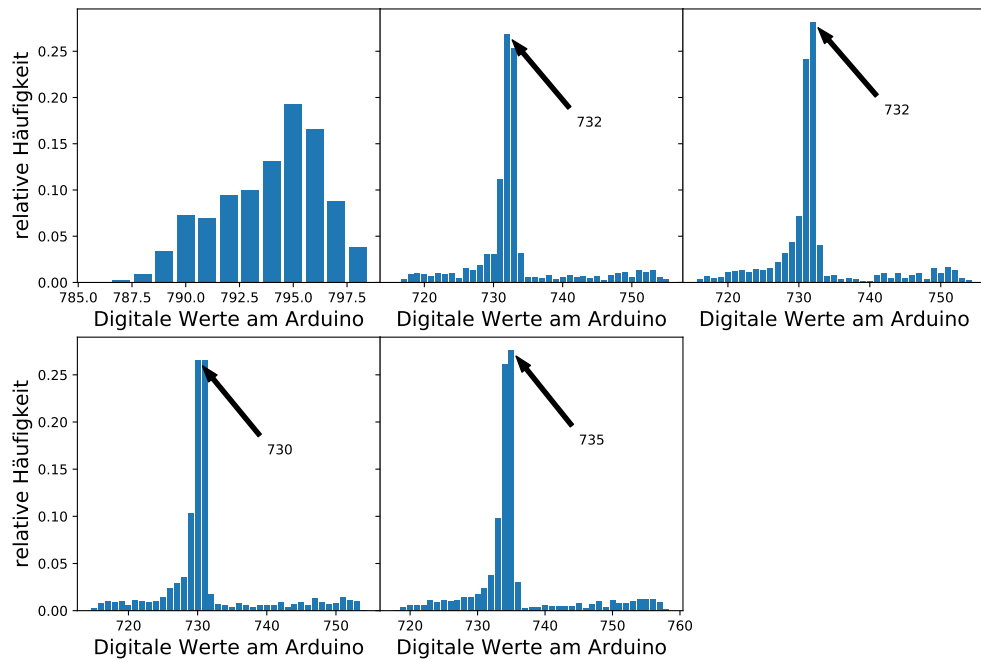


Abbildung B.132: Histogramme der Messung 15 ohne angeschlossener Kammer.

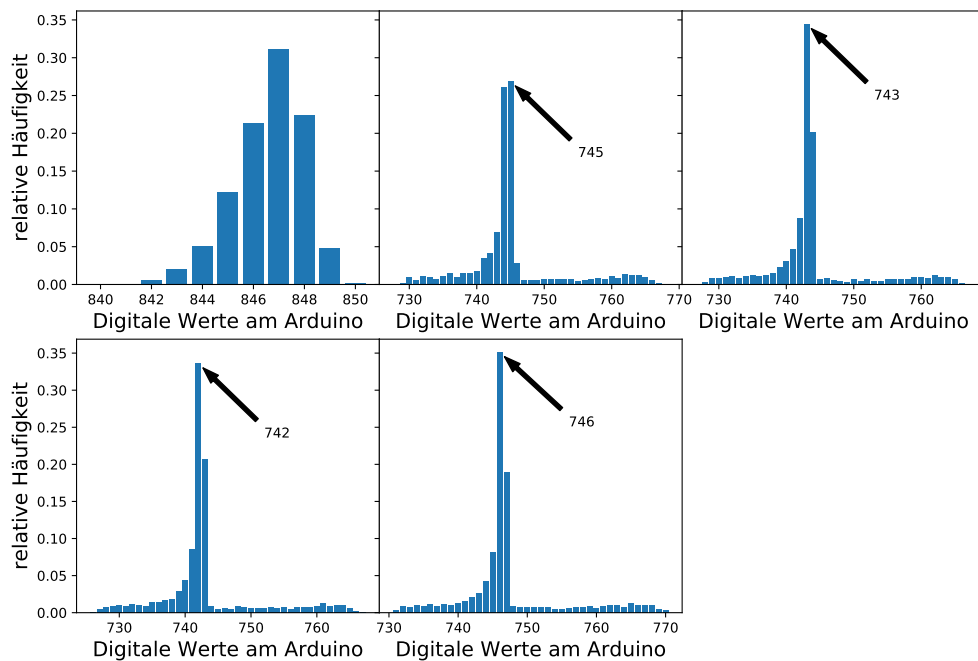


Abbildung B.133: Histogramme der Messung 16 ohne angeschlossener Kammer.

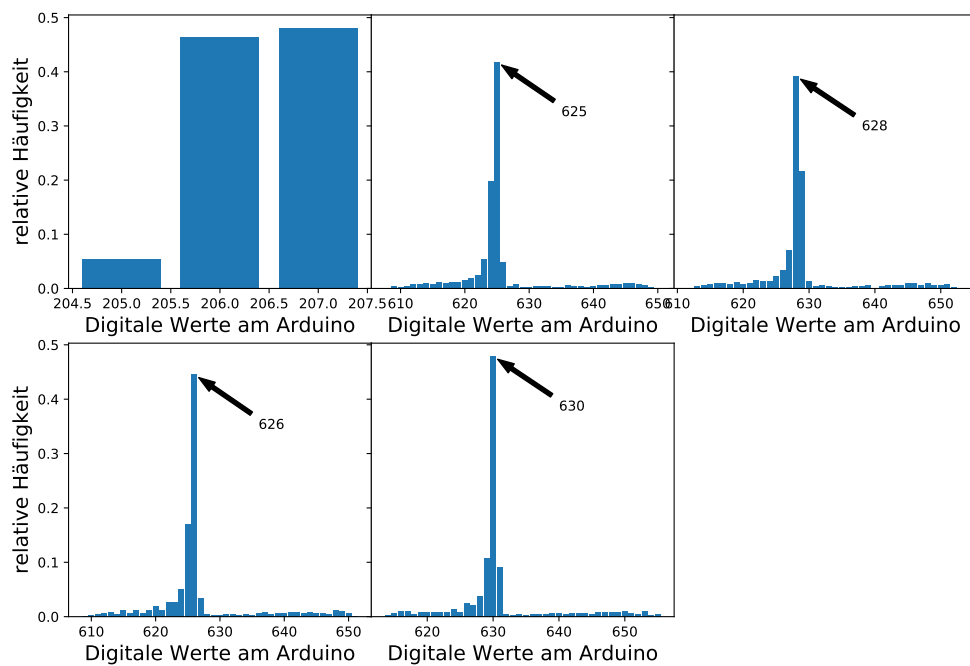


Abbildung B.134: Histogramme der Messung 1 des Rohrs.



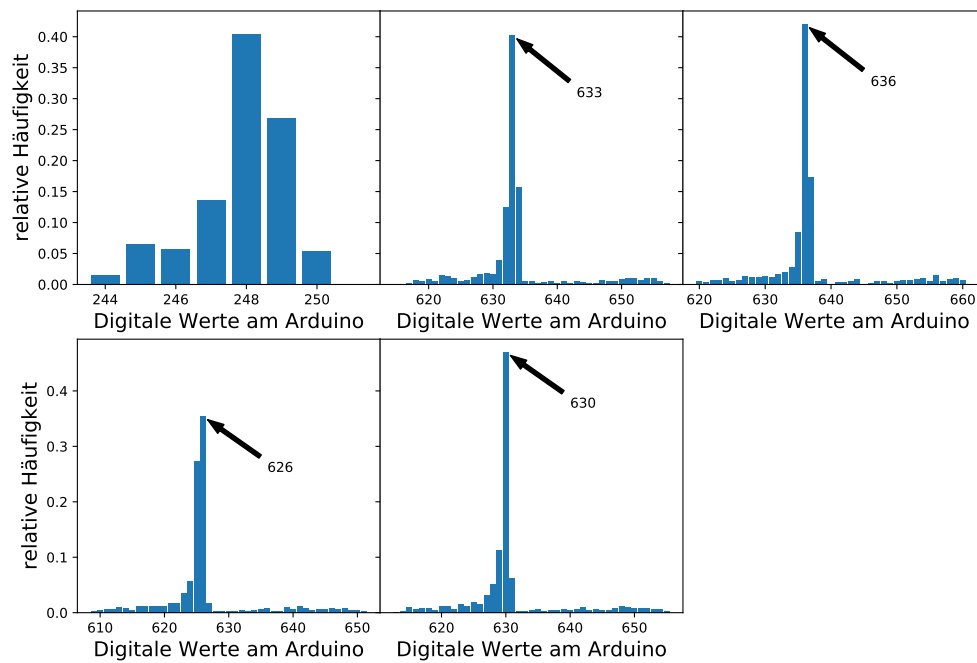


Abbildung B.135: Histogramme der Messung 2 des Rohrs.

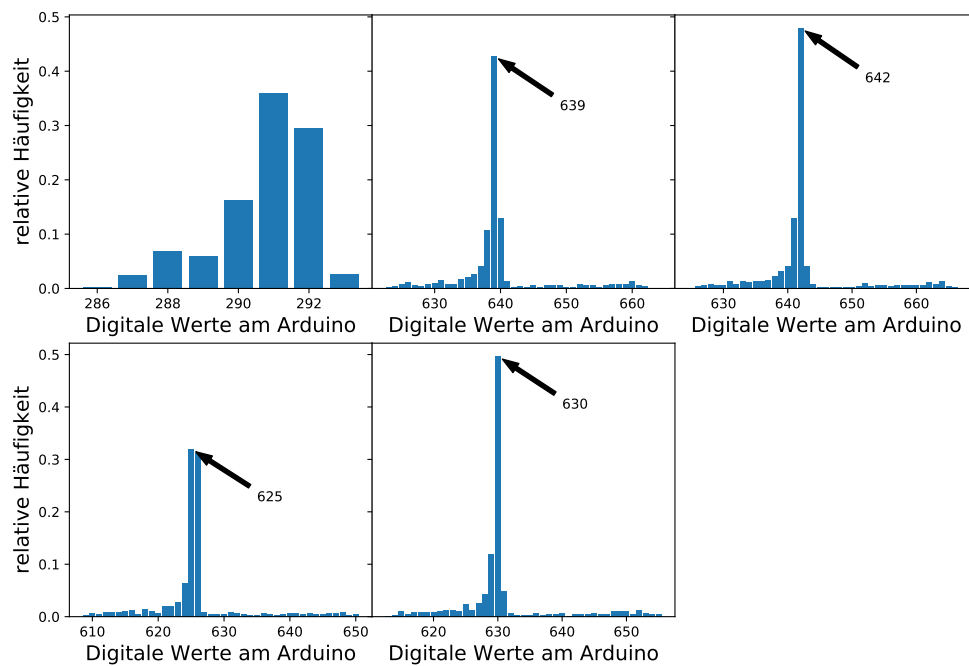


Abbildung B.136: Histogramme der Messung 3 des Rohrs.

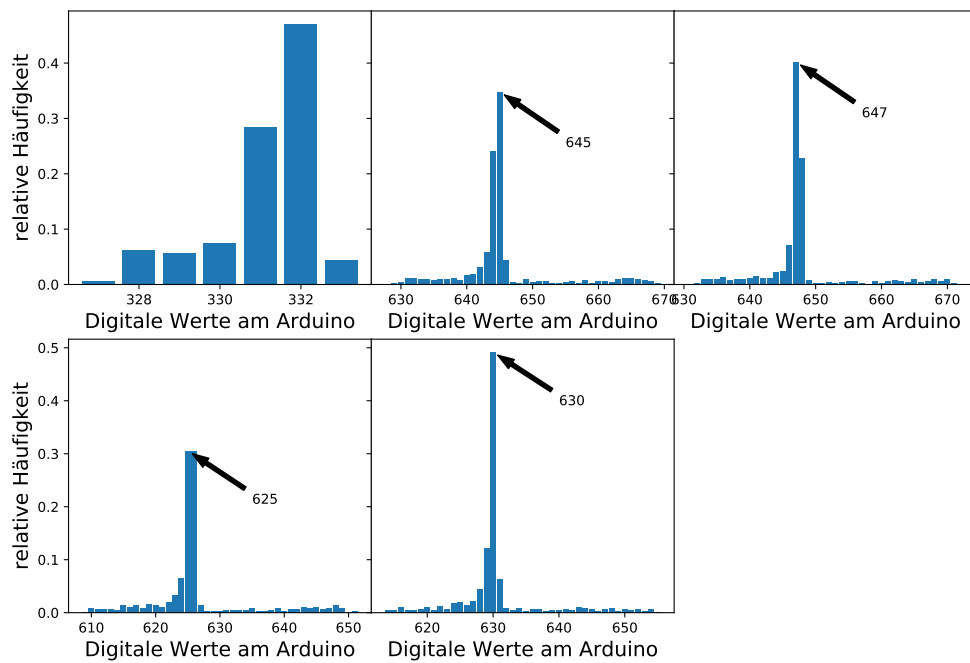


Abbildung B.137: Histogramme der Messung 4 des Rohrs.

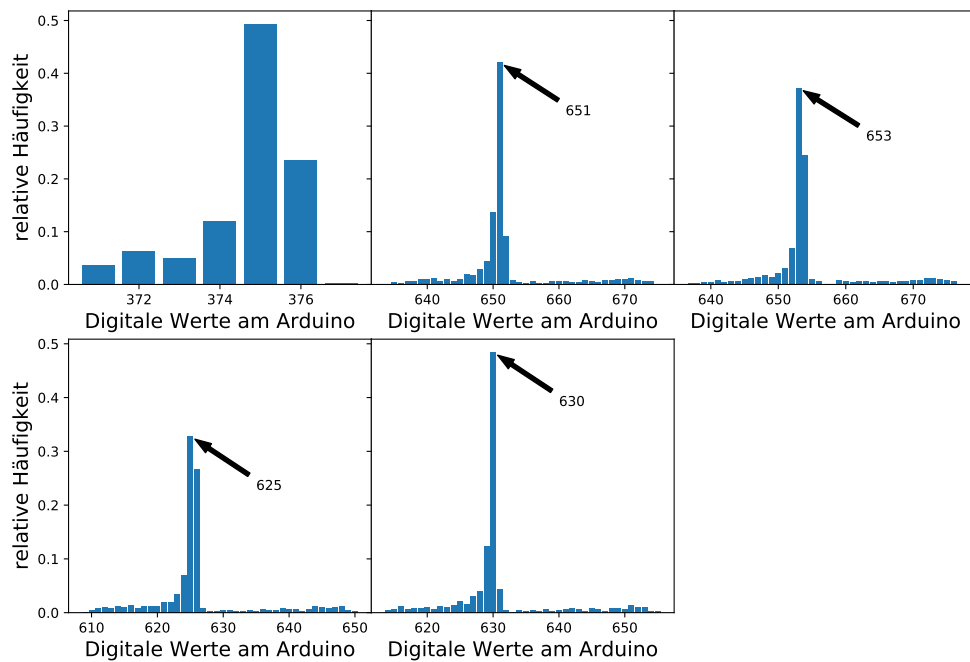


Abbildung B.138: Histogramme der Messung 5 des Rohrs.

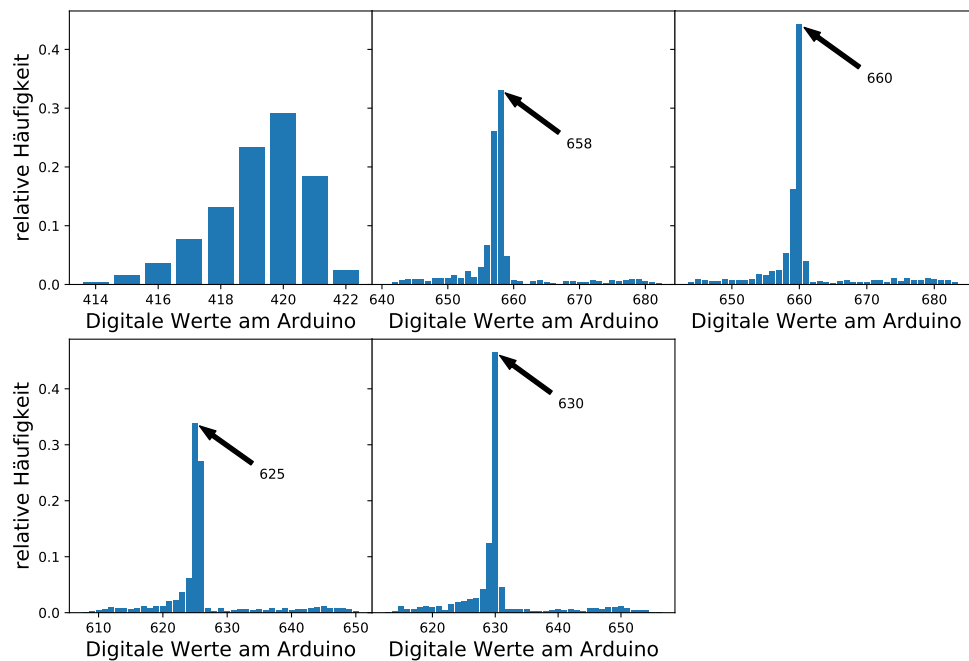


Abbildung B.139: Histogramme der Messung 6 des Rohrs.

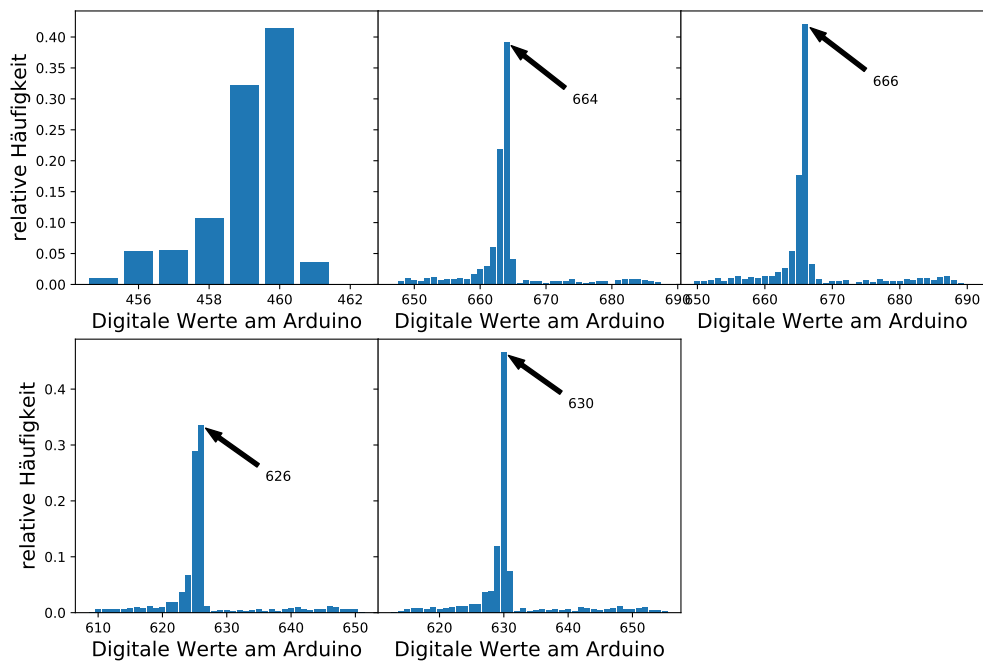


Abbildung B.140: Histogramme der Messung 7 des Rohrs.

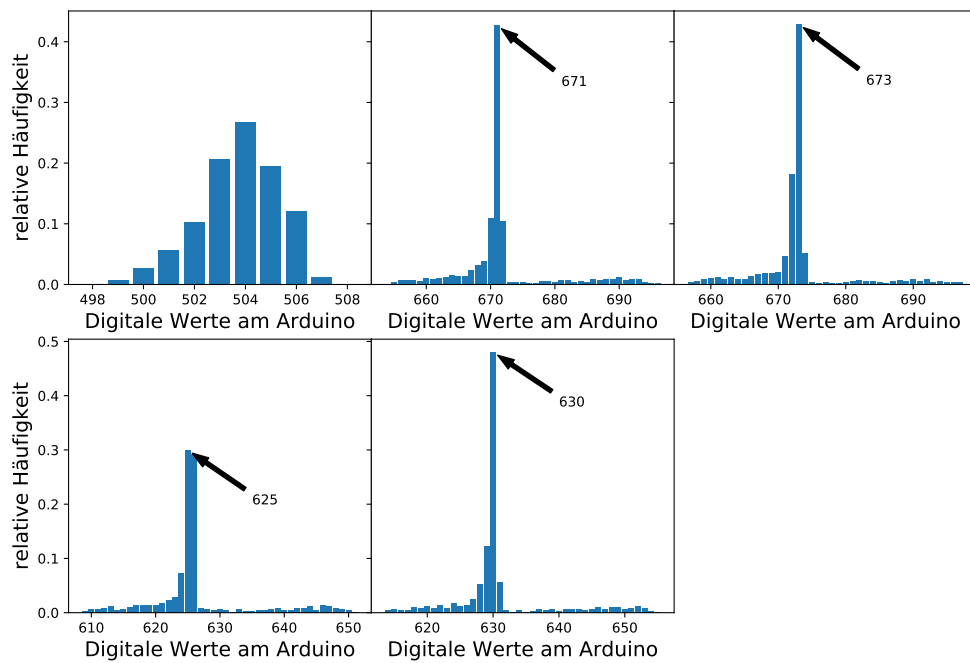


Abbildung B.141: Histogramme der Messung 8 des Rohrs.

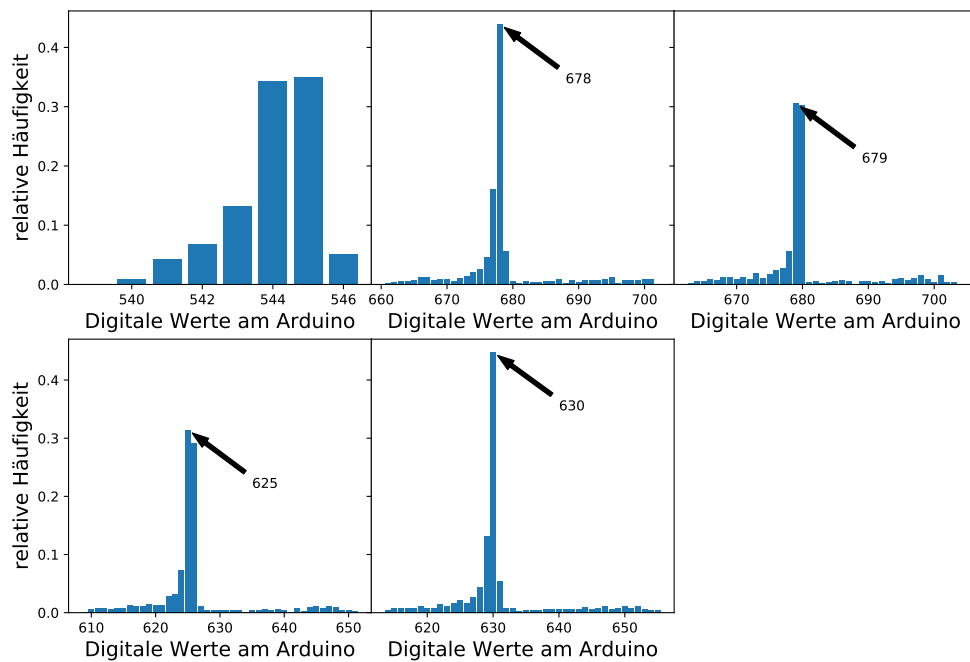


Abbildung B.142: Histogramme der Messung 9 des Rohrs.

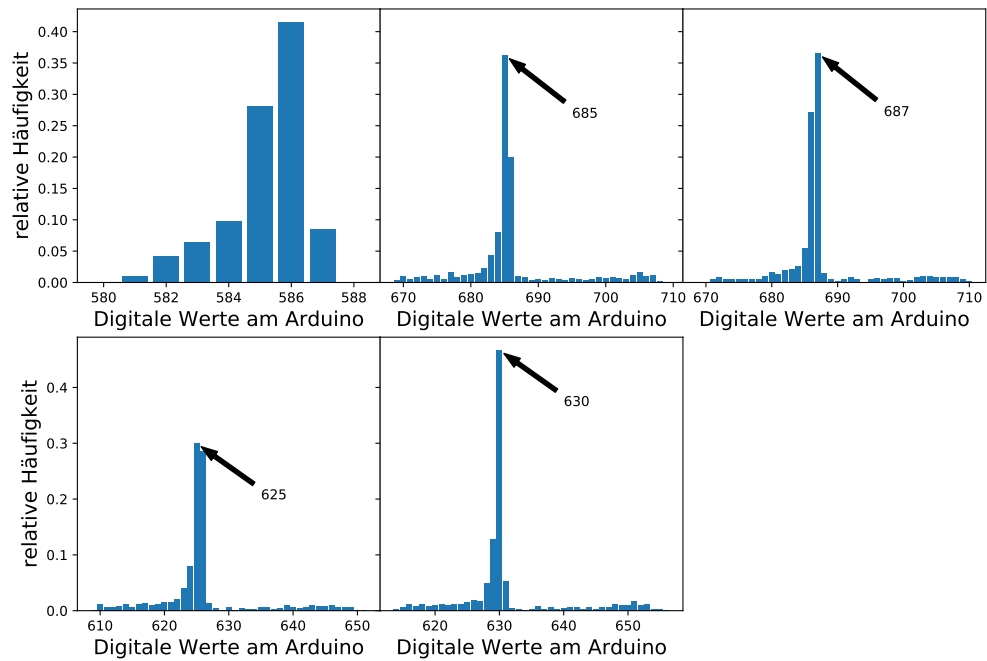


Abbildung B.143: Histogramme der Messung 10 des Rohrs.

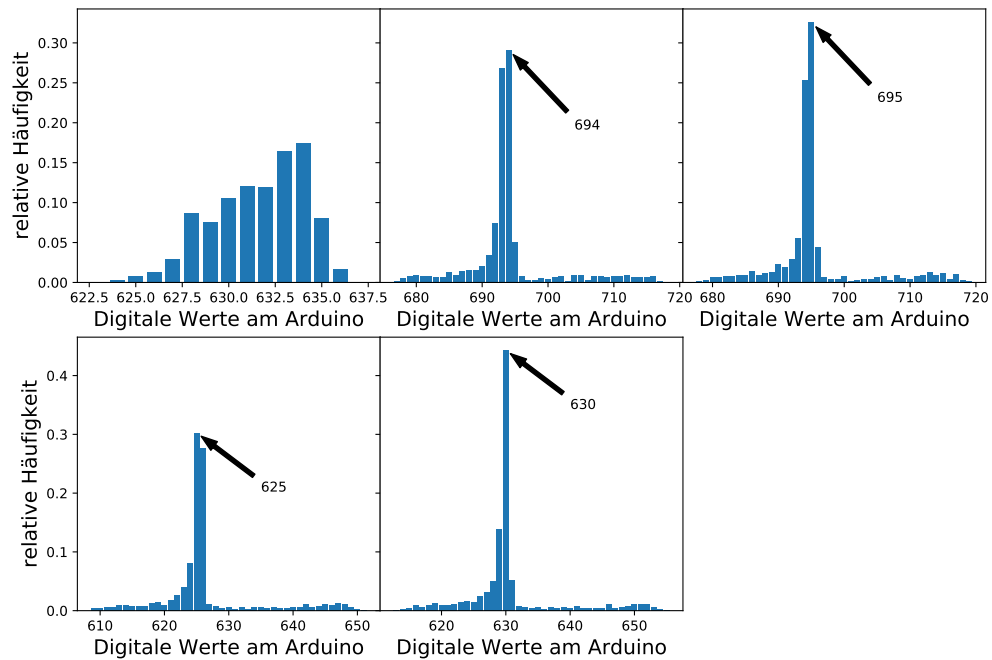


Abbildung B.144: Histogramme der Messung 11 des Rohrs.

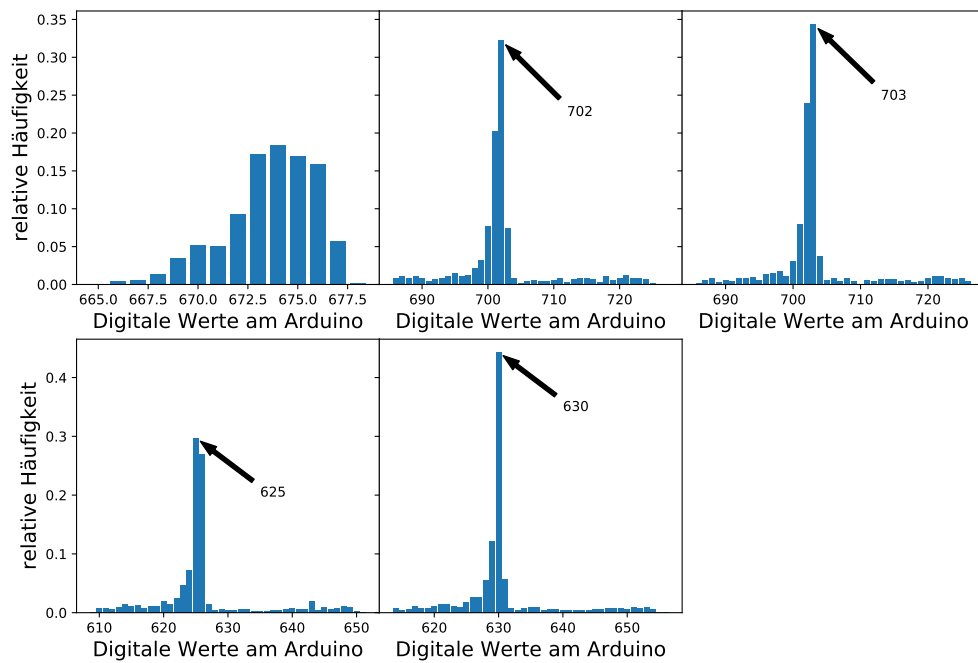


Abbildung B.145: Histogramme der Messung 12 des Rohrs.

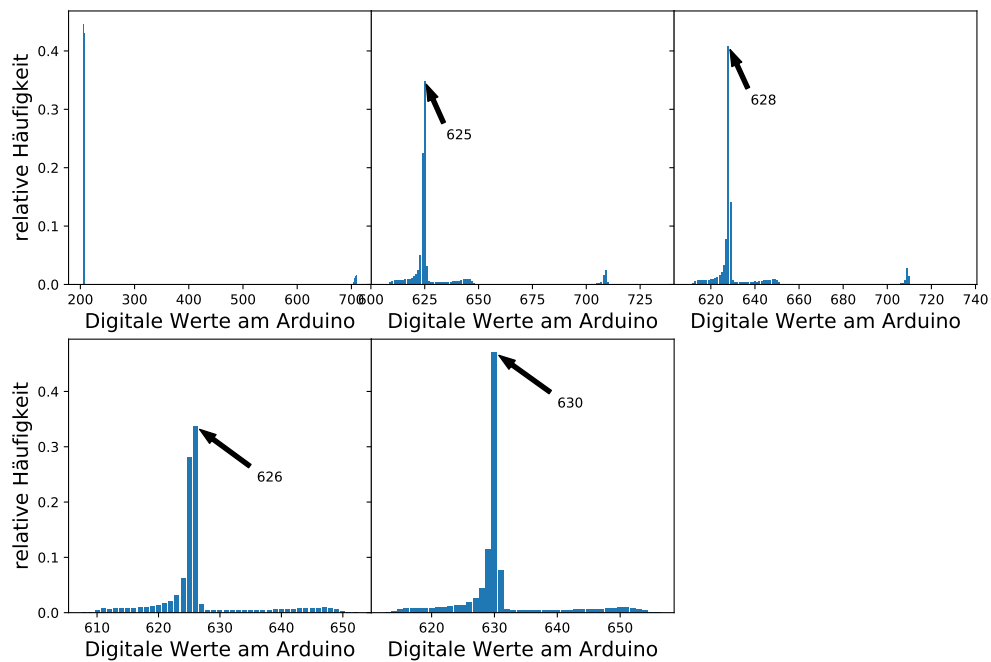


Abbildung B.146: Histogramme der Messung 13 des Rohrs.

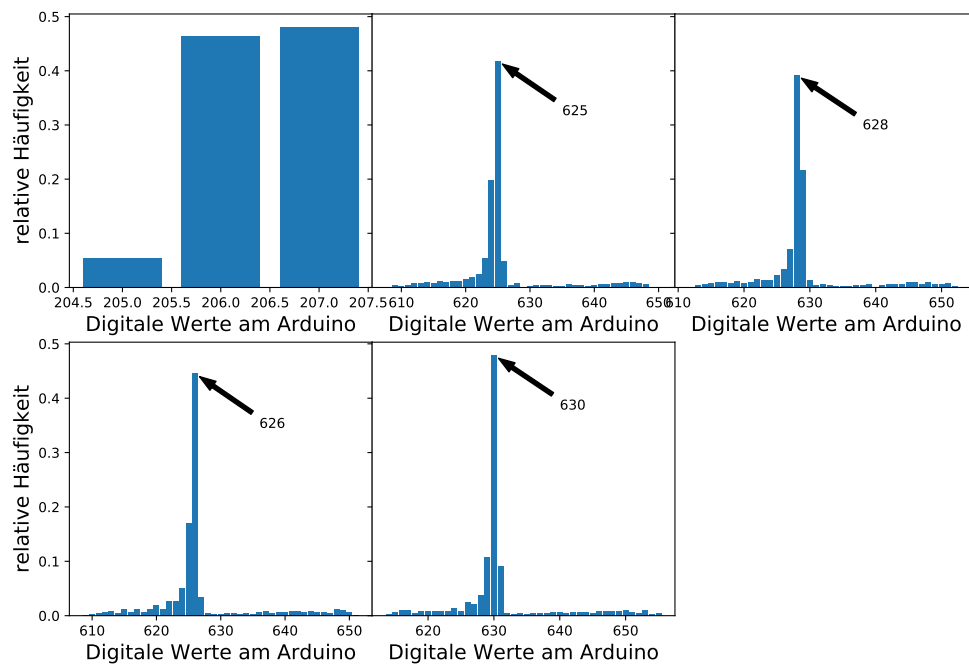


Abbildung B.147: Histogramme der Messung 14 des Rohrs.

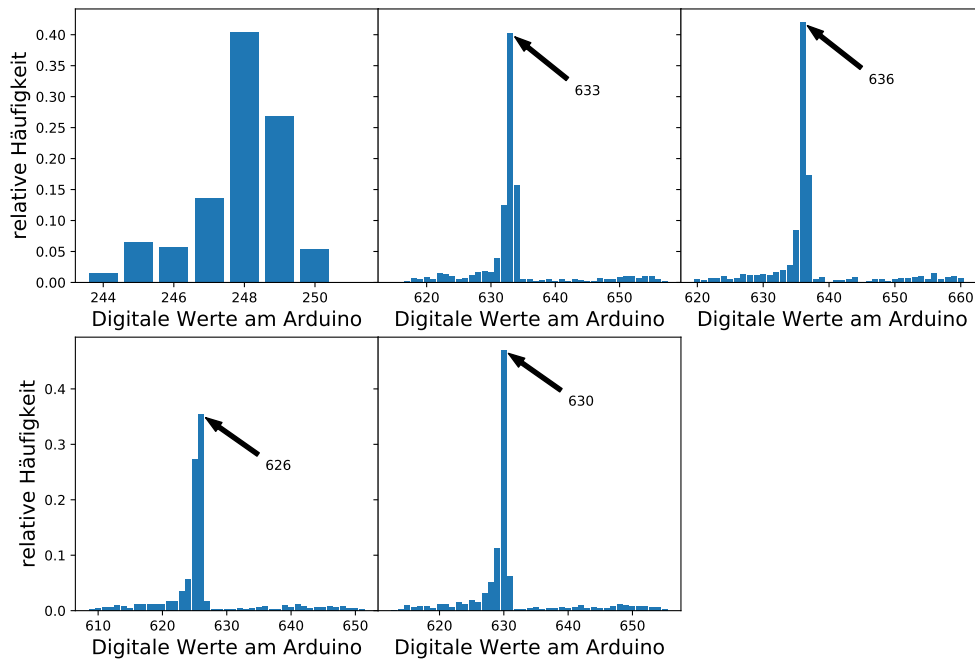
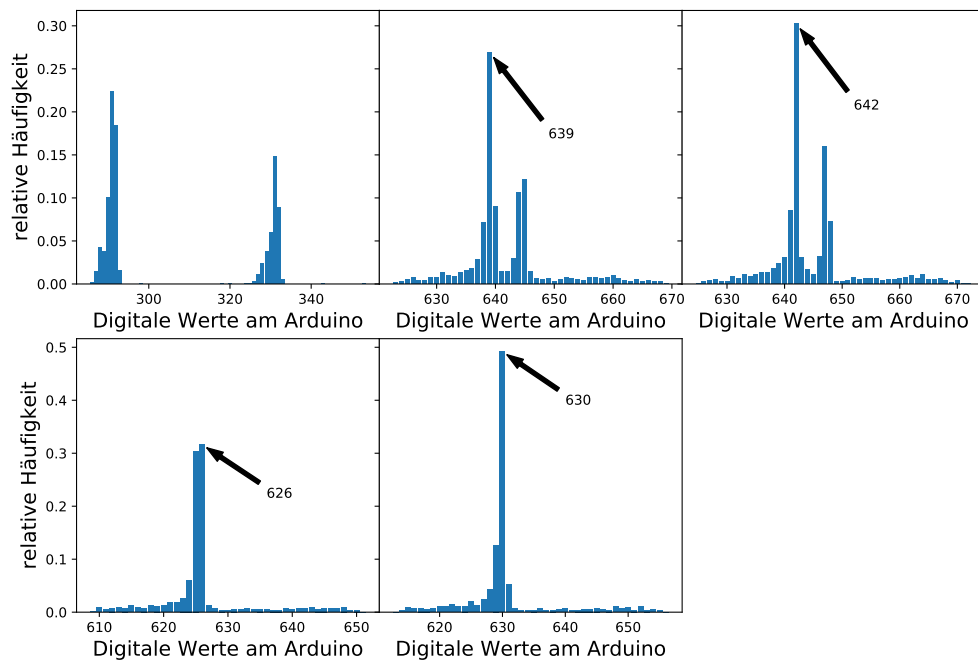


Abbildung B.148: Histogramme der Messung 15 des Rohrs.



**Abbildung B.149:** Histogramme der Messung 16 des Rohrs.



## B.4 Messung zum Überdruckabbau

### B.4.1 Sättigungsdrücke

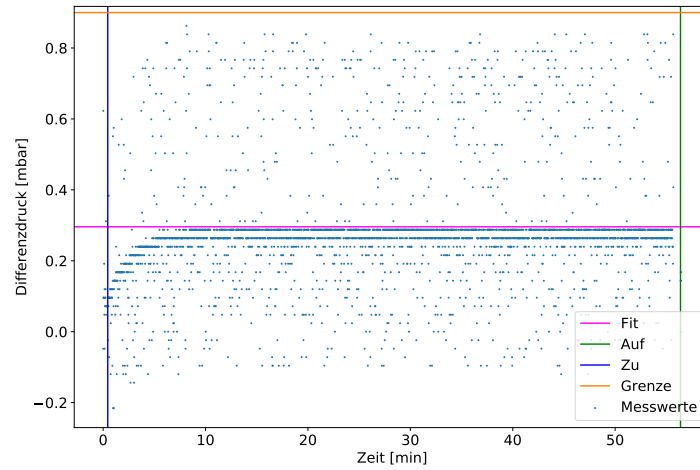


Abbildung B.150:  $F = (2,27 \pm 1,00) \frac{1}{h}$ ,  $A = (0,29 \pm 0,00) \text{ mbar}$

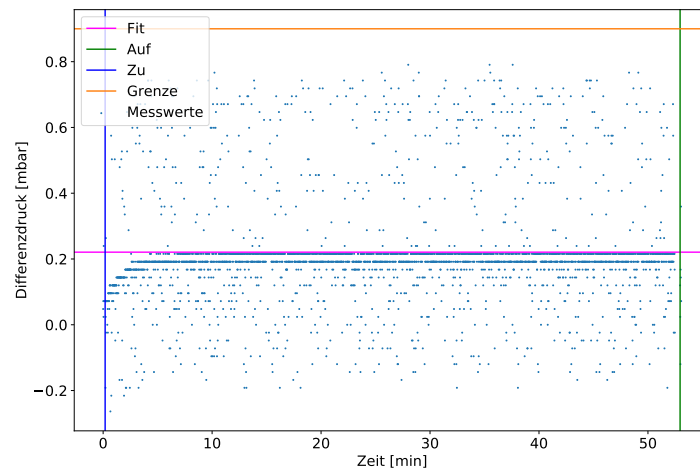


Abbildung B.151:  $F = (1,19 \pm 1,00) \frac{1}{h}$ ,  $A = (0,22 \pm 0,00) \text{ mbar}$

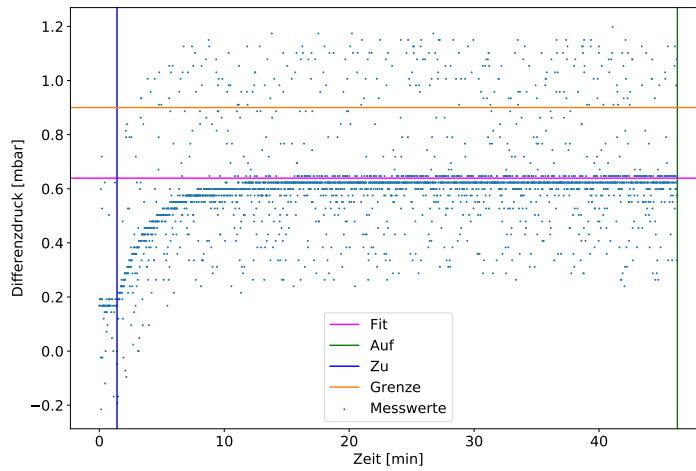


Abbildung B.152:  $F = (6,82 \pm 1,00) \frac{1}{h}$ ,  $A = (0,63 \pm 0,00) \text{ mbar}$

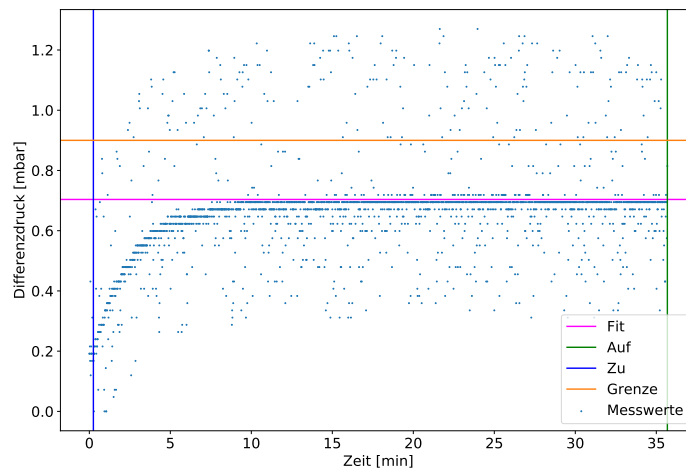


Abbildung B.153:  $F = (7,66 \pm 1,00) \frac{1}{h}$ ,  $A = (0,70 \pm 0,00) \text{ mbar}$

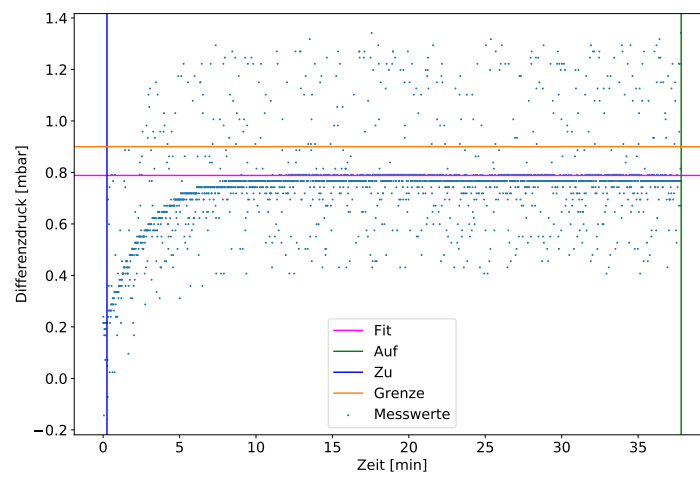


Abbildung B.154:  $F = (8,62 \pm 1,00) \frac{1}{h}$ ,  $A = (0,79 \pm 0,00) \text{ mbar}$

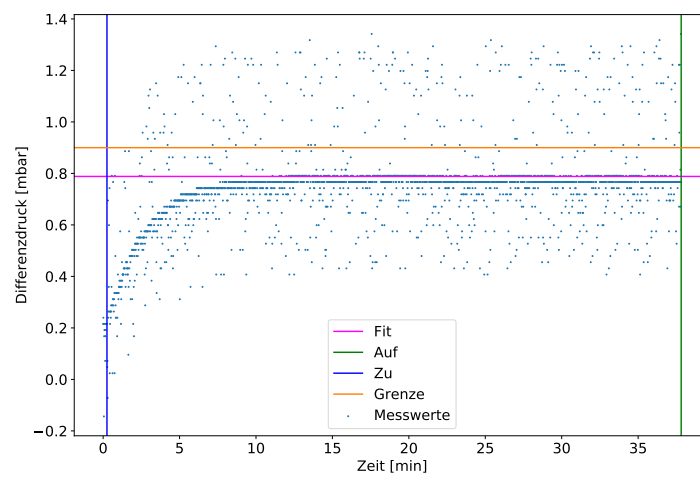


Abbildung B.155:  $F = (9,70 \pm 1,00) \frac{1}{h}$ ,  $A = (0,89 \pm 0,00) \text{ mbar}$



## Literatur

- [1] Internetseite der GSI, [https://www.gsi.de/forschungbeschleuniger/fair/die\\_maschine](https://www.gsi.de/forschungbeschleuniger/fair/die_maschine), Letzter Zugriff: 14.11.2021.
- [2] Technical Design Report for the CBM Transition Radiation Detector (TRD), Techn. Ber., The CBM Collaboration, **2018**.
- [3] Internetseite des CBM-Experiments, <https://www.cbm.gsi.de/detectors>, Letzter Zugriff: 14.11.2021.
- [4] A. Andronic, J. P. Wessels, **2011**, DOI 10.1016/j.nima.2011.09.041.
- [5] J. Schnapka, Diss., **1998**.
- [6] C. Bergmann, Diss., **2014**.
- [7] L. R. Walter Blum, Werner Riegler, *Particle Detection with Drift Chambers*, Springer, **2008**.
- [8] Conceptual Design Review for the TRD gas system, Techn. Ber., The TRD group, **2021**.
- [9] W. Nolting, *Grundkurs Theoretische Physik 3*, Springer Berlin Heidelberg, **2013**.
- [10] D. Petrascheck, F. Schwabl, *Elektrodynamik*, Springer Berlin Heidelberg, **2015**.
- [11] H. Sandmaier, *Skalierung der physikalischen Gesetze und mathematischen Modellierung*, Springer Berlin Heidelberg, **2019**.
- [12] W. Nolting, *Grundkurs Theoretische Physik 4/2*, Springer Berlin Heidelberg, **2016**.
- [13] M. Bartelmann, B. Feuerbacher, T. Krüger, D. Lüst, A. Rebhan, A. Wipf, *Theoretische Physik 4 | Thermodynamik und Statistische Physik*, Springer Berlin Heidelberg, **2018**.
- [14] <https://blog.first-sensor.com/de/piezoresistiver-effekt>, Letzter Zugriff: 19.10.2021.
- [15] CTE 7000 / CTU 7000 Series Miniature pressure transmitters, Datenblatt der Drucksensoren, First Sensor.
- [16] SQ223-18093 / 3005302 Fully analog pressure transducers, Datenblatt der Drucksensoren, First Sensor.
- [17] GFM Mass Flow Meters, Auszug aus dem Produktkatalog der Firma Aalborg, Aalborg Instruments.
- [18] Operating Manual GFM Mass Flow Meters, Bedienungsanleitung für Massen-Flussmessgeräte der Firma Aalborg, Aalborg Instruments, **2021**.


- 
- [19] Instruction manual red-y smart series, Anleitung für Flussmessgeräte der Firma vögtlin Instruments AG, Vögtlin Instruments Ag.
  - [20] Kleinstmengen-Schwebekörper-Durchflussmesser für Flüssigkeiten und Gase, Datenblatt der Kleinstmengen-Schwebekörper-Durchflussmesser der Firma Kobold Messring GMBH, Kobold Messring GMBH.
  - [21] Orbisphere Model 31xxx Electrochemical Sensors Installation and Maintenance Manual, Bedienungsanleitung der Elektrochemischen Sensoren mit den Kennungen 31xxx der Firma Hach, Hach, **2009**.
  - [22] Arduino, Arduino Uno Rev3, <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3/>, Letzter Zugriff: 07.10.2021.
  - [23] Arduino, analogRead(), <https://www.arduino.cc/reference/de/language/functions/analog-io/analogread/>, Letzter Zugriff: 07.10.2021.
  - [24] Arduino, Digital Pins, <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/Foundations/DigitalPins>, Letzter Zugriff: 07.10.2021.
  - [25] Faltenbalgventile, Auszug aus dem Swagelok Produkt Katalog, Swagelok Compsny.
  - [26] Klein-Magnetventil, Auszug aus dem Produktkatalog der Firma AVS Römer, AVS-Römer GmbH.
  - [27] User Guide: 4 Channel 5V Optical isolated Relay Module, Bedienungsanleitung eines 5V 4-Kanal-Relais, Handson Technologys.
  - [28] R. Weber, Masterarbeit, in Veröffentlichung.
  - [29] Nach privater Kommunikation mit Daniel Bonaventura.
  - [30] Nach privater Kommunikation mit Philipp Kähler.

## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über Entwicklung und Inbetriebnahme eines Gassystems  
zur Untersuchung des Verhaltens einer CBM-TRD Kammer unter Gasfluss selbstständig von mir und ohne fremde Hilfe verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind. Mir ist bekannt, dass es sich bei einem Plagiat um eine Täuschung handelt, die gemäß der Prüfungsordnung sanktioniert werden kann.

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

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit oder Teile daraus nicht anderweitig als Prüfungsarbeit eingereicht habe.

29.11.2021       
(Datum, Unterschrift)