Aufbau und Charakterisierung eines Gassystems für den CBM TRD

Bachelorarbeit im Studiengang Physik

Felix Fidorra

29.9.2015

Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Erster Gutachter:	Prof. Dr. Johannes P. Wessels
Zweiter Gutachter:	PD Dr. Christian Klein-Bösing

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **5**

2 Motivation **6**

3 Theorie **7**

3.1 Übergangsstrahlung . . . 7

3.2 Vieldrahtkammer . . . 8

3.2.1 Aufbau . . . 8

3.2.2 Funktionsweise . . . 9

3.3 TRD Detektor . . . 10

3.4 Gasfluss . . . 10

3.4.1 Gesetz von Hagen-Poiseuille . . . 11

3.4.2 Boyle-Mariotte'sches Gesetz . . . 11

3.4.3 Strömung nach Bernoulli und Venturi . . . 11

4 Geräte **13**

4.1 Flussregler . . . 13

4.2 Drucksensor . . . 14

4.3 Blasenzähler . . . 15

4.4 Schaltbares Ventil . . . 15

4.5 Orbisphere . . . 16

4.6 Aalborg GFM-Massenflussmesser . . . 19

4.6.1 Umrechnung von Gasflüssen . . . 19

4.6.2 Kalibration . . . 20

4.7 Gaslecksucher . . . 21

5 Aufbau des Gassystems **22**

5.1 Gassystem . . . 22

5.2 Messelektronik und Arduino . . . 23

5.2.1 Funktionen des Arduino . . . 23

5.2.2 Programmierung allgemein . . . 24

5.2.3 Aufbau der Elektronik . . . 27

5.2.4 Für das Gassystem verwendete Programme . . . 28

6 Charakterisierung des TRDs **32**

6.1 Druckabfall . . . 33

6.2 Ausspülen 36
6.3 Belastungstest 38

7 Zusammenfassung **47**

8 Anhang **48**
8.1 Flussregler 48
8.1.1 Programme 48
8.1.2 Drucksensoren kalibrieren 50

Literaturverzeichnis **58**

1 Einleitung

Eines der großen Gebiete der Physik befasst sich mit der starken Wechselwirkung. Mittels der starken Wechselwirkung können die Kräfte im Atomkern beschrieben werden. Ähnlich den Aggregatzuständen normaler Materie werden auch zwischen den Bestandteilen der Atomkerne verschiedene Phasenübergänge erwartet. Um diese Übergänge untersuchen zu können, werden heutzutage Schwerionenbeschleuniger genutzt. Durch Kollisionen schwerer Atomkerne sollen entsprechende Dichten und Temperaturen erreicht werden [1].
Versuche in diesem Bereich werden zur Zeit am RHIC in den USA und am LHC in der Schweiz durchgeführt. Weitere Versuche sind ebenfalls an der GSI in Darmstadt geplant. Zu diesem Zweck wird der FAIR-Teilchenbeschleuniger gebaut, eine Anlage zur Beschleunigung von Protonen und Ionen.
Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll ein Prototyp eines Übergangsstrahlungsdetektors untersucht werden, welcher beim CBM-Experiment am FAIR zum Einsatz kommen soll. Bei dem untersuchten Detektor handelt es sich um einen Gasdetektor.

2 Motivation

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird ein Prototyp der TRD-Kammern auf ihr Verhalten im Gasfluss und ihre mechanische Belastbarkeit untersucht. Es sollen im Experiment mehrere Gasdetektoren mit einer seriellen Zuleitung versorgt werden. Hierfür müssen einige Eigenschaften der Kammer untersucht werden.
Kommt es zu Verunreinigungen durch Sauerstoff oder Luftfeuchtigkeit in den Kammern, kann dies zu Signalverlusten führen. Daher muss beim Bau einer Kammer eine große Dichtigkeit gewährleistet sein. Es muss ebenfalls sichergestellt werden, dass die Kammer nicht mit der Zeit undicht wird. Das Eintrittsfenster des Detektors muss für die untersuchte Strahlung möglichst transparent sein, um möglichst viel Strahlung messen zu können. Die in Münster gebauten Prototypen verfügen über eine *Kapton*-Folie als Eintrittsfenster. Diese Folie ist empfindlich gegenüber Druckänderungen und damit verbundenen Scherspannungen, verursacht durch Ein- oder Auswölbungen des Fensters. Da schon Druckänderungen im Bereich von wenigen mbar Einfluss auf die Kammer nehmen, führen bereits wetterbedingte Druckänderungen zu Belastungen. Auf Basis von Daten zur wetterbedingten Druckänderungen soll die Kammer unter kontrollierten Umständen unter Druck gebracht werden und so die Materialbelastung eines längeren Betriebszeitraumes simuliert werden. Sollte das Material deutliche Belastungsspuren zeigen, wird erwartet, dies an einem stärkeren Sauerstoffeintrag zu erkennen. Da mehrere Kammern miteinander verbunden sind, würde eine geschädigte Kammer nicht nur sich selbst, sondern auch die ihr in der Gaslinie nachfolgenden Kammern kontaminieren und die Qualität der Messergebnisse beeinflussen.
Des Weiteren ist es wichtig zu wissen, wie groß der Druckverlust durch Flusswiderstand an einer Kammer ist. Kommt es zu hohen Druckverlusten an den einzelnen Detektoren, so werden die Kammern, die am Anfang der Versorgungslinie liegen, stark belastet. Ist der Druckverlust bekannt, kann abgeschätzt werden, wie viele Kammern maximal hintereinander versorgt werden können.
Ferner wird noch untersucht, wie lange eine mit Luft gefüllte Kammer mit einem konstanten Fluss Argon-CO_2-Gemisch ausgespült werden muss, damit ein Sauerstoffanteil erreicht wird, der Messungen ermöglicht.

3 Theorie

Um die Funktionsweise eines Übergangsstrahlungsdetektors zu verstehen, werden einige grundlegende Kenntnisse benötigt. Im Folgenden wird auf den physikalischen Effekt der Übergangsstrahlung eingegangen und auf den Detektor, welcher sich diesen zu Nutze macht. Einige Zusammenhänge zum Verhalten von Gasen werden angeführt, auf Basis derer im weiteren Verlauf die für diese Arbeit relevanten Abhängigkeiten abgeleitet werden.

3.1 Übergangsstrahlung

Übergangsstrahlung (im Weiteren TR genannt, von *Transition Radiation*) kann entstehen, wenn ein geladenes Teilchen eine Grenze zwischen zwei Materialien mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten mit ausreichender Geschwindigkeit überschreitet.
Dies lässt sich dadurch erklären, dass ein Teilchen im angrenzenden Material mit abweichender Dielektrizität eine Spiegelladung induziert. Da sich das Teilchen in Bewegung befindet, handelt es sich um einen veränderlichen Dipol, welcher beim Durchlaufen der Grenzfläche verschwindet. Bei diesem Vorgang kann der Dipol ein Photon aussenden, dessen Energie abhängig von der Differenz der Dielektrizitätskonstanten und dem Lorentz-Faktor γ des passierenden Teilchens ist (siehe Abbildung (3.1)) [2].

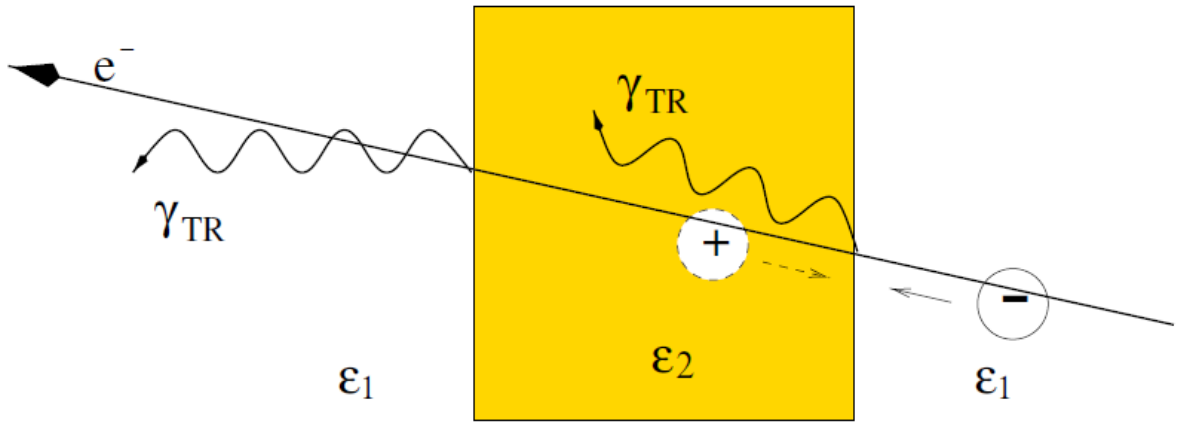


Abbildung 3.1: Das geladene Teilchen, in diesem Fall ein Elektron, durchquert zunächst ein Medium mit der Dielektrizitätskonstante ϵ_1 und durchdringt dann ein Medium mit der Dielektrizitätskonstante ϵ_2. Bei den Übergängen kann das Elektron ein Photon abstrahlen. Sowohl die Intensität, als auch der Abstrahlwinkel sind abhängig vom Lorentz-Faktor γ [2].

Die Energie der Übergangsstrahlung ist abhängig von:

$$W = \frac{\alpha\hbar}{3} \cdot \frac{(\omega_2 - \omega_1)^2}{\omega_2 + \omega_1} \cdot \gamma. \tag{3.1}$$

Hierbei ist $\alpha \approx 1/137$ die Feinstrukturkonstante; $\hbar$ das Planck'sche Wirkungsquantum; ω_2 und ω_1 sind materialspezifische Konstanten, die von der Dielektrizitätszahl des Mediums abhängen [2].

Da die Übergangsstrahlung abhängig vom relativistischen γ-Faktor ist, birgt sich in ihr die Möglichkeit der Teilchenidentifikation bei geladenen Teilchen. Viele Teilchendetektoren sind nur in der Lage, den Energieverlust $\mathrm{d}E/\mathrm{d}x$ des untersuchten Teilchens zu ermitteln. Bewegt sich ein Teilchen mit einer relativistisch nicht mehr vernachlässigbaren Geschwindigkeit, so ist der Impuls gegeben durch:

$$p = \gamma m v. \tag{3.2}$$

Hierbei ist p der Impuls; γ die relativistische Korrektur; m die Ruhemasse und v die Geschwindigkeit[3]. Da der spezifische Energieverlust von hochenergetischen Elektronen und Pionen im minimal ionisierenden Bereich recht ähnlich ist, macht dies die Unterscheidung von Elektronen und Pionen sehr schwer. Da die TR abhängig vom Lorentz-Faktor der untersuchten Teilchen ist, lassen sich mit ihrer Hilfe Elektronen und Pionen sehr gut unterscheiden[5]. Da das Teilchen bei der Messung nicht vernichtet oder drastisch abgebremst wird, kann es noch weiter untersucht werden, beispielsweise mittels eines Kalorimeters.

3.2 Vieldrahtkammer

Eine Vieldrahtkammer (im Weiteren MWPC, von *Multi Wire Proportional Chamber*) ist ein Teilchendetektor, dem das Prinzip eines Zählrohres zugrunde liegt. Die Verwendung einer Vieldrahtkammer ermöglicht die Rekonstruktion der Flugbahn eines geladenen Teilchens.

3.2.1 Aufbau

Die MWPC ist aus einer *Kathoden-Pad-Plane* aufgebaut, vor welcher sich die Anodendrähte befinden. Vor den Anodendrähten befinden sich die Kathodendrähte, welche in dem hier benutzten Aufbau parallel zu den Anodendrähten liegen. Das Eintrittsfenster fungiert gleichzeitig als Kathode (siehe Abbildung (3.2)). Die Kammer ist mit einem schweren Edelgas gefüllt (beispielsweise *Argon* oder *Xenon*) und einem Löschgas (beispielsweise CO_2 oder CH_4). Das Löschgas unterbindet Spannungsdurchschläge in der Kammer, bedingt durch die Ionisation des Gases. Im hier betrachteten Fall sind die *Kathoden-Pad-Plane* und die Kathodendrähte geerdet [4].

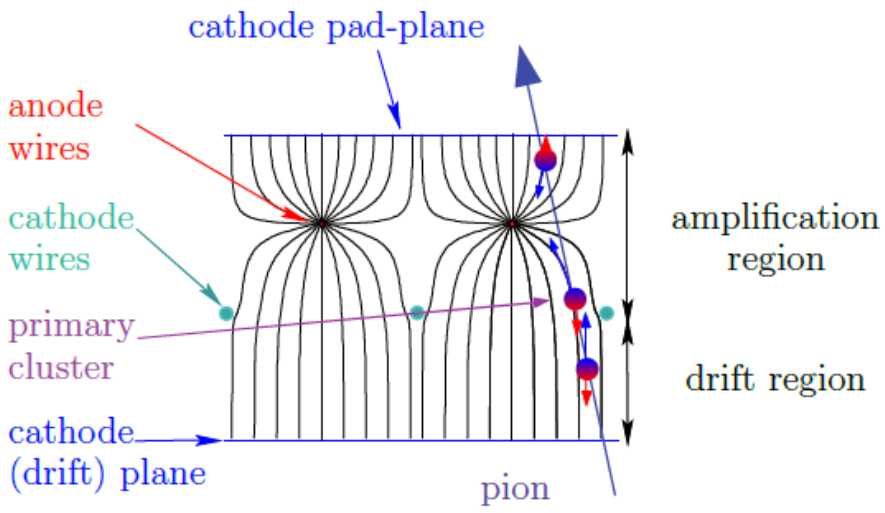


Abbildung 3.2: Schematische Zeichnung der MWPC. In schwarz sind die elektrischen Feldlinien eingezeichnet. In blau wird ein eintreffendes Pion dargestellt [4].

3.2.2 Funktionsweise

Trifft ein geladenes Teilchen auf Materie, verliert es über elektromagnetische Wechselwirkung Energie. Im Fall von hochenergetischen Teilchen reicht diese Energie aus, um die Materie zu ionisieren. Auf die ionisierten Teilchen wirkt die Kraft des elektrischen Feldes zwischen Anoden und Kathoden. Die Teilchen bewegen sich entsprechend ihrer Ladung entlang der Feldlinien.
Die Kammer kann durch das Anlegen unterschiedlich großer Spannungen auf verschiedene Art und Weise betrieben werden. Wird keine oder nur eine sehr geringe Spannung angelegt, so rekombinieren die Teilchen, bevor sie voneinander getrennt werden. Wird die Kammer im Ionisationsbereich betrieben, werden Ion und Elektron getrennt und detektiert. Wenn die Spannung weiter erhöht wird, wird der Proportionalbereich erreicht. Hier werden Ion und Elektron voneinander getrennt und erhalten genügend Energie, um weitere Ionisationsprozesse anzuregen. Diese Teilchenlawinen sind gut detektierbar. Bei noch höherer Spannung wird der Geiger-Müller-Bereich erreicht. Jedes eintreffende Teilchen löst eine sehr große Anzahl von nachfolgenden Ionisationen aus. Die Kammer ist in der Lage festzustellen, dass ein Teilchen das Gasvolumen oder Teile dessen durchdrungen hat. Weitere Informationen gehen allerdings verloren. Der Proportionalbereich ist häufig das Mittel der Wahl.
Um auf die Teilchenbahn zu schließen, werden die aus der *Pad-Plane* resultierenden Signale ausgewertet. Mittels der Verteilung des Signals auf die Drähte lässt sich die Position des passierenden Teilchens bestimmen. Auf die genauere Herangehensweise soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, da sie für das weitere Verständnis der im Umfang dieser Arbeit betrachteten Probleme nicht relevant ist [4].

3.3 TRD Detektor

Um die TR zu detektieren und die Teilchen zu unterscheiden, werden Übergangsstrahlungsdetektoren (im Folgenden TRD von *Transition Radiation Detector*) genutzt. Speziell geht es um die Unterscheidung zwischen hochenergetischen Elektronen und Pionen. Aufgrund der deutlich größeren Masse der Pionen ($139,570\,\mathrm{MeV}$ [6]) gegenüber der Elektronenmasse ($0,511\,\mathrm{MeV}$ [6]) skaliert der relativistische γ-Faktor bei ähnlichen Impulsen mit dem Massenverhältnis (vergleiche Gleichung 3.2).
Die Übergangsstrahlung wird mittels eines Schaums als Radiator erzeugt. Wenn die geladenen Teilchen auf den Radiator treffen, wird bei dem Elektron im $(1-2)\,\mathrm{GeV}$ Bereich auf Grund der vielen Übergänge Übergangsstrahlung erzeugt, während der Lorentz-Faktor des Pions hierfür nicht groß genug ist [4]. Nachdem die Elektronen/Pionen den Radiator durchdrungen haben, dringen sie in den Detektionsbereich ein. Eine MWPC detektiert das eindringende Teilchen. Während im Fall eines Pions nur das Teilchen selbst detektiert wird, wird im Fall eines Elektrons zusätzlich die ionisierende Übergangsstrahlung gemessen (siehe Abbildung 3.3). Im Fall eines Elektrons ist noch das Signal der TR zu sehen.

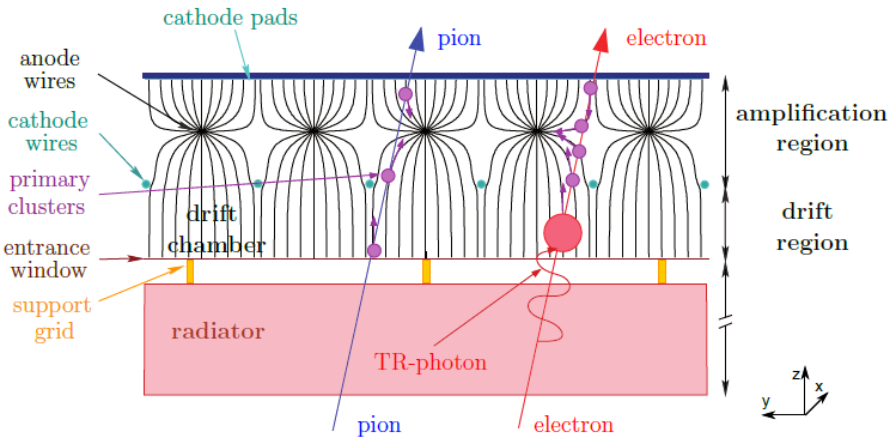


Abbildung 3.3: Der Querschnitt des TRD-Detektors. Am Radiator (rosa) wird die Übergangsstrahlung erzeugt. Hierbei ist in rot ein einfallendes Elektron dargestellt. Es erzeugt Übergangsstrahlung am Radiator. In blau ist das Pion dargestellt, welches den Radiator ohne messbare Wechselwirkung durchdringt. Die durch die TR erzeugte Ionisation ist durch einen roten Kreis gekennzeichnet[4].

3.4 Gasfluss

Da sich der folgende Teil dieser Arbeit überwiegend mit Gasflüssen auseinandersetzt, sollen einige grundlegende Überlegungen, auf deren Basis lineare Zusammenhänge angenommen wurden, kurz thematisiert werden. Da die Gase keinen extremen Umständen ausgesetzt werden und keine explizite Rechnungen mit den genannten Zusammenhängen durchgeführt werden, werden die Gase in erster Näherung als ideal und inkompressibel angenommen.

3.4.1 Gesetz von Hagen-Poiseuille

Das Gesetz von Hagen-Poiseuille beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Druck und dem daraus resultierenden Volumenstrom unter einer gegebenen Geometrie des Rohrsystems und gegebener dynamischer Viskosität des betrachteten Fluids. Hierfür müssen nur die Annahmen einer laminaren Strömung und eines Newtonschen Fluids gemacht werden. Diese Annahmen gelten in erster Näherung und für weite Teile des Gassystems. Ist eine Strömung laminar, so vermischen sich die einzelnen Schichten der Strömungen nicht untereinander; es treten keine Verwirbelungen auf. Wird ein Gas als Newtonsch bezeichnet, so handelt es sich um ein Gas, welches ein lineares Scherverhalten aufweist. Dies trifft auf die betrachteten Gase zu [7]. Es lässt sich schreiben als:

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot \eta} \frac{\Delta p}{l}. \tag{3.3}$$

Hierbei ist $\mathrm{d}V/\mathrm{d}t$ der Volumenstrom durch ein Rohr; r ist der Innenradius des Rohres; l ist die Länge des Rohres; η die dynamische Viskosität der strömenden Flüssigkeit und Δp die Druckdifferenz, die zwischen den beiden Rohrenden vorliegt.
Wird für einen Aufbau das gleiche Gas verwendet und die Geometrie des Gassystems nicht geändert, so besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Druckdifferenz und dem Volumenstrom [8].

3.4.2 Boyle-Mariotte'sches Gesetz

Das Boyle-Mariotte'sche Gesetz beschreibt das Verhalten eines Gases in Abhängigkeit vom Druck, dem zur Verfügung stehenden Volumen und der Temperatur. Es lautet:

$$\frac{pV}{N} = K. \tag{3.4}$$

p ist der Druck; V ist das zur Verfügung stehende Volumen; N die Teilchenzahl und K eine von der Temperatur abhängige Konstante.
Diese Gleichung lässt sich auch darstellen als ideale Gasgleichung:

$$pV = Nk_bT. \tag{3.5}$$

Hierbei ist $k_b = (1,3805 \cdot 10^{-23})\,\mathrm{J/K}$ die Boltzmann-Konstante [9] und T die Temperatur in Kelvin. Da die betrachteten Gase als ideale Gase angenommen werden und von einer konstanten Temperatur ausgegangen wird, wird ein proportionaler Zusammenhang zwischen der zuströmenden Gasmenge und dem Druck erwartet [8].

3.4.3 Strömung nach Bernoulli und Venturi

Strömt eine ideale Flüssigkeit durch ein Rohr mit sich verringerndem Rohrdurchmesser, so muss die Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeit zunehmen, um die Kontinuitätsgleichung nicht zu verletzen. Die Energie für die erhöhte Fließgeschwindigkeit wird von der Druckarbeit gegeben, welche die Fließgeschwindigkeit erhöht, aber den Druck abfallen lässt. Auf Basis dieser Annahmen lässt sich

die Gleichung von Bernoulli herleiten:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + p_0 = const. \tag{3.6}$$

p_0 ist der Druck der ruhenden Flüssigkeit; p ist der Staudruck und $1/2\rho v^2$ der Strömungsdruck. Bei einem konstanten Druck p_0 führt die Änderung des Strömungsdrucks direkt zu einer Änderung des Staudrucks und umgekehrt. Diese Annahmen gelten nur im Fall von laminaren Strömungen [10].

4 Geräte

Im Folgenden werden die einzelnen Geräte vorgestellt, welche im Gassystem verwendet werden. Es wird ein Überblick über die Funktionsweise gegeben und beschrieben, wie diese Geräte, falls nötig, kalibriert wurden. Geräte, die besonders trivialer Natur sind, wie beispielsweise einfache Schraubventile, werden nicht näher erläutert. Das Gassystem wurde mit *Swagelok* montiert, einem System, um Verbindungen in Gasleitungen besonders dicht zu verschließen.

4.1 Flussregler

Der benutzte Flussregler ist von der Firma *Kobold*. Eine Regelschraube verringert den Rohrdurchmesser im Inneren, wodurch sich nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille (siehe Gleichung (3.3)) der Fluss ändert. Das Gas wird durch ein Röhrchen geleitet, in dem sich eine Kugel befindet (siehe Abbildung (4.1). Die Steighöhe der Kugel steigt mit dem Gasfluss. Hierdurch kann der eingestellte Gasfluss überprüft werden. Da das Gerät jedoch auf Luft kalibriert ist und die vorhandene Skala außerdem nicht die benötigte Genauigkeit besitzt, liefert diese Skala keine zuverlässigen Werte.

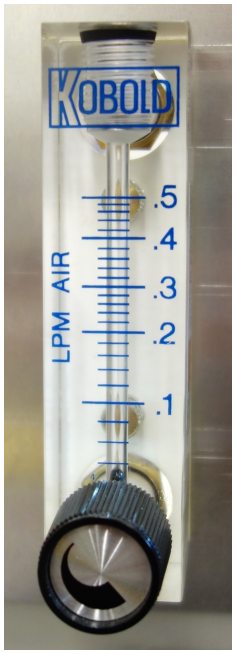


Abbildung 4.1: Der Flussregler der Firma *Kobold*. Das Stellrad regelt den Zufluss. An der Skala kann der ungefähre Fluss abgelesen werden, wobei sich hier nur ablesen lässt, ob der Fluss zu- oder abgenommen hat.

4.2 Drucksensor

Als Drucksensoren wurden zwei relative Drucksensoren der Firma *First Sensor* benutzt. Es werden Druckänderungen relativ zum Umgebungsdruck angegeben. Die Messtechnik basiert auf piezoresistiven Silizium Drucksensoren. Hierbei wird auf einer Membran ein verformungsabhängiger Piezowiderstand aufgebracht. Diese Membran wird zwischen das untersuchte Medium und Außenmedium gebracht. Diese Messtechnik ist relativ genau, günstig in der Herstellung und unempfindlich gegenüber Drücken, welche höher als ihr Nennbereich sind, allerdings stark Temperaturabhängig [11]. Da im Labor relativ gleich bleibende Temperaturen herrschen, ist dies nicht weiter problematisch.
Der Sensor misst in einem Bereich von $\pm 10\,\mathrm{mbar}$ und gibt ein Signal von $(4-20)\,\mathrm{mA}$ aus. Dies ermöglicht eine Genauigkeit der Messwerte von $\pm 0,04\,mbar$[1]. Auf die Beschaltung wird genauer in Kapitel 5.2.3 eingegangen.
Der Sensor wird am Ende eines T-Stücks montiert. Das im Gassystem verwendete Gas ist schwerer als Luft (Argon [12]). Um Sauerstoff belastete Restgase aus den Endstücken schneller ausspülen zu können, werden die Drucksensoren „über Kopf" an das System angeschlossen. (siehe Abbildung (4.2) [13].

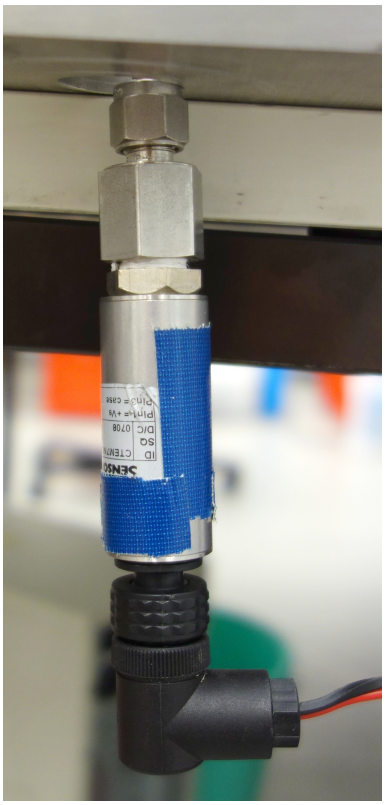


Abbildung 4.2: Der Drucksensor von *First Sensor*. Er hängt mit der Öffnung nach oben, damit Sauerstoff belastete Gase besser entweichen können. Das System mit einer *Swagelok*-Verbindung angeschlossen.

[1] Der Fehler ergibt sich aus den genauesten Werten, die mit dem Aufbau Arduino-Drucksensor gemessen werden können

4.3 Blasenzähler

Ein Blasenzähler (Englisch „Bubbler") wird in diesem Gassystem als Analogon zu einer Sicherung im Stromkreis verwendet. Wird ein zu hoher Druck auf den Eingang des Blasenzählers gegeben, so wird dieser nach außen abgelassen.
Das Funktionsprinzip basiert auf hydrostatischem Druck. Das Ende der Leitung ragt in eine Flüssigkeit, ein nicht flüchtiges Öl, hinein (Siehe Abbildung (4.3). In diesem Fall ist es *Diffelen Normal*. Es hat eine Dichte von $87\,\mathrm{g/cm^3}$ [14]. Je tiefer das Endstück in das Öl hineinreicht, desto größer ist der hydrostatische Druck, der überwunden werden muss, damit das Gas entweichen kann. Es kann angenommen werden, dass ein 1 cm höherer Ölstand einen 1 mbar höheren Druck zulässt. Eine solche Überdrucksicherung muss mittels eines T-Stücks an eine Leitung montiert werden.

Abbildung 4.3: Über den einen Anschluss wird der innere Glaskolben des Blasenzählers mit dem Gassystem verbunden. Das Ende ist in ein Öl eingetaucht. Reicht der Druck aus, so bilden sich Blasen am unteren Ende, die dann über den Ausgang entweichen können. Durch Befüllen oder Entleeren des Blasenzähler kann die Höhe des Drucks eingestellt werden, ab welcher der Druck abgelassen wird.

4.4 Schaltbares Ventil

Um das Öffnen eines Ventils mit einem Computer steuern zu können, wird ein mit Druckluft schaltbares Ventil aus dem Eigenbau des Instituts für Kernphysik genutzt. Dieses Ventil besitzt einen weiteren Gasanschluss, einen Druckluftanschluss (siehe Abbildung (4.4)). Wird auf den Druckluftanschluss Druck gegeben, so öffnet sich das Ventil.

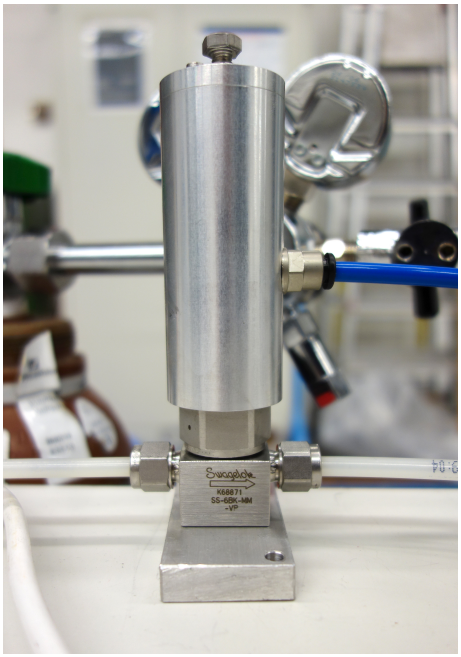


Abbildung 4.4: Das benutzte Ventil. Es wird über den blauen Schlauch mit Druckluft geregelt.

4.5 Orbisphere

Die *Orbisphere* ist ein Messgerät der *Hach GmbH* zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts in Gasen. Das Messgerät ist aufgeteilt in einen Analyse-Monitor und einen Sensorkopf. Der Analyse-Monitor ist das Modell *410* und hat drei analoge Ausgänge, die ein Signal von $(4 - 20)$ mA ausgeben. Das Gerät ist in der Lage, Informationen zum Sauerstoffgehalt im Gas, zur Gastemperatur, zum Gasdruck und zum Außendruck auszuwerten.
Es ist einstellbar, welches Signal auf welchen analogen Ausgang gelegt werden soll und wie der lineare Zusammenhang gewählt wird. Dies hat den Vorteil, dass die Genauigkeit der Messung den zu erwartenden Messwerten angepasst werden kann. Des Weiteren verfügt das Modell über einen in der Gebrauchsanweisung als *Tri-Linearen*-Zusammenhang bezeichneten Ausgabemodus. Der Lineare Zusammenhang zwischen Messwert und Strom kann für verschiedene Bereiche unterschiedlich gewählt werden (siehe Abbildung 4.5). Dies hat den Vorteil, dass ein sehr großer Messbereich ausgelesen werden kann, der Bereich, in dem die Messwerte vermutet werden, aber dennoch sehr genau vermessen wird.
Der Sensorkopf ist das Modell *K 1100*. Der Sensorkopf wird vom Gas durchflossen, wobei das zu untersuchende Gas in einen Zylinder einströmt (siehe Abbildung 4.6). Das Gas wird im Inneren entlang einer Schicht eines lumineszenten Materials geleitet, welche mittels Licht im blauen Farbspektrum angeregt wird. Das von der Lumineszenz-Schicht ausgesandte Licht ist im roten Farbspektrum. Kommt Sauerstoff in Berührung mit dem lumineszenten Material, so verringert sich die Lebensdauer des angeregten Zustands. Aus der Änderung der Lebensdauer des angeregten Zustands lässt sich auf den Sauerstoffgehalt schließen. Vorteile des optischen Verfahrens gegenüber einem chemischen Verfahren sind die Unabhängigkeit von der Flussrate, und dass der Sauerstoffgehalt des untersuchten

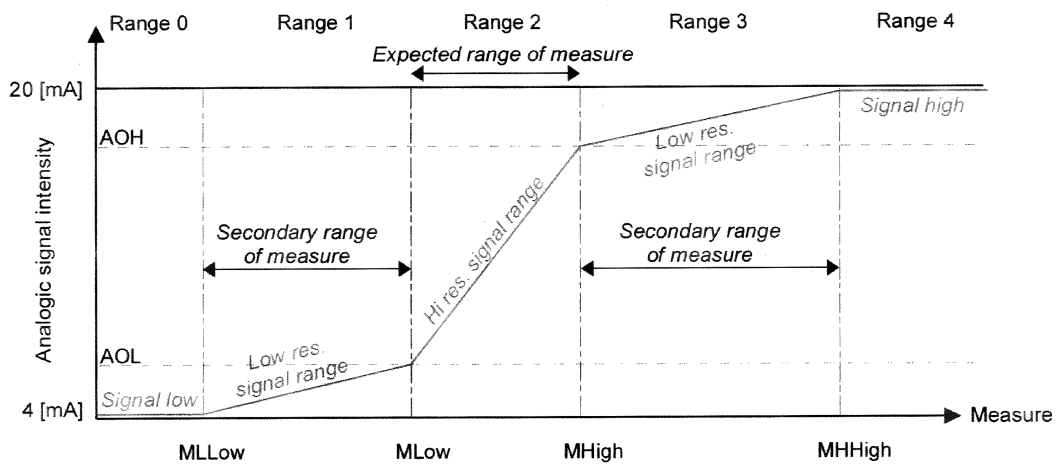
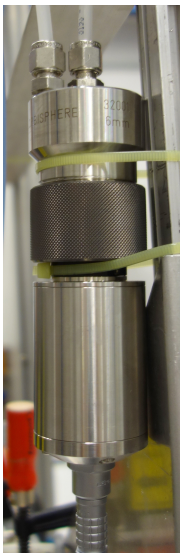
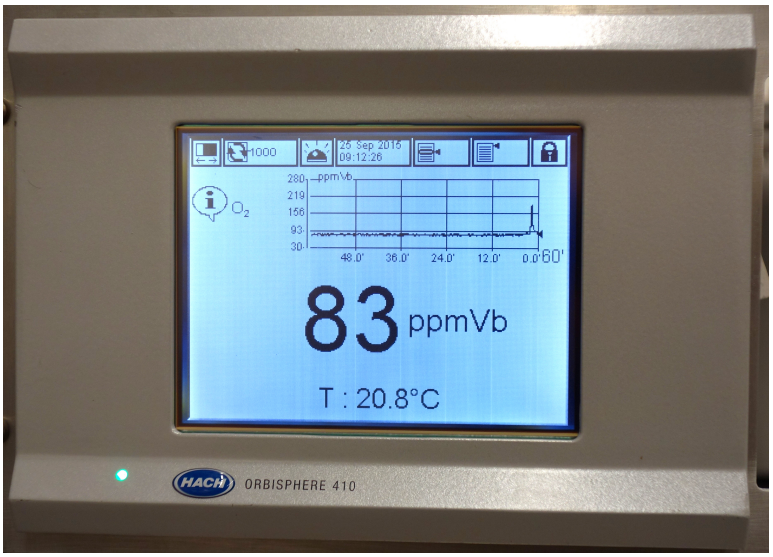


Abbildung 4.5: Der *Tri-Lineare*-Zusammenhang. Werden die Analogausgänge mittels Einstellungen an der Analyseeinheit konfiguriert, so kann eingestellt werden, in welchem Bereich welcher Zusammenhang gelten soll. Es werden der Anfangs- und Endpunkt des mittleren Bereiches sowohl für den Messbereich als auch für den Ausgabestrom bestimmt [15].

Gases nicht verändert wird. Der Sauerstoffanteil des zu untersuchenden Gases ist messbar in einem Bereich von $(0 - 46.000)$ ppm [15].



(a) Der Sensorkopf der Orbisphere. Das Gas strömt mittig, in diesem Fall der rechte Schlauch, in den Sensor ein und fließt über den linken Schlauch wieder heraus.



(b) Der Analyseteil der *Orbisphere*. Hier ist der Sauerstoffgehalt des gemessenen Gases in ppm angezeigt. In dem Graphen sind die Graphen der vergangenen Stunde eingetragen. Der zu sehende Sauerstoffpeak könnte daher kommen, dass sich die Blase eines Restgases im System gelöst hat.

Abbildung 4.6: Die Elektronik des Sauerstoffsensors.

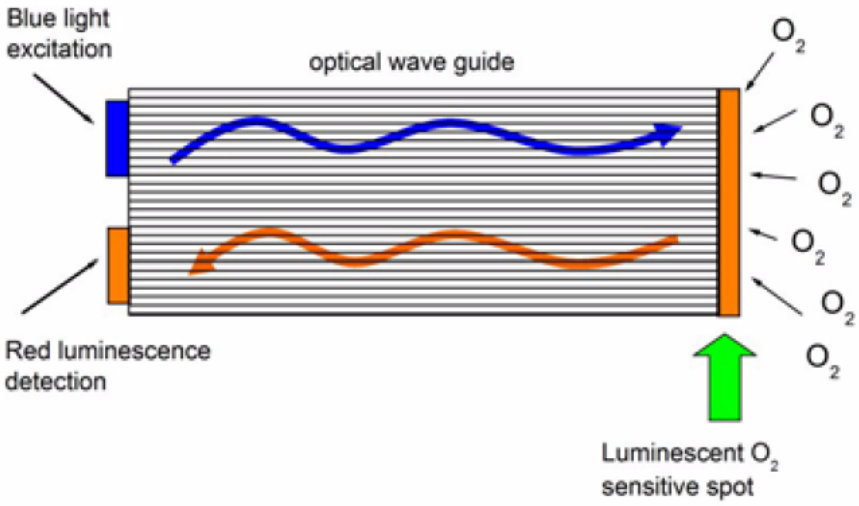


Abbildung 4.7: Das Funktionsprinzip des Lumineszenz-Sensors des *Orbisphere*-Systems. Auf der linken Seite wird das blaue Licht zur Anregung eingestrahlt und das durch Abregung frei werdende rote Licht gemessen. Das untersuchte Gas wird am rechten Teil entlang geleitet [15].

4.6 Aalborg GFM-Massenflussmesser

Abbildung 4.8: Massenflussmesser von AALBORG. Entnommen [16].

Der Aalborg GFM-Massenflussmesser ist ein Gerät zur Bestimmung des Massenflusses eines bestimmten Gases oder Gasgemisches. Im Inneren des Geräts wird hierfür das einströmende Gas in zwei laminare Teilströme unterteilt. Einem der beiden Teilströme wird Wärmeenergie zugeführt. Über die Menge des Energietransports kann die Durchflussmenge bestimmt werden, während der zweite Strom als Null-Referenz dient. Dies ist eine gängige Methode, um Gasströme zu messen, ohne einen großen Flusswiderstand zu erzeugen [17].

4.6.1 Umrechnung von Gasflüssen

Soll der Massenflussmesser für ein Gas verwendet werden, für das er nicht kalibriert ist, so muss der gemessene Fluss umgerechnet werden. Der angegebene Fluss ist abhängig von der Wärmekapazität des Gases und der Dichte. Es lässt sich für alle Gase ein K-Faktor bestimmen.
Dieser Umrechnungsfaktor kann auf zwei Arten bestimmt werden. Die gemessenen Flüsse der betrachteten Gase können bei gleicher Flussrate zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. Alternativ kann bei bereits bekannten K-Faktoren relativ zu einem gemeinsamen Referenzgas der zu verwendende K-Faktor aus dem Verhältnis der beiden Referenzwerte bestimmt werden.

$$K = \frac{Q_a}{Q_r} = \frac{K_a}{K_r} \tag{4.1}$$

Hierbei ist Q_a der Fluss des Gases, welcher umgerechnet wird; Q_r das Referenzgas; K_a der K-Faktor des Gases, welcher umgerechnet wird und K_r der K-Faktor des Referenzgases [17].
Eine Tabelle mit den K-Faktoren der gängigsten Gase in Relation zu Stickstoff ist in der Bedienungsanleitung gegeben [17]. Im Laborbestand befinden sich vier GFM-Massenflussmesser von Aalborg, bei denen die letzte Kalibration jedoch weit zurückliegt. Zur Überprüfung der Kalibra-

tion werden die Geräte mittels eines von *Vöstlin* hergestellten *Red y* Flusscontrollers mit einer bekannten Flussrate versorgt. Da der Flussregler auf Stickstoff kalibriert ist, die Flussmesser aber *Sagox 18* (18% CO_2 und 82% Ar) messen soll, muss zunächst der K-Faktor des Gasgemisches bestimmt werden. Hierfür fließen die K-Faktoren der einzelnen Gaskomponenten gemäß ihres Volumenanteils in den K-Faktor des Gemisches ein. Damit lässt sich für *Sagox 18* ein K-Faktor von $K_{\text{Sagox}} = 0,18 \cdot 0,7382 + 0,82 \cdot 1,4573 = 1,328$ berechnen.

Tabelle 4.1: Die Umrechnungsfaktoren für die verschiedenen Gase (Entnommen [17]).

Verwendetes Gas	K-Faktor relativ zu N_2
Argon	1,4573
Kohlenstoff Dioxid	0,7382
Stickstoff	1

4.6.2 Kalibration

Im Folgenden wird die im Jahr 2008 erfolgte Kalibration überprüft, und anschließend eine aktuelle Kalibration durchgeführt.
Da der *Red y* Flussregler auf Stickstoff kalibriert ist, muss der eingestellte Fluss umgerechnet werden. Da der theoretische K_{Sagox}-Faktor bekannt ist, lässt sich über den eingestellten Fluss, den resultierenden Messwerten und Gleichung (4.1) ein experimenteller Umrechnungsfaktor bestimmen. Je besser die Umrechnungsfaktoren übereinstimmen, desto besser ist die Kalibration noch erhalten. Es wurden zwei Messreihen durchgeführt. Bei einer Messreihe wurde mit Stickstoff gespült, da der Flussregler auf Stickstoff kalibriert ist; bei der zweiten wurde mit *Sagox 18* gespült. Wird mit Stickstoff gespült, so entspricht das errechnete Flussverhältnis gerade dem Kehrwert des K-Faktors. Im Fall des Spülens mit *Sagox 18* ist der K-Faktor direkt bestimmbar.

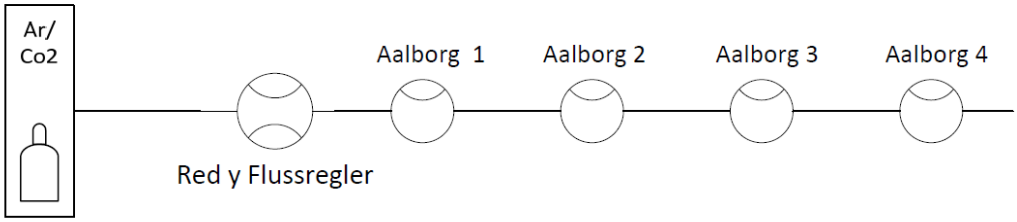


Abbildung 4.9: Der zur Kalibration verwendete Messaufbau. Das System wird über einen kalibrierten Massenflussregler mit bekanntem Gasfluss versorgt. Die Geräte sind alle *in Reihe* miteinander verbunden, damit alle mit demselben Gasfluss versorgt werden.

Zunächst wird eine Offset-Messung durchgeführt, bei der die Messlinie von der Gasquelle getrennt wird, um sicherzustellen, dass kein Gasfluss herrscht.
Um die K-Faktoren zu bestimmen, werden mittels des *Red y* Flussreglers verschiedene Flüsse eingestellt. Aus den auf den Flussmessern angezeigten Werten und den vom Regler gegebenen Werten

werden unter Verwendung von Gleichung (4.1) die K-Faktoren errechnet. Von den K-Faktoren der verschiedenen Flüsse wird das arithmetische Mittel gebildet und die Standardabweichung bestimmt.

Tabelle 4.2: Die Ergebnisse aus den Flussmessungen. Angegeben ist der Offset, der berechnete K-Faktor für das Spülen mit *Sagox 18* und für das Spülen mit Stickstoff. Die Fehler ergeben sich aus der Standardabweichung. Die Nummerierung der einzelnen Geräte wird konsistent weiter geführt. Die genaue Gerätenummer, die sich hinter der hier verwendeten Nummerierung verbirgt, ist im Anhang einsehbar.

Flussmesser	Offset	$K_{\text{exp N}^2}$	$K_{\text{exp } Sagox}$
Aalborg 1	$2,1\,\text{l/h}$	$1,35 \pm 0,04$	$1,7 \pm 0,27$
Aalborg 2	$1,8\,\text{l/h}$	$1,35 \pm 0,04$	$1,6 \pm 0,15$
Aalborg 3	$0,1\,\text{l/h}$	$1,36 \pm 0,06$	$1,7 \pm 0,22$
Aalborg 4	$0,96\,\text{l/h}$	$1,35 \pm 0,07$	$1,6 \pm 0,2$

Die errechneten K-Faktoren für die verschiedenen Gase unterscheiden sich relativ stark. Dies könnte damit zusammen hängen, dass die Steuereinheit des *Red y* Flussreglers auf Stickstoff kalibriert ist. Es ist davon auszugehen, dass der Fluss des Stickstoffs relativ genau geregelt wurde, während es beim Durchfluss mit *Sagox 18* eventuell zu Schwankungen kam.

4.7 Gaslecksucher

Auch wenn der Gaslecksucher der *ISM GmbH* nicht direkt im Gassystem zum Einsatz kommt, wurde er häufig genutzt, um undichte Stellen im System zu finden. Daher soll er ebenfalls kurz beschrieben werden. An der Spitze des *GAS-CHECK 5000is* befindet sich ein kleiner Ventilator, welcher das Gas einsaugt. Im Inneren wird die Gasprobe auf ihre Wärmeleitfähigkeit untersucht. Das Gerät ist auf verschiedene Gase einstellbar. Auf Helium reagiert es jedoch am empfindlichsten [18].
Konnte festgestellt werden, dass im System Undichtigkeiten vorlagen, wurde das System mit Helium gefüllt und die Verbundstellen und andere potentielle Leckstellen mit dem Gaslecksucher untersucht.

Abbildung 4.10: Der Gaslecksucher. Auf der linken Seite ist die Spitze mit Sensorkopf zu sehen. In diese zieht ein kleiner Ventilator das Gas hinein. Bei großen Gaslecks muss der Lecksucher einige Zeit in eine unbelastete Umgebung gehalten werden, damit die in der Spitze gesammelten Gase entweichen können.

5 Aufbau des Gassystems

Mit dem Gassystem soll ein Prototyp des TRDs auf sein Verhalten im Gasfluss getestet werden und die Materialbelastung durch einen längeren Betriebszeitraum simuliert werden.
Hierfür muss das Gassystem einige Anforderungen erfüllen. Es soll den differentiellen Druck vor und hinter der Kammer messen können. Die Kammer soll vor unkontrolliertem, starkem Überdruck geschützt werden und der auf der Kammer lastende Druck soll kontrolliert verändert werden können. Um Veränderungen an der Kammer selbst feststellen zu können, muss es am Ausgang noch einen Analyseteil geben, welcher eventuelle Verunreinigungen des Gases feststellt, sodass Rückschlüsse über die Dichtigkeit gezogen werden können. Das Gassystem soll die Kammer außerdem mit einem Fluss von 3 l/h versorgen, da die Kammern bei Strahlzeiten und im lokalen Messbetrieb ebenfalls mit etwa diesem Fluss betrieben wurden.
Diese Funktionen sollen nach Möglichkeit automatisiert ablaufen, ebenso wie die Datennahme, da relativ lange Messperioden erwartet werden.
Ursprünglich sollten vorwiegend Teile des ALICE-Gassystems aus Münster wiederverwendet werden. Aber beim Test eines Geräts zur Bestimmung des CO_2 Gehalts in Gasen konnte festgestellt werden, dass das ALICE-System dafür nicht geeignet ist. Die verwendeten Flussregler sind ausgelegt für einen Betrieb von $(0 - 10)$ l/min und sind gerade im Bereich geringer Flüsse recht ungenau. Einer der getesteten Regler konnte des Weiteren als beschädigt identifiziert werden. Bei allen benutzten Geräten wurde deren Dichtigkeit und Kalibration überprüft.

5.1 Gassystem

Zunächst muss das Gas aus der Flasche mit einem Druckminderer auf ein nutzbares Niveau gebracht werden. Der für die Versorgung gewählte Druck beträgt 1 bar. Der Gasfluss in das System wird mittels eines Flussreglers von *Kobold* eingestellt (siehe Abbildung(5.1)). Da die vom Flussregler angezeigten Durchflüsse keine verlässlichen Werte darstellen, werden diese mit einem Flussmesser von *Aalborg* überprüft.
Nun folgt der erste differenzielle Drucksensor, um den Druck vor der Kammer bestimmen zu können. Es wird nun eine Verzweigung eingebaut, um ein Betreiben des Systems ohne Kammer zu ermöglichen. Dies ist interessant, um zu untersuchen, welchen Einfluss die Kammer auf den Durchfluss des Systems hat und um das System mit höheren Drücken zu betreiben, ohne die Kammer dabei zu belasten. Dies wird benötigt, um die Drucksensoren zu kalibrieren. Außerdem kann hierdurch im Fall eines technischen Defekts die Kammer vom restlichen System gelöst werden, um sie zu schützen. Dies wurde mittels dreier Handventile von *Swagelock* realisiert.
Nach der Abzweigung folgt die Kammer. Diese ist sowohl an der Zu- als auch an der Ableitung mit

einem Blasenzähler gegen starken Überdruck geschützt.
Nach der Kammer und ihrem Bypass folgt der zweite Drucksensor. Anschließend kommt das mit Druckluft steuerbare Ventil, gefolgt von dem Sauerstoffsensor der *Orbisphere*. Am Ausgang befindet sich ein Blasenzähler, welcher das Rückströmen von Sauerstoff in das System verhindern soll. Dieser hat nur einen minimalen Füllstand, um das System nicht unnötig zu belasten. Da jedoch hierdurch der Druck hinter der Kammer bedingt durch die Blasenbildung am Auslass leicht schwankt, wurde für manche Experimente, bei denen die Druckmessung wichtig ist und die Sauerstoffmessungen eine untergeordnete Rolle spielen, der Blasenzähler am Auslass entfernt.

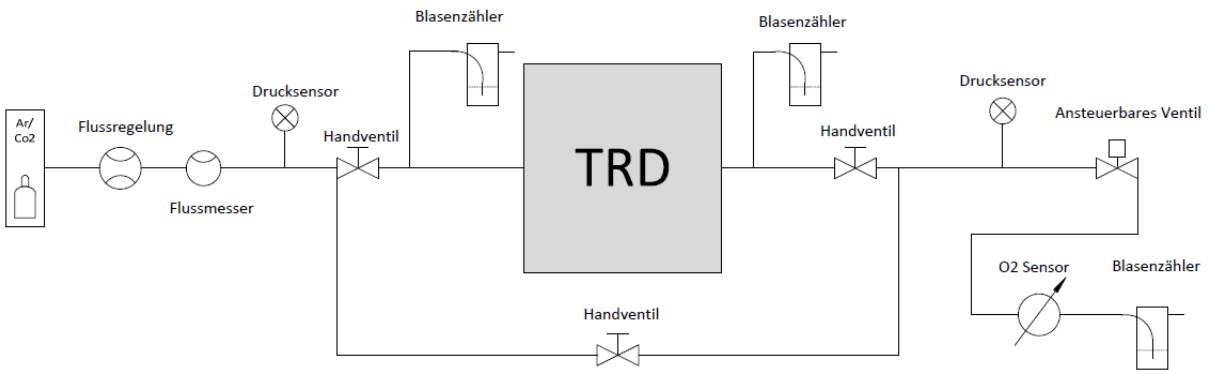


Abbildung 5.1: Hier ist der schematische Aufbau des verwendeten Gassystems abgebildet. Auf eine Darstellung der Elektronik und der Druckluftzuleitungen wurde zur besseren Übersicht verzichtet.

5.2 Messelektronik und Arduino

Für die Steuerung des Ventils und zum Aufzeichnen der Messwerte wurde ein *Arduino Uno* (im Weiteren Arduino genannt) genutzt. Der Arduino wird um einen „Shield' der Firma *Libelium* erweitert, ein Erweiterungskit, welches in diesem Fall die Möglichkeit bietet, die Signale im Bereich von $(4-20)$ mA zu messen und digital auszulesen. Als Sensoren wurden die bereits beschriebenen Drucksensoren der *First Sensor AG* sowie der Sauerstoffsensor der *Hach Gmbh*, die *Orbisphere*, genutzt. Beide Sensoren geben Stromsignale in entsprechender Größenordnung aus.

5.2.1 Funktionen des Arduino

Der Arduino ist ein Mikrocontroller mit digitalen und analogen Ein- bzw. Ausgängen. Es gibt ihn in verschiedenen Ausführungen mit unterschiedlich vielen Anschlüssen und Rechenkapazitäten. Der hier verwendete Arduino ist ein *Arduino Uno*, der kleinste Chip, der für das Projekt jedoch vollkommen ausreichend ist.
Der Arduino hat 13 digitale Pins, welche mittels der Programmierung angesteuert werden können. Des Weiteren verfügt er über 6 analoge Eingänge, eine Spannungsversorgung für angeschlossene elektronische Teile, eine über Strom ansteuerbare Resetfunktion und einen Knopf mit selbiger Funktion. Der Arduino kann über den USB-Anschluss des Computers versorgt werden oder über eine externe

Spannungsversorgung von 9 V (siehe Abbildung 5.2). Werden die betriebenen Geräte über den Arduino mit Spannung versorgt, ist zu empfehlen, den Arduino mit der externen Spannungsversorgung zu betreiben, da die Belastung des USB-Anschlusses zu hoch werden könnte.

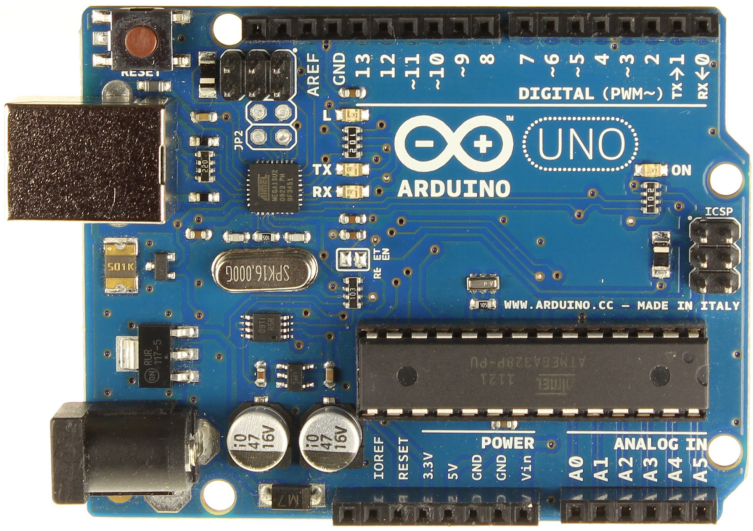


Abbildung 5.2: Eine Darstellung des Arduino-Chips. Am oberen Rand befinden sich die digital ansteuerbaren Pins. Am unteren Rand befinden sich die analogen Eingänge und die Pins, mit denen der Arduino angeschlossene Elektronik versorgen kann. Unten links ist die Buchse zur Spannungsversorgung zu sehen, oben links die Buchse für die USB-Verbindung zum Computer [19].

Der Arduino führt die eingespeicherten Befehle unabhängig davon aus, ob eine USB-Verbindung besteht.

5.2.2 Programmierung allgemein

Die Programmiersprache, auf der die Programmierung des Arduinos basiert, ist C++. Der Arduino wiederholt die auf ihm gespeicherte Programmierung in einer Schleife.
Um einige Anfangskonfigurationen festzulegen, wird der Code in zwei Teile unterteilt. Der erste Abschnitt stellt den `setup`-Teil dar. Dieser wird nur anfangs einmal durchlaufen. Hier werden beispielsweise die Pinbelegungen festgelegt. Der zweite Teil ist als `loop`-Teil definiert. Der hier eingefügte Code wird immer wieder durchlaufen. Dieser ist der eigentliche Arbeitsbereich des Arduinos.

```
void setup() {
  // Hier werden die Anfangskonfigurationen eingegeben:
(...)
}

void loop() {
  // Der Programmkode der hier verwendet wird,
  //wird immer wieder wiederholt :
(...)
}
```

Shield

Der *Shield* wird genutzt, um die (4 − 20) mA Signale zu erfassen. Der Aufbau ermöglicht das Auslesen von Signalen auf 4 Kanälen sowie die Versorgung eines Sensors mit 24 V (siehe Abbildung (5.3)). Mithilfe einer Bibliothek lassen sich die einzelnen Kanäle einfach zuordnen und sind mit der Variable *Channel* auszulesen.

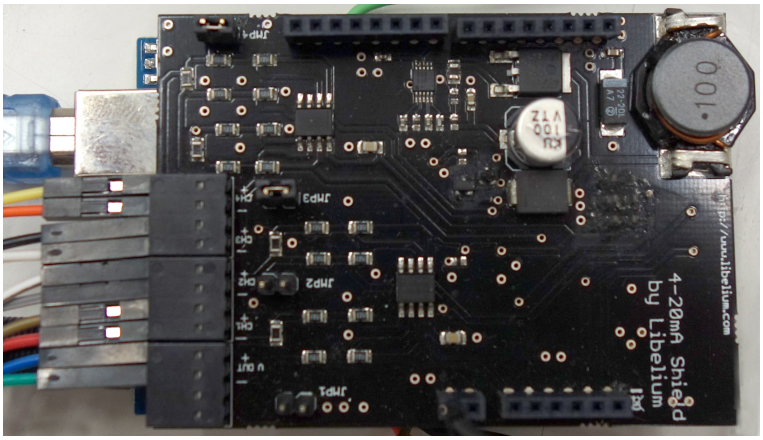


Abbildung 5.3: Hier ist der Arduino um einen *Shield* erweitert. Links ist oben der USB-Anschluss des Arduinos zu sehen. Darunter befinden sich die Anschlüsse der vier Kanäle, gefolgt von der 24 V Spannungsversorgung.

Beispielprogramm

Die Arbeitsweise des Arduinos soll an einem kurzen Beispiel näher erläutert werden. Dies geschieht anhand des Programms zur Kalibration der Drucksensoren.
Um ermitteln zu können, wie der von den Drucksensoren gegebene Strom umzurechnen ist, müssen diese Werte kalibriert werden. Hierfür wird die Kammer vom Fluss abgetrennt. Der Gasfluss wird auf 3 l/h eingestellt. Das Ventil am Ende des Systems wird geöffnet, sodass Gas hinaus strömt. Der nun herrschende Druck wird als Nulldruck angenommen. Nun wird das Ventil am Ende des Systems geschlossen. Es baut sich ein hoher Druck auf. Da die Sensoren nur einen Druck bis 10 mbar Überdruck anzeigen können, geben sie hier den Strom für den Maximaldruck aus. Mit der Nulldruckmessung

lässt sich der Offset des Sensors berechnen. Der Umrechnungsfaktor von Strom in Druck lässt sich mithilfe der Maximaldruckmessung und der Nulldruckmessung bestimmen.

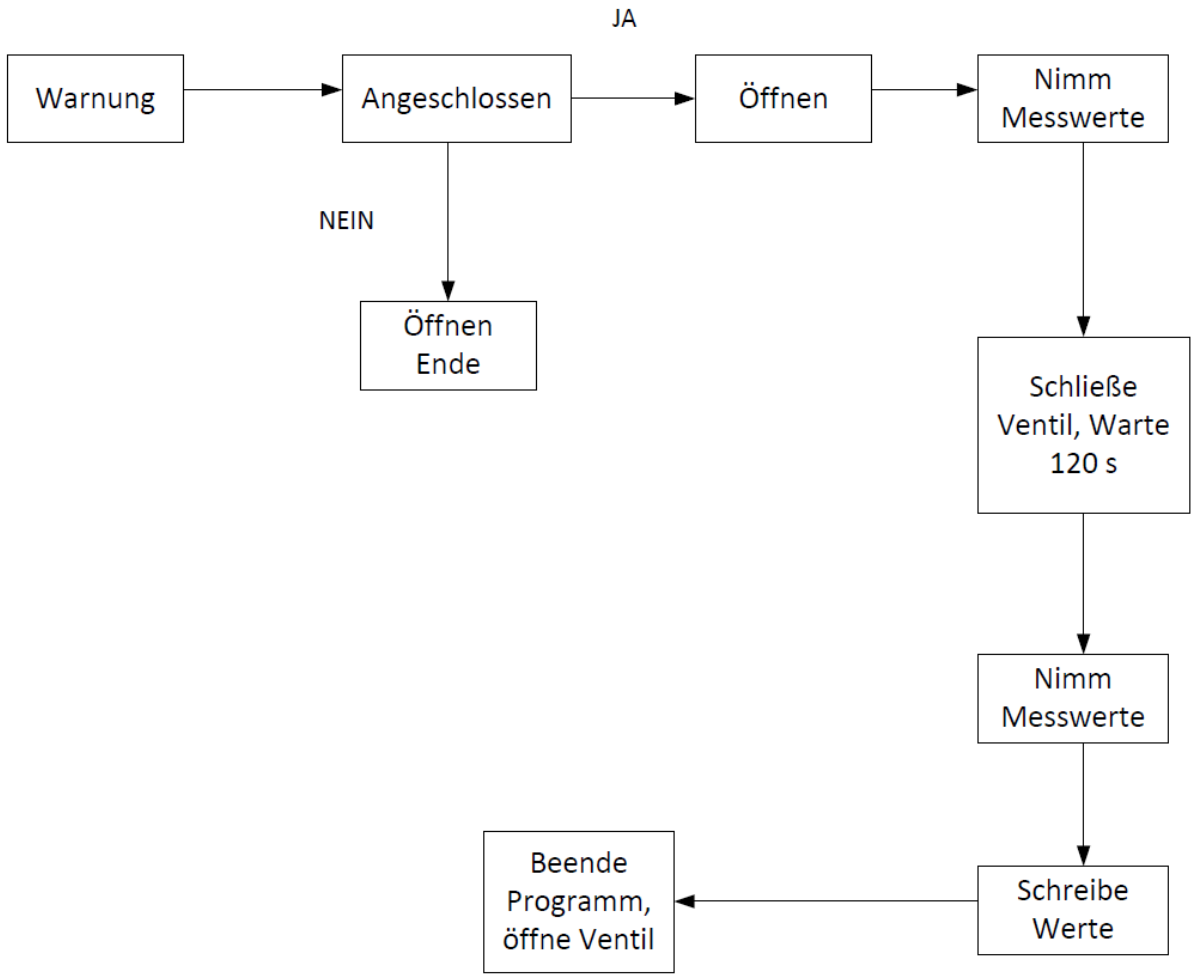


Abbildung 5.4: Das Schema, nach dem die Programmierung zur Kalibration des Drucksensors abläuft. Der genaue Programmcode befindet sich im Anhang.

Es wird eine Warnung auf die Ausgabekonsole geschrieben, welche den Nutzer davor warnt, dass es zu hohen Drücken im System kommen wird (**Warnung**). Diese Drücke sind jenseits der 10 mbar, die die Sensoren anzeigen können. Die TRD-Kammer sollte aus dem System entfernt werden, um diese nicht zu belasten. Sollten sich noch Blasenzähler im System befinden, würden diese den Druck ablassen und die Messungen verfälschen. Daraufhin wird geprüft, ob eine Verbindung zu den Drucksensoren hergestellt werden kann oder nicht (**Angeschlossen**). Ist dies nicht der Fall, wird das Ventil geöffnet, die Messung beendet und eine entsprechende Nachricht auf der Konsole ausgegeben (**NEIN, Öffnen Ende**).
In der Folge wird das Ventil geöffnet und die eigentliche Messung kann beginnen (**JA, Öffnen**). Es werden 100 Messwerte mit einer Frequenz von 10 Hz genommen (**Nimm Messwerte**). Dies sind die Werte, die als Referenz für den geringsten Druck im System dienen. Danach wird über diese

gemittelt.
Nun wird das Ventil geschlossen und Druck baut sich auf (**Schließe Ventil, Warte** 120 s). Damit davon ausgegangen werden kann, dass der Überdruck tatsächlich höher als 10 mbar ist, werden 120 s gewartet. Diese Messwerte werden nach dem gleichen Schema wie vorher genommen (**Nimm Messwerte**). Dies sind die Maximaldruckmesswerte. Mithilfe der genommenen Werte wird der Offset und der Umrechnungsfaktor bestimmt. Diese werden ausgegeben (**Schreibe Werte**). Da der Arduino dieses Prozedere immer weiter wiederholen würde, wurde am Anfang noch eine weitere, aber nicht näher erwähnte Bedingung eingefügt. Im Teil *Schreibe Werte* wird diese Bedingung auf *false* gesetzt. Das Programm überspringt von nun an den bisher beschriebenen Teil. Das Ventil wird an dieser Stelle geöffnet und offen gehalten (**Beende Programm, öffne Ventil**).

5.2.3 Aufbau der Elektronik

Um eine bessere Übersichtlichkeit im Schaltbild zu gewährleisten, werden der Teil zur Datennahme und der Teil zur Ventilsteuerung getrennt betrachtet. Die Sensoren und die Steuerung sind mit demselben Arduino verbunden.

Anschluss der Sensoren

Die Sensoren werden auf zwei verschiedene Arten angeschlossen. Das Messsignal der Drucksensoren wird mit der Spannungsversorgung in Reihe geschaltet. Von der Analyseeinheit der *Orbisphere* wird nur der Signalverlauf angeschlossen. Der Sensor verfügt über eine eigene Spannungsversorgung (siehe Abbildung 5.5).

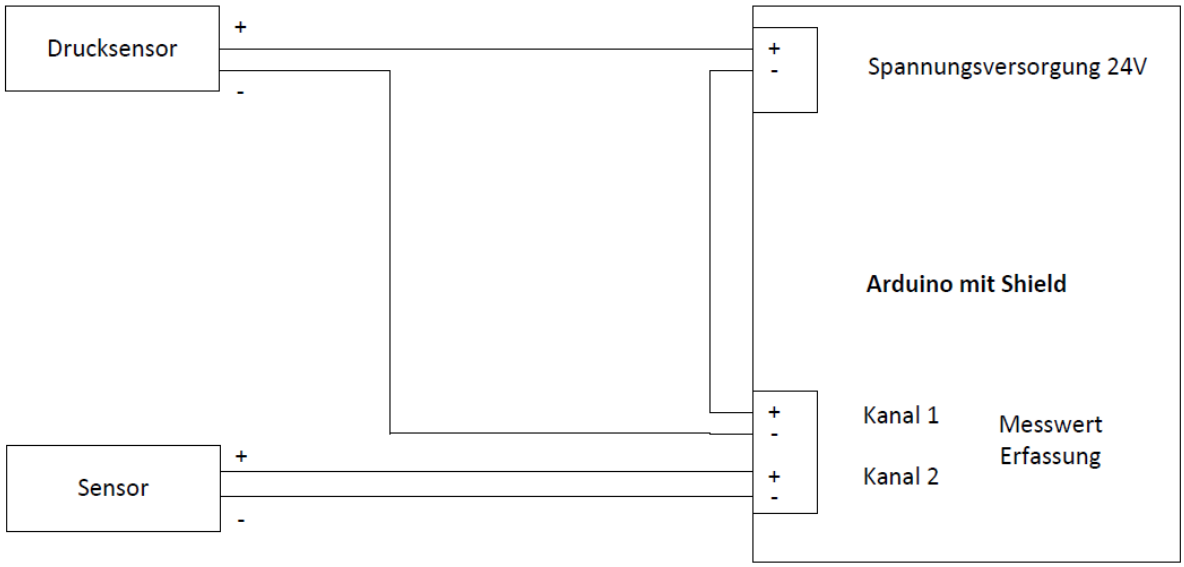


Abbildung 5.5: Die Sensoren wurden wie auf dem hier abgebildeten Schema an den Arduino mittels des *Shield* angeschlossen. Es wurde nur jeweils ein Sensor eingezeichnet, um die Skizze übersichtlich zu halten. Es wurden zwei Drucksensoren und zwei Signalkabel der *Orbisphere* angeschlossen.

Anschluss der Ventilsteuerung

Die Druckluftsteuerung wird mittels eines Relais bedient, da diese als Eingangssignal 3,3 V benötigt und nicht mit dem Ausgangssignal der Pins des Arduinos kompatibel ist. Das Relais[1] benötigt eine Spannungsversorgung von 5 V und wird von dem Arduino versorgt und gesteuert. Der über das Relais geregelte Stromkreis wird zwischen der 3,3 V Spannungsversorgung des Arduinos und der Ventilsteuerung geschlossen. Das Relais kann die Pin-Signale des Arduinos interpretieren.

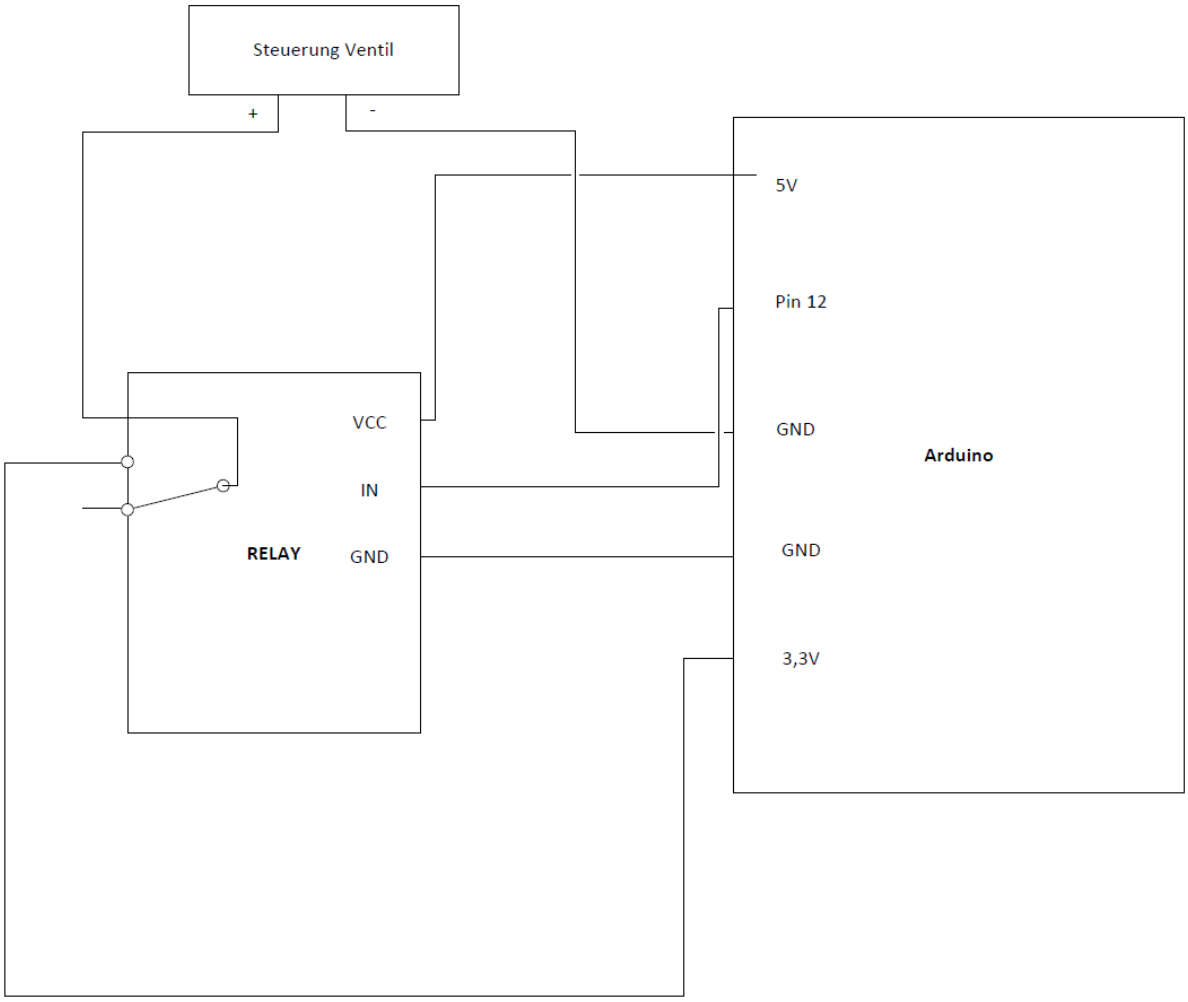


Abbildung 5.6: Die Steuerung des Ventils wird mittels eines Relais mit dem Arduino verbunden. Die Versorgung des Relais und des geregelten Stromkreises erfolgt über den Arduino, während die Ventilsteuerung eine eigene Spannungsversorgung besitzt.

5.2.4 Für das Gassystem verwendete Programme

Sauerstoff ausspülen

Um den Sauerstoff aus dem System zu spülen, wird ein Programm genutzt, welches das Ventil offen hält und alle Werte mitschreibt (siehe (5.7)). Zunächst wird geprüft, ob alle Sensoren **Angeschlos-**

[1] Ein Relais ist ein Regelstromkreis, welcher es erlaubt, Schalter mittels Strömen zu bedienen.

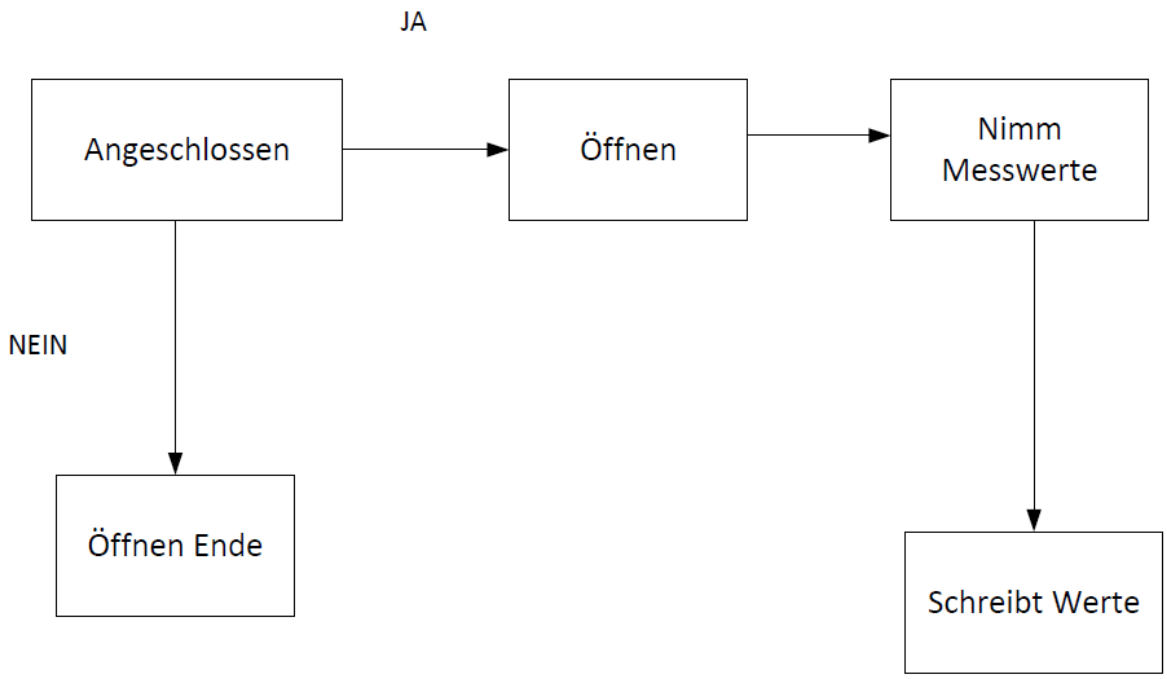


Abbildung 5.7: Zum besseren Verständnis ist hier das Programm zum Ausspülen des TRDs dargestellt.

sen sind. Ist dies nicht der Fall (**Öffnen Ende**), wird die Messung beendet, eine entsprechende Nachricht auf der Konsole ausgegeben und das Ventil wird geöffnet. Wenn alle Sensoren angeschlossen sind, wird das Ventil ebenfalls geöffnet (**Öffnen**). Nun werden die Messwerte der Sensoren gemessen (**Nimm Messwerte**) und auf die Konsole ausgeschrieben (**Schreibt Werte**). Dies geschieht mit einer Frequenz von 10 Hz.

Schema Belastungstests

Das Programm, welches die Belastungen der Kammer erzeugt, soll für verschiedene Einstellungen nutzbar sein. Daher sind im `setup`-Teil einige Variablen wählbar, welche die Einstellungen für den folgenden Test festlegen. Die Höhe der Druckbelastung, die Anzahl der Druckzyklen und die Zeit, die das Ventil geöffnet und das Gas ausgelassen wird, sind dadurch einstellbar. Ebenfalls werden hier die Parameter eingegeben, die die Kalibration der Drucksensoren ergeben hat.

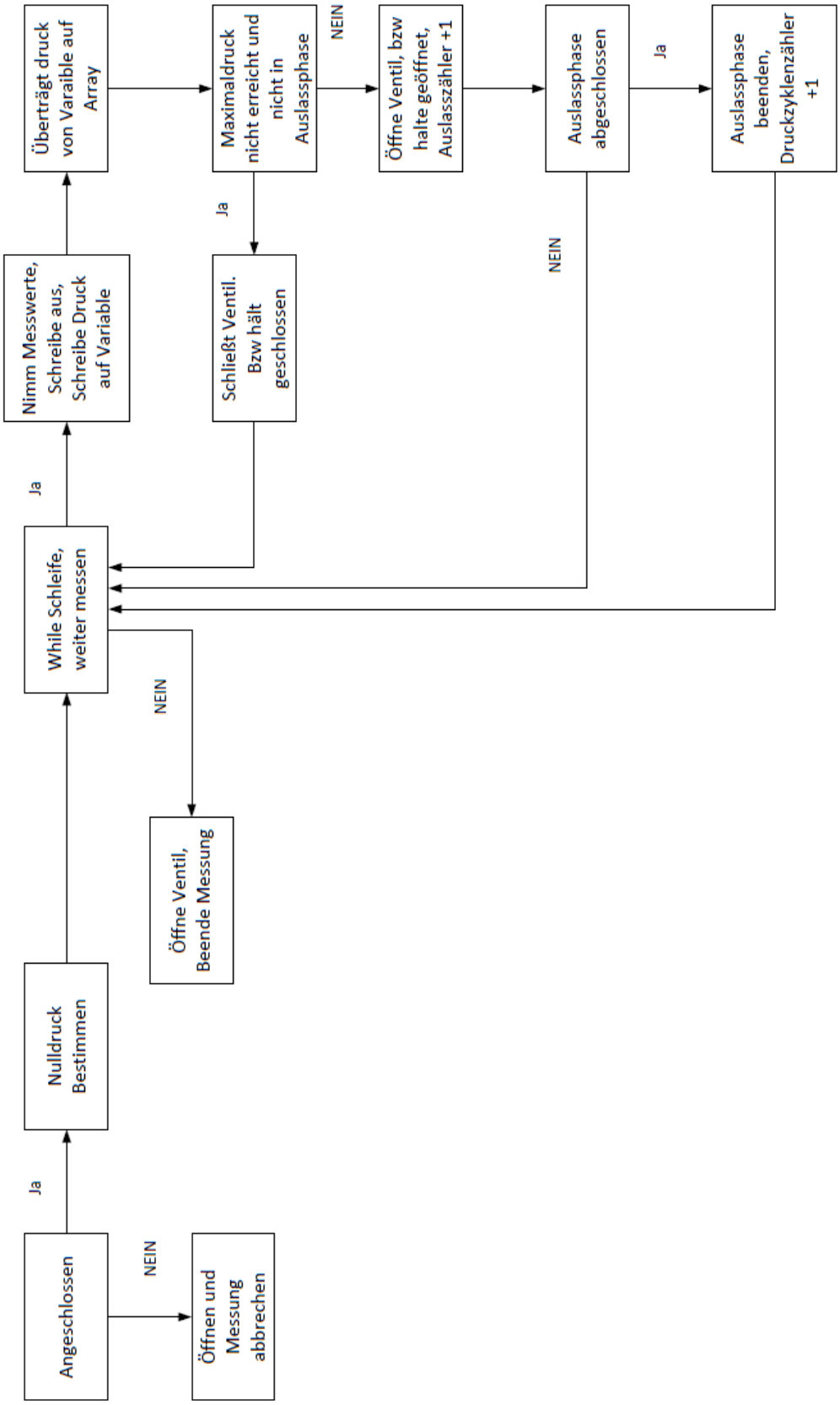


Abbildung 5.8: Hier ist der schematische Aufbau des Programms für Belastungstests dargestellt. Es ist nur der Teil abgebildet, der innerhalb der Arbeitsschleife liegt.

Zunächst wird geprüft, ob alle Sensoren angeschlossen sind (**Angeschlossen** siehe Abbildung (5.8)). Ist dies nicht der Fall, wird das Ventil am Ende geöffnet, die Messung beendet und eine entsprechende Nachricht auf die Konsole geschrieben (**Öffnen und Messung abbrechen**).
Sind die Sensoren angeschlossen, wird zunächst der Druck bei 3 l/h Durchfluss und geöffnetem Ventil bestimmt (**Nulldruck**). Hier wird mit einer Frequenz von 10 Hz der Druck 10 mal bestimmt und dann über die verschiedenen Werte gemittelt. Dies ist der Referenzdruck, zu dem der gewünschte Überdruck hergestellt wird. Nachdem der Nulldruck bestimmt wurde, beginnt die eigentliche Messschleife (**While-Schleife, weiter messen**). Hier wird mit einem Zähler (Druckzyklenzähler) geprüft, ob noch weitere Messungen durchgeführt werden müssen. Ist dies nicht der Fall, wird das Ventil am Ende geöffnet, die Messung beendet und eine entsprechende Nachricht an die Konsole geschickt. In dieser Nachricht ist ebenfalls der am Anfang bestimmte Referenzdruck des Systems enthalten, um später die Druckkurve entsprechend korrigieren zu können (**Öffne Ventil, Beende Messung**).
Sollen noch weitere Messungen durchgeführt werden, werden die Messwerte der Sensoren genommen und auf der Konsole ausgegeben (**Nimm Messwerte, Schreibe aus, Schreibe Druck auf Variable**). Gleichzeitig wird der Druck des Sensors hinter der Kammer auf eine Variable M geschrieben. Es wird nun eine Verzögerung eingebaut, um eine Messfrequenz von 10 Hz zu erreichen. Jetzt werden die Druckwerte von der Variable M auf ein Array[2] geschrieben. Dieses wird für die Prüfung des Drucks genutzt, ab dem das Ventil wieder geöffnet wird. Anschließend wird mittels einer Abfrage getestet, ob der bestimmte Maximaldruck erreicht wurde und ob sich das Ventil gerade in der Auslassphase befindet (**Maximaldruck nicht erreicht und nicht in der Auslassphase**). Zu Beginn der Auslassphase wird geprüft, ob die Variable, welche die Anzahl der Messzyklen, die Gas herausgelassen wird, abzählt, bei Null steht oder nicht. Sind diese Bedingungen erfüllt, wird das Ventil geschlossen bzw. geschlossen gehalten (**Schließt Ventil, bzw. hält geschlossen**). Danach beginnt der Messzyklus von vorne.
Wird der Maximaldruck überschritten, wird das Ventil geöffnet und eine Variable zur Bestimmung der Auslasszeit wird um 1 vergrößert (**Öffne Ventil, bzw. halte geöffnet, Auslasszähler +1**). Nun wird geprüft, ob die Auslassphase bereits abgeschlossen ist, also ob der Auslasszähler einen bestimmten Wert erreicht hat (**Auslassphase abgeschlossen**). Ist dies nicht der Fall, beginnt der nächste Messzyklus. An der Stelle, an der geprüft wird, ob der Maximaldruck erreicht wird, wird dieser zwar nicht mehr erreicht, allerdings erfüllt der Auslasszähler nicht mehr die Bedingung und das Ventil wird offen gehalten.
Hat der Auslasszähler jedoch seinen Maximalwert erreicht, wird er wieder auf Null gesetzt und der Druckzyklenzähler um 1 erhöht (**Auslassphase beenden, Druckzyklenzähler +1**). Danach beginnt der Messzyklus wieder von vorne oder wird gegebenenfalls beendet.

[2] Datentyp mit mehreren Einträgen, vergleiche Matrix

6 Charakterisierung des TRDs

Die hier benutzte TRD-Kammer ist der 2014er Prototyp für den TRD des CBM-Experiments. Die Kammer hat eine Grundfläche von $(57,0 \pm 0,01)$ cm mal $(57,0 \pm 0,01)$ cm [21]. Das Eintrittsfenster besteht aus Kapton, einer strahlungsbeständigen und stark gegen Spannung isolierenden Polyimid-Folie [20]. Das von der Folie in der Kammer eingeschlossene Volumen hat eine Tiefe von $(1,2 \pm 0,01)$ cm und eine durch die Seitenstreben verkürzte Grundfläche von $(54 \pm 0,02)$ cm mal $(54 \pm 0,02)$ cm [21]. Damit hat der TRD ein Gasvolumen von $(3,5 \pm 0,3)$ l, wenn die Folie keine Auswölbungen zeigt.
Die Kammer verfügt über vier baugleiche Gasanschlüsse, von denen jeweils zwei für den Zustrom und das Ablassen des Gases genutzt werden (siehe Abbildung (6.1)).

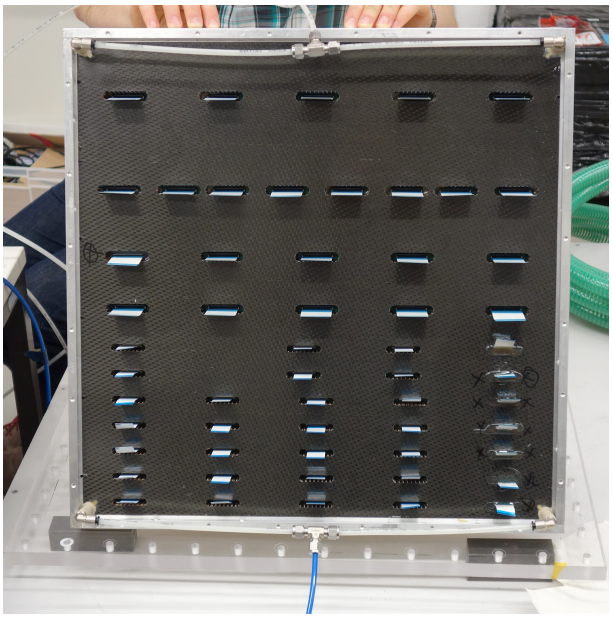
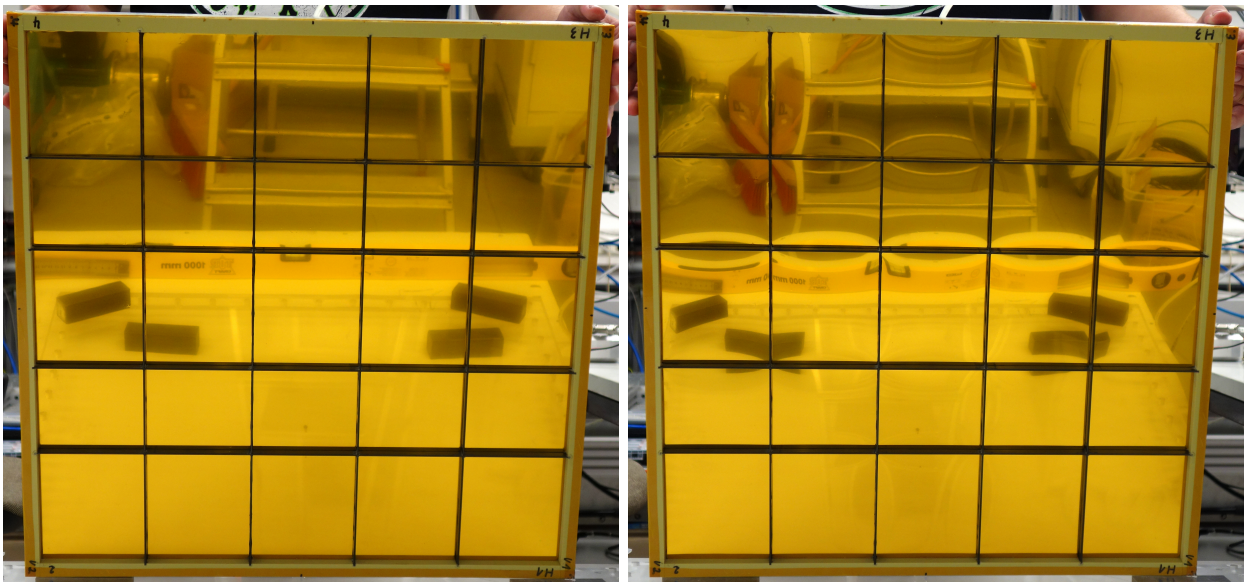


Abbildung 6.1: Dies ist die Rückseite der Kammer. Durch die beiden unteren Anschlüsse strömt das Gas in die Kammer ein. Aus den beiden oberen Anschlüssen entweicht es wieder. Weiterhin sind auch die Anschlüsse für die Auslese-Elektronik zu sehen.

Die TRD-Kammer ist nicht komplett dicht. Daher kommt es fortlaufend zu Verunreinigungen des Gases. Um eine gewisse Reinheit des Gases gewährleisten zu können, müssen die Kammern, während sie in Betrieb sind, durchgespült werden. Die Flussrate beträgt 3 l/h. Bedingt durch den Fluss kommt es hierdurch schon zu einem Überdruck von ungefähr 1 mbar gegenüber der Umgebung (siehe Abbildung (6.2)).



(a) Die Kammer, wenn kein Gas hindurch fließt.

(b) Die Kammer unter Gasfluss.

Abbildung 6.2: Dies ist eine aufrechte Darstellung des Eintrittsfensters der Kammer. Links wird eine Abbildung ohne Gasversorgung gezeigt, rechts mit Gasversorgung. An den Reflexionen der Folie lässt sich die Auswölbung gut erkennen. Die Flächen der rechten Kammer haben eine „Kissenstruktur".

6.1 Druckabfall

Um den Flusswiderstand der Kammer in Abhängigkeit vom Fluss zu bestimmen, wird der bereits beschriebene Messaufbau genutzt. Es werden verschiedene Flüsse eingestellt und die Werte der Drucksensoren ausgelesen. Da sich der Druck auf den Flusssensoren mit verschiedenen Flussraten ändert, wird zunächst der Druck an den Sensoren gemessen, ohne dass die Kammer angeschlossen ist. Die Ventile, die auf die Kammer zu- und von ihr wegführen, werden geschlossen. Die Drücke für die verschiedenen Flüsse werden gemessen und als Offset für die eigentliche Messung verwendet. Hierbei wurde jeweils über ungefähr eine Minute gemessen und über die entsprechenden Werte gemittelt. Nach dieser Zeit kann von einem stationären Fluss ausgegangen werden.
Das gleiche Messverfahren wird mit dem Gasfluss durch die Kammer wiederholt. Die ermittelten Werte werden hier um den Offset-Wert korrigiert und die Differenz zwischen den Messwerten der beiden Drucksensoren ermittelt. Diese werden gegen die Flussrate aufgetragen (siehe Abbildung (6.3)).

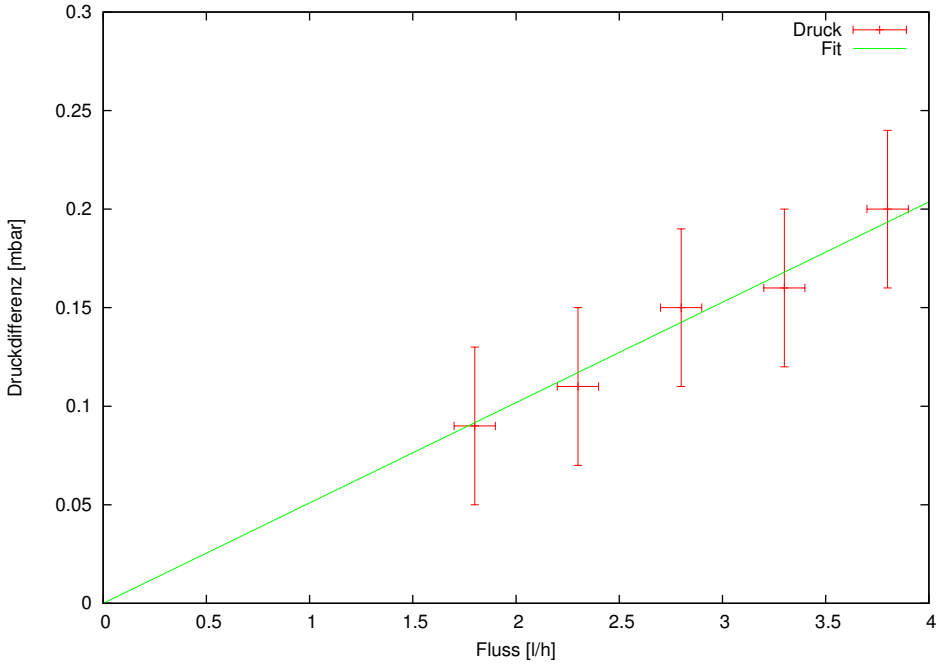


Abbildung 6.3: Hier ist der durch die Kammer verursachte Druckabfall gegen die Flussrate aufgetragen. Die Fehler ergeben sich aus der Genauigkeit, mit welcher der Fluss eingestellt werden kann ($\pm 0,1\,\mathrm{mbar}$), und dem absoluten Fehler der Drucksensoren ($\pm 0.04\,\mathrm{mbar}$).

Es ist nach bloßem Auge ein linearer Zusammenhang erkennbar. Ein Fit mit einer Gerade mit zwei freien Parametern führt zu keinen guten Ergebnissen, da der kalkulierte Offset dann einen Fehler von 150% hat. Es wird die Annahme gemacht, dass die Gerade ohne Offset bestimmbar ist, da davon ausgegangen werden kann, dass ohne Gasfluss auch kein Flusswiderstand vorliegt. Der so gefundene proportionale Zusammenhang lautet:

$$\Delta p(f) = a \cdot f. \tag{6.1}$$

Hierbei ist Δp der Druckabfall in mbar; $a = (0,054 \pm 0,005)\,\mathrm{mbar}/(\mathrm{l/h})$ der Zusammenhang zwischen Druckabfall und Fluss und f der Fluss in l/h.
Dieser lineare Zusammenhang kann nicht für große oder sehr kleine Flüsse angenommen werden. Es ist aber zu erwarten, dass dieser Zusammenhang innerhalb der vermessenen Flussraten von $(1,8 \pm 0,1)\,\mathrm{l/h}$ bis $(3,8 \pm 0,1)\,\mathrm{l/h}$ gilt. Da schließlich die Versorgung der Detektoren in einem ähnlichen Bereich stattfinden soll, ist diese Näherung hinreichend.

Weiterhin wird ein Versuch durchgeführt, bei dem das Antwortverhalten der Kammer untersucht wird. Der Fluss wird innerhalb einer Messperiode stufenweise erhöht. Es wird untersucht, wie viel Zeit vergeht, bis sich die Druckerhöhung am Drucksensor hinter der Kammer bemerkbar macht (siehe Abbildung (6.4)).
Um das Antwortverhalten zu bestimmen, wird ein in beiden Druckkurven eindeutig identifizierbare Ereignis gesucht. Aus dem zeitlichen Abstand zwischen dem Auftreten des Ereignisses in den beiden Messreihen kann die Verzögerung errechnet werden (siehe Abbildung (6.4)).

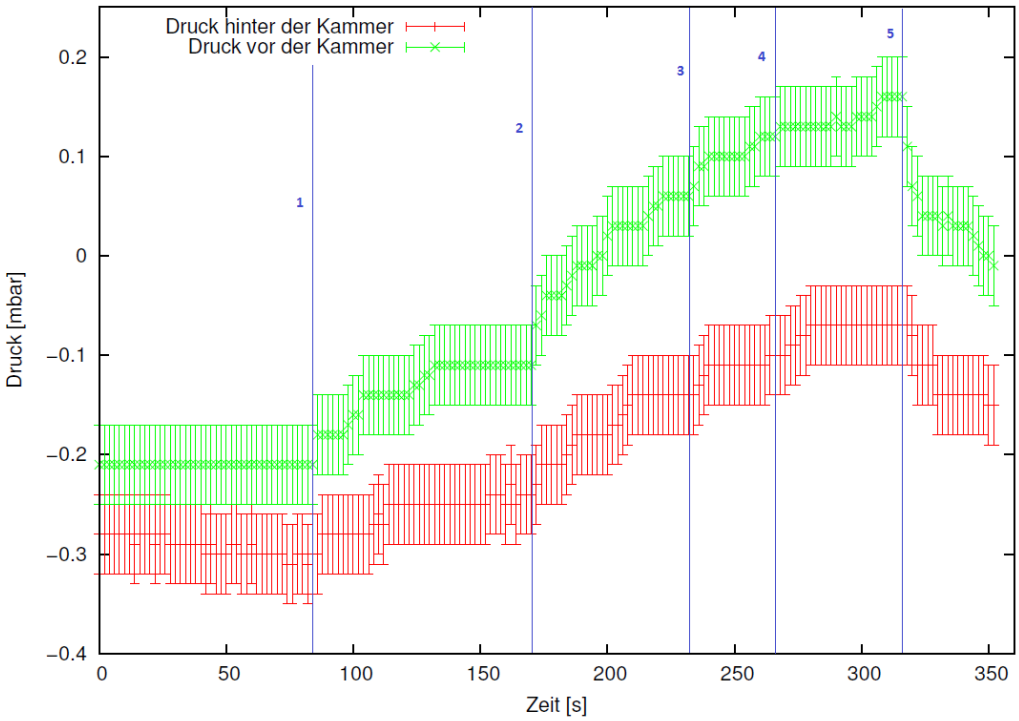


Abbildung 6.4: Die Drücke vor der Kammer sind hier in grün eingezeichnet, die Drücke nach der Kammer in rot. Auf eine Offset Korrektur wird verzichtet, um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Die Daten sind Rebinnings der Originaldaten, um die Druckänderungen besser erkennen zu können. Es wurden die Daten von jeweils 2 Sekunden zusammengefasst. In blau sind die untersuchten Ereignisse eingezeichnet. Gezählt wird von links nach rechts. Die Fehler ergeben sich aus der Ungenauigkeit der Sensoren. Da es sich um einen größeren systematischen Fehler als statistischen Fehler handelt, verringert sich durch das Zusammenfassen der Messpunkte der Fehler nicht.

Aufgrund des Binnings kann nur auf eine Genauigkeit von 2 s gemessen werden.

Tabelle 6.1: Hier sind die Zeitverzögerungen, die bei den einzelnen Events in den verschiedenen Messreihen gesehen wurden, eingetragen. Die Nummerierung der Ereignisse entspricht der in Abbildung (6.4).

Event	Zeitverzögerung in [s]
1	2
2	4
3	2
4	6
5	6

Veränderungen im Druck innerhalb der Erfassbarkeit der Sensoren brauchen im Mittel eine Zeit von (4 ± 2) s, um hinter der Kammer gemessen werden zu können.

6.2 Ausspülen

Da es aufgrund von Undichtigkeiten der Kammer zu Verunreinigungen des Gases kommt, füllt sich diese mit Luft, wenn die Kammer nicht gespült wird. Um Messungen durchführen zu können, muss der Sauerstoffanteil jedoch 100 ppm unterschreiten. Um zu berechnen, wie lange der Ausspülvorgang dauert, wird die Kammer mit Luft gefüllt. Da *Sagox* schwerer als Luft ist, wird die Kammer schräg aufgestellt (siehe Abbildung (6.5)). Die leichtere Luft kann aus den höher gelegenen Ausgängen entweichen. Die Kammer wird gespült und der Sauerstoffanteil gegen die Zeit gemessen (siehe Abbildung(6.6)). Gespült wird mit einem Gasfluss von 3 l/h.

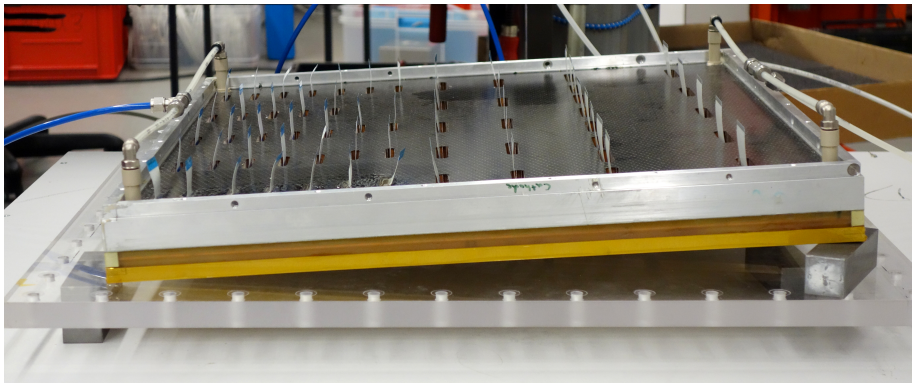


Abbildung 6.5: Auf der linken Seite strömt das Gas ein, auf der rechten Seite fließt es wieder hinaus. Dadurch, dass die Kammer leicht schräg steht, wird die leichtere Luft hinausgedrängt.

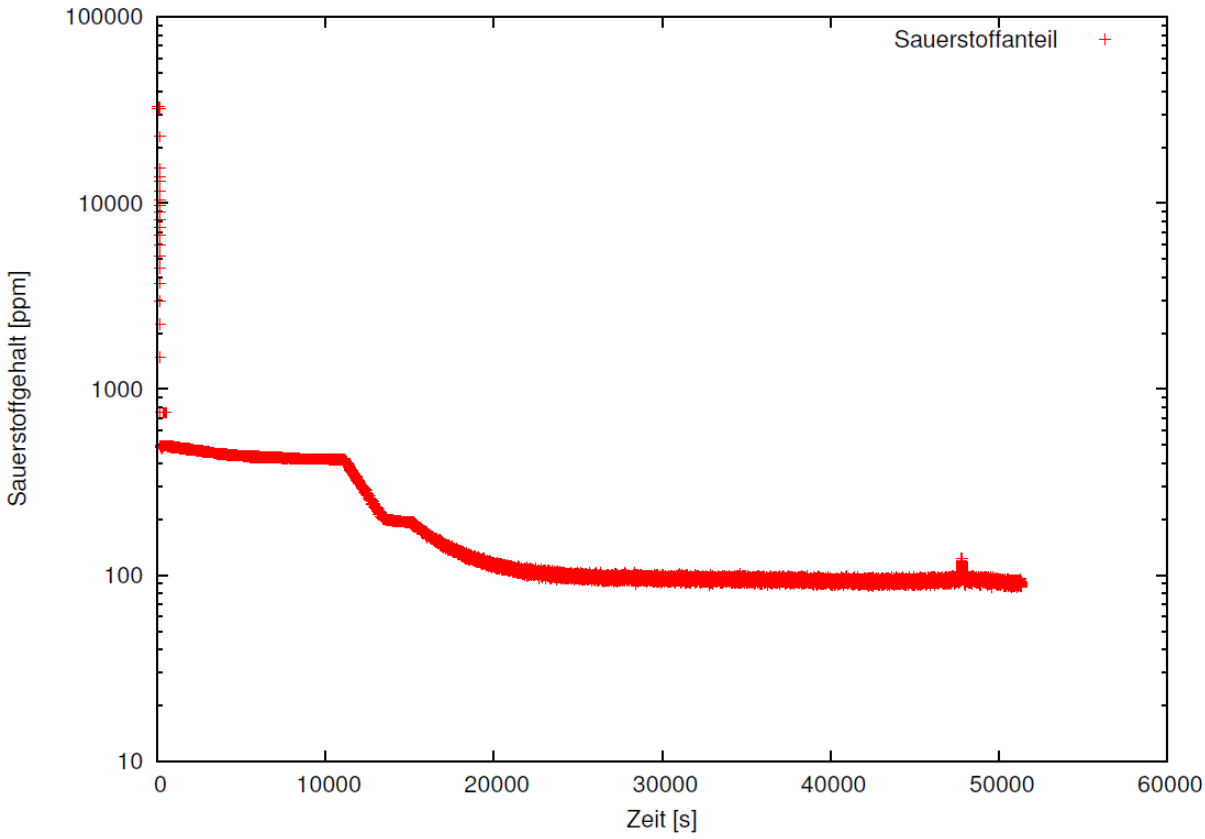


Abbildung 6.6: Hier ist der Sauerstoffanteil beim Ausspülen gegen die Zeit aufgetragen. Es sind im Anfangsbereich noch sehr hohe Konzentrationen (größer 10000 ppm) von Sauerstoff zu erkennen, die dann stark abfallen. Ein rein exponentieller Abfall ist nicht zu erkennen. Der Peak am Ende der Kurve könnte eine „Blase" im System gewesen sein, welche sich gelöst hat. Schon leichte Druckschwankungen wie das Öffnen von Türen und ähnliches können die Ursache dafür sein. Gegen Ende fällt der Sauerstoffanteil unter 87 ppm. Die Messung wurde mit einer Flussrate von $(3 \pm 0,1)\,\mathrm{l/h}$, wie sie auch am Experiment geplant ist.

Die Marke von 100 ppm wird dauerhaft ab einer Zeit von $8,6\,\mathrm{h}$ (31000 s) unterschritten und scheint zunächst gegen einen Wert von ungefähr 90 ppm zu konvergieren.
Im Plot sind mehrere Plateau-Strukturen erkennbar. Dies könnte mit Reservoirs von sauerstoffreichem Gas zusammenhängen. Diese können sich an T-Stücken an der Leitung, die nicht durchgespült wurden, bilden. Turbulenzen an diesen T-Stücken können kleine Mengen des sauerstoffreichen Gases abtragen und den Sauerstoffanteil der Messung erhöhen. Diese Mengen können sehr klein im Vergleich mit dem vorhandenen Sauerstoff in den Endstücken sein. Sie brauchen also sehr lange um abgetragen zu werden, verunreinigen allerdings Messungen im ppm-Bereich. Des Weiteren ist schwer zu sagen, wie sich die Gasströme im Inneren der Kammer verhalten. Es ist durchaus möglich, dass sich Luftblasen sehr lange in den Ecken der Kammer erhalten. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich solche Blasen bilden, kann verringert werden, indem das Gas mit einer geringeren Flussrate einströmt und die Kammer möglichst ohne Turbulenzen aufgefüllt wird.

6.3 Belastungstest

Um eine Einschätzung der wetterbedingten Druckänderungen eines Jahres zu gewinnen, wurden diesbezüglich Daten von der *AG Klimatologie* in Münster erbeten. Die AG Prof. Klemm hat die Druckdaten vom 1.1.2015 um 0:00 Uhr bis zum 7.5.2015 um 12:00 Uhr zur Verfügung gestellt [22]. Da im betrachteten Messzeitraum ein Sensorversagen vorlag, wurden die dort gemessenen Werte in Absprache mit der *AG Klimatologie* ausgeschnitten. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Druckänderungen im ersten Teil des Jahres ähnlich verhalten wie im weiteren Jahresverlauf. In den Daten wurden die maximalen Druckänderungen innerhalb eines 10 Minuten-Intervalls gemessen. Diese Daten seien repräsentativ (siehe Abbildung (6.7)).

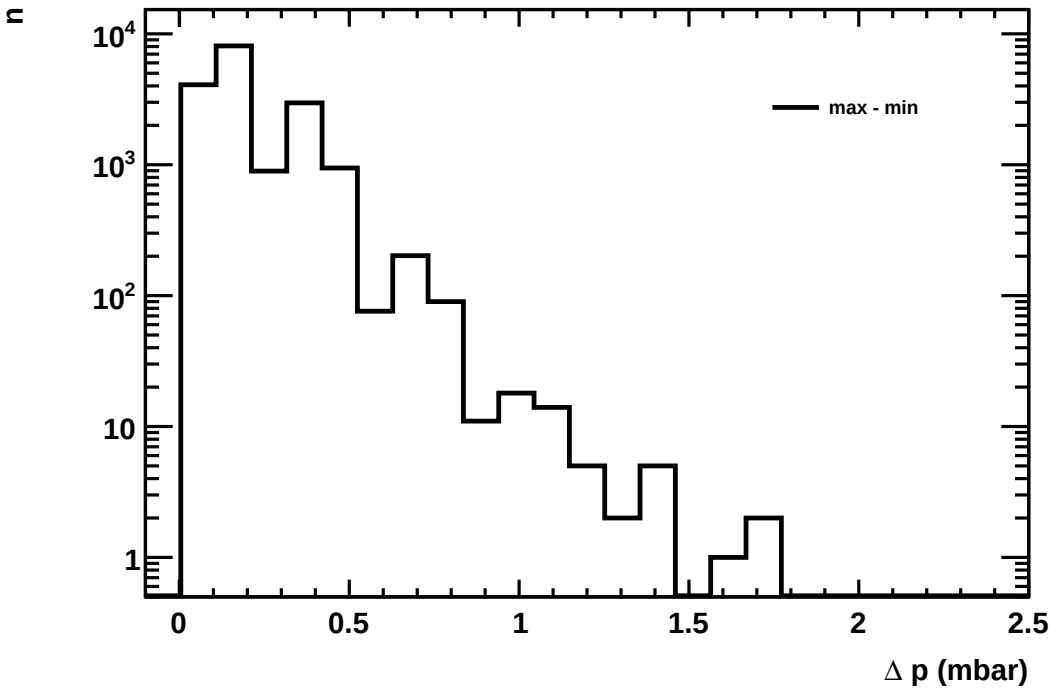


Abbildung 6.7: Hier sind die von der *AG Klimatologie* zur Verfügung gestellten Daten dargestellt. Es wird die Druckdifferenz zwischen geringstem und größtem Druck innerhalb eines 10 Minuten-Intervalls aufgetragen. Diese Daten unterliegen anderen Binnings als die gewählte Unterteilung in 0,1 mbar Schritten. Das führt zu einer leicht abweichenden Darstellung der Daten.

Diese Druckänderungen sollen mittels des Gassystems beschleunigt simuliert werden. Um die Anzahl der Messungen in einem praktisch realisierbaren Rahmen zu halten, muss auf Belastungszyklen für Relativdrücke kleiner als $0,5$ mbar verzichtet werden. Da die größeren Druckdifferenzen zu einer stärkeren Verformung der Folie führen, wird vermutet, dass auf diese die stärkste Materialbelastung zurückzuführen ist. Die Druckzyklen wurden ausgezählt und mit einem Faktor von 365/122 multipliziert, um die Anzahl der Änderungen in einem vollen Jahr abschätzen zu können.

Tabelle 6.2: Hier ist die Häufigkeit der vorkommenden Druckänderungen in einem Jahr dargestellt. Alle Druckänderungen kleiner als $0,5$ mbar wurden vernachlässigt.

Druckintervall in [mbar]	Anzahl der Zyklen im vermessenen Zeitraum	Skaliert auf ein Jahr
0,5-0,6	804	2405
0,6-0,7	158	473
0,7-0,8	260	778
0,8-0,9	77	230
0,9-1,0	13	38
1,0-1,1	28	84
1,1-1,2	15	45
1,2-1,3	7	21
1,3-1,4	2	6
1,4-1,5	3	9
>1,5	3	9

Die Druckzyklen werden simuliert, indem bei konstantem Zustrom des Gases ein Ventil am Ende des Aufbaus geöffnet und geschlossen wird. Das Aufstauen des Gases erhöht den Druck im System annähernd linear. Wenn das Ventil wieder geöffnet wird, fällt der Druck ab.

Annähern der Auslassgeschwindigkeit

Aus den abfallenden Flanken der Druckzyklen lassen sich Kurven annähern, welche den Druckabfall gegen die Zeit beschreiben. Hieraus kann erschlossen werden, wie lange eine Kammer benötigt, um den in ihr aufgebauten Druck abzulassen. Wenn ein Blasenzähler am Auslass angeschlossen ist, führt dies aufgrund der Blasenbildung zu Druckschwankungen im System. Dieses Phänomen spiegelt sich in den Messungen des differenziellen Drucksensors am Ausgang des Systems wider. Da gerade der Druckabfall am Ausgang untersucht werden soll, wird der Blasenzähler für eine 13 Zyklen andauernde Messung entfernt (siehe Abbildung (6.8)).

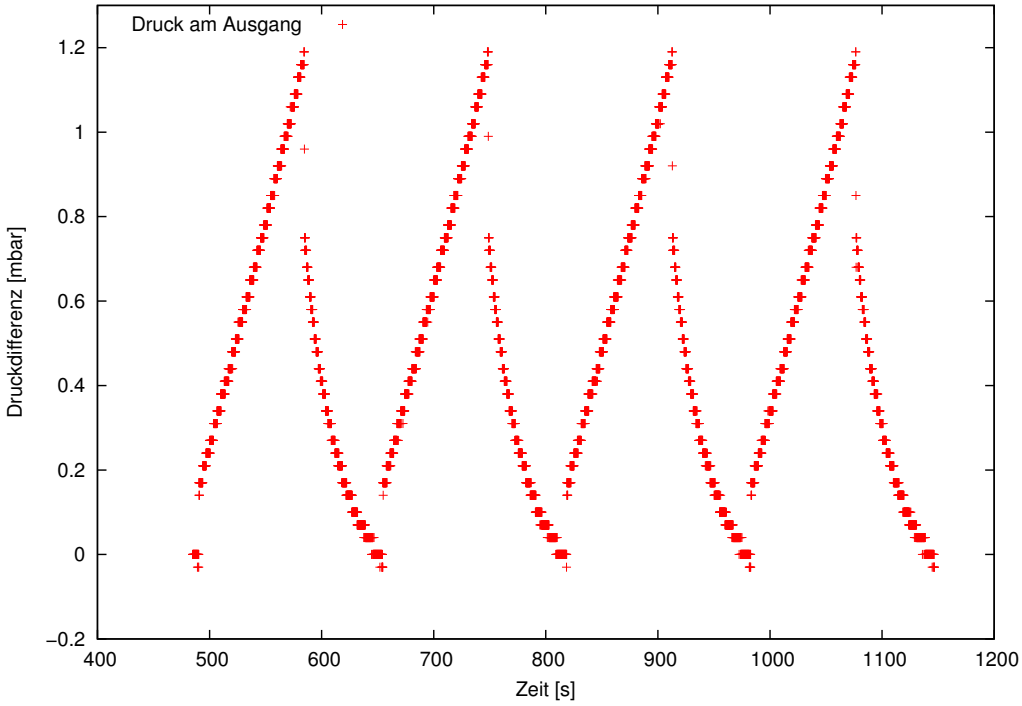


Abbildung 6.8: Hier ist exemplarisch eine Aufzeichnung von 4 Druckzyklen von 0.9 mbar dargestellt. Die Verschiebung der Kurve zu höheren Werten sowie die Lücken, die in dem Druckverlauf direkt nach den Druckspitzen zu sehen sind, könnten mit einer Überlastung der Stromquelle zusammenhängen, verursacht durch das Schalten des Relais.

Es werden die abfallenden Zyklen bei mehreren Peaks genähert. Hierfür werden die Flanken von 5 Peaks übereinander gelegt und diese mittels eines exponentiellen Abfalls genähert (siehe Abbildung (6.9)).

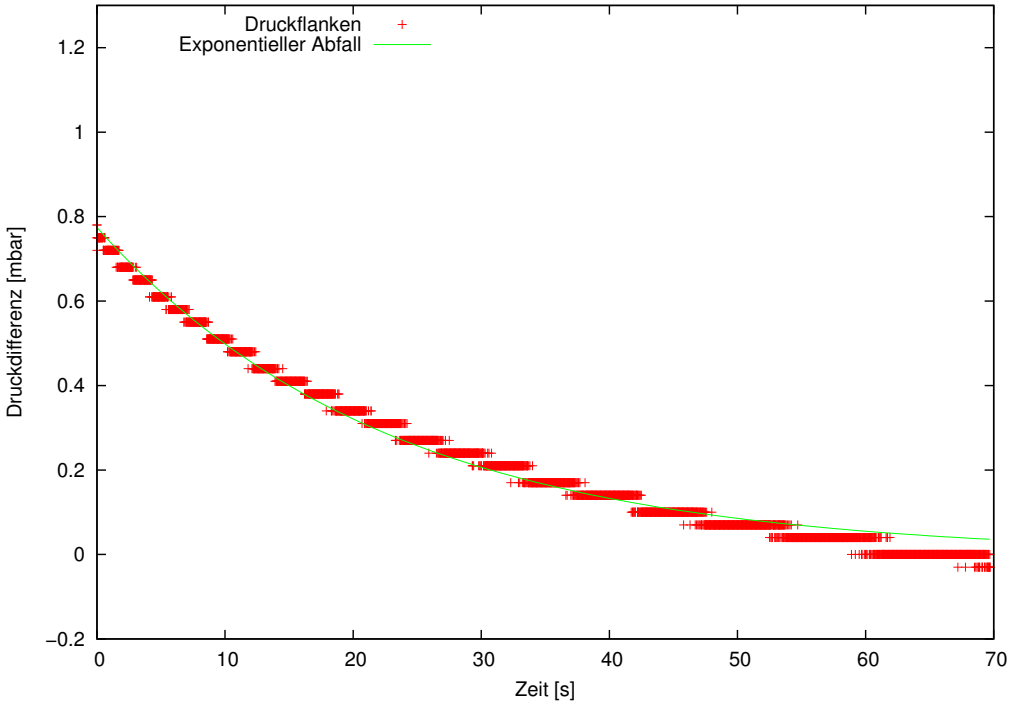


Abbildung 6.9: Zur Erstellung dieses Diagramms wurden 5 Messreihen übereinander gelegt. Die Exponentialfunktion berücksichtigt alle diese Punkte. Auf eine Darstellung der Fehlerbalken wurde verzichtet, um die Graphik übersichtlicher zu halten. Die Abstände zwischen den Messpunkten sind auf ein Problem bei der Digitalisierung zurück zu führen.

Da die Änderung des Drucks von der Druckdifferenz zwischen Detektor und Umgebung abhängt, wird ein exponentieller Ansatz gewählt.
Die Annäherung des exponentiellen Abfalls mit der Funktion $f(t) = a \cdot \exp(b' \cdot t)$ ergibt die Werte $a = 0,774 \pm 0,001$ und $b' = -0,0441 \pm 0,00012$. Hierbei ist der Exponent b' die für die Kammer charakteristische Größe. a ist von den Anfangsbedingungen abhängig. Das der Fit die Datenpunkte für große Zeiten nicht gut beschreibt hängt mit einem nicht näher identifizierten technischen Problem zusammen. Eine mögliche Ursache wäre der durch das Relaisschalten abfallende Strom im System.
Mit diesen Informationen lässt sich kalkulieren, welchen Druckveränderungen die Kammer höchstens ausgesetzt werden darf, ohne dass der Innendruck der Kammer im Vergleich zum Außendruck sehr groß wird.
Um eine für diese Arbeit besser vergleichbare Größe zu erhalten, wird die Zeitvariable t so gewählt, dass sie die Anzahl der 10 Minuten Intervalle angibt. Der hierdurch entstehende Faktor wird mit der *Kammerkonstanten* b' verrechnet.

$$b = 10 \cdot 60 \cdot b' = -26,46 \pm 0,07$$

Damit ergibt sich für den Druck in der Kammer in Abhängigkeit von der Zeit:

$$p(t) = a \cdot e^{b \cdot t} \tag{6.2}$$

Hierbei ist a der differenzielle Druck der Kammer im Vergleich zur Umgebung .
Die Druckänderung pro Zeitintervall lässt sich aus der Ableitung von Gleichung (6.2) errechnen.

$$\dot{p}(t) = a \cdot b \cdot e^{tb} \tag{6.3}$$

Es wird die Annahme gemacht, dass die Kammer maximal 1 mbar Differenzdruck ausgesetzt werden darf. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass sich ein stationärer Zustand zwischen wetterbedingtem Druckabfall außerhalb der Kammer und dem durch Ausströmen verursachten Druckabfall in der Kammer ausbildet. Im Fall eines stationären Drucks würde die zeitliche Abhängigkeit in Gleichung (6.2) herausfallen und die Anfangsbedingungen erhalten bleiben. Damit fällt die zeitabhängige e-Funktion heraus und die maximale Druckänderung kann ausgerechnet werden zu:

$$\dot{p}(t) = a \cdot b = (26,46 \pm 0,07) mbar. \tag{6.4}$$

Die Kammer kann also Druckschwankungen von bis zu $(26,46 \pm 0,07)$ mbar/10min ausgleichen, ohne dass sich in ihr ein Überdruck höher als 1 mbar aufstaut.

Belastung

Die Kammer wird den verschiedenen Druckzyklen ausgesetzt, während der Sauerstoffanteil zu Beginn der Messperioden gemessen wird. Sollte das Material Verschleißerscheinungen zeigen, so sollte dies am Sauerstoffanteil erkennbar sein. Der Sauerstoffanteil vor den Belastungstests wurde in Teil 6.2 bestimmt. Die Messungen werden für die in Tabelle (6.2) angegebenen Druckintervalle entsprechend oft wiederholt.
Bei den Messungen stellte sich heraus, dass der Sauerstoffanteil ebenfalls periodisch schwankt (siehe Abbildung (6.10)).

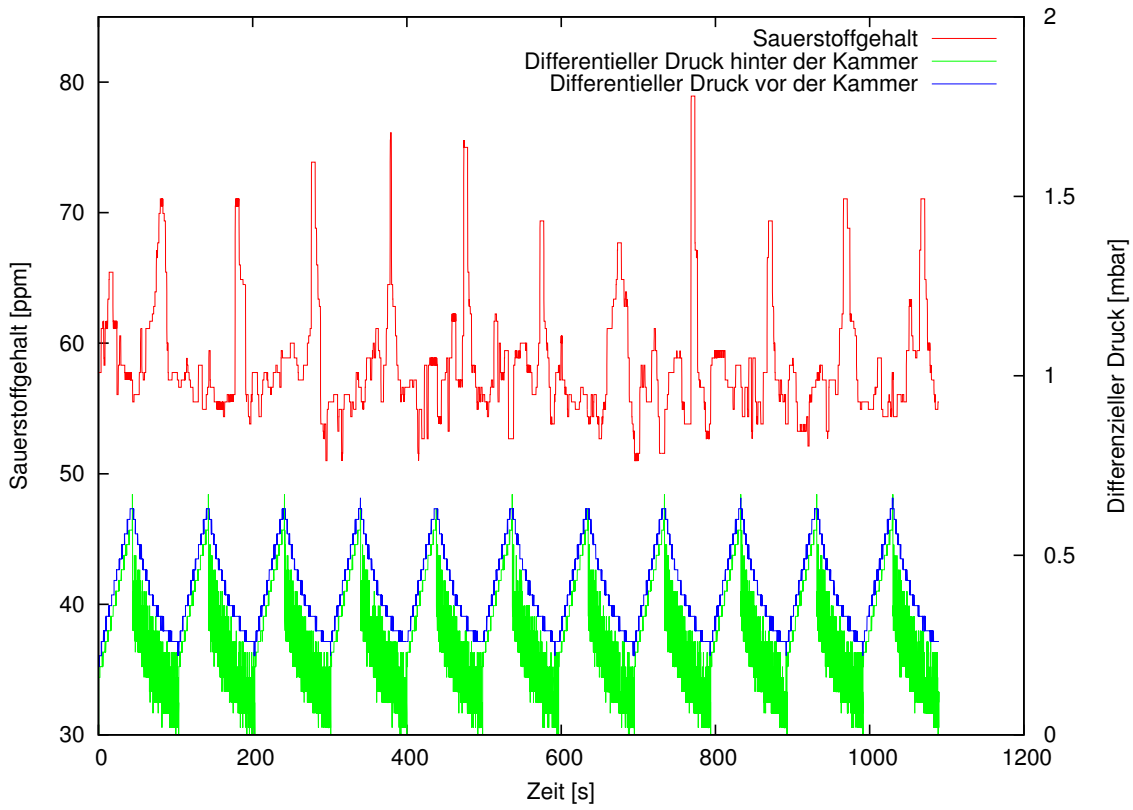


Abbildung 6.10: Die hier aufgetragenen Daten sind während der Anfangsphase der 0.5 mbar Druckzyklen aufgenommen worden. An den abfallenden Flanken der in grün dargestellten Druckzyklen hinter der Kammer lässt sich gut der Einfluss des Blasenzählers auf den Druck erkennen. Der Sauerstoffanteil in der Luft weist jedes mal Spitzen auf, wenn das Gas aus der Kammer abgelassen wird und durch den Sensor hindurch strömt. Das Grundniveau, auf welches der Sauerstoffgehalt fällt, liegt bei (57 ± 1) ppm. Die mit Gaußkurven angenäherten Peaks im Sauerstoffanteil haben im Mittel einen relativen Unterschied von (14 ± 3) ppm.

Um Vergleiche zwischen den Messungen durchführen zu können, wird die Sauerstoffkurve angenähert. Dies geschieht mithilfe einer linearen Funktion, um das Niveau anzunähern, auf welches der Sauerstoffgehalt fällt, und Gaußkurven für die Peaks. Dann werden die relativen Höhen der Gaußkurven zu dem Grundniveau bestimmt, das arithmetische Mittel gebildet und die Standardabweichung als Fehler für de Höhe bestimmt. Als Fehler für das Sauerstoffniveau wird die Abweichung der Geraden-Funktion von einer Konstanten genutzt. Die Näherungen wurden mit dem Programm *Fityk* durchgeführt, welches die Möglichkeit eines leichten und schnellen Annäherns der Peaks bietet, allerdings über keine geeignete Methode zum Erstellen und Ausgeben eines Diagramms verfügt. Exemplarisch sind noch die Messungen der 1.0 mbar Druckzyklen (siehe Abbildung (6.11)) und der 1.5 mbar Druckzyklen (siehe Abbildung (6.12)) dargestellt.

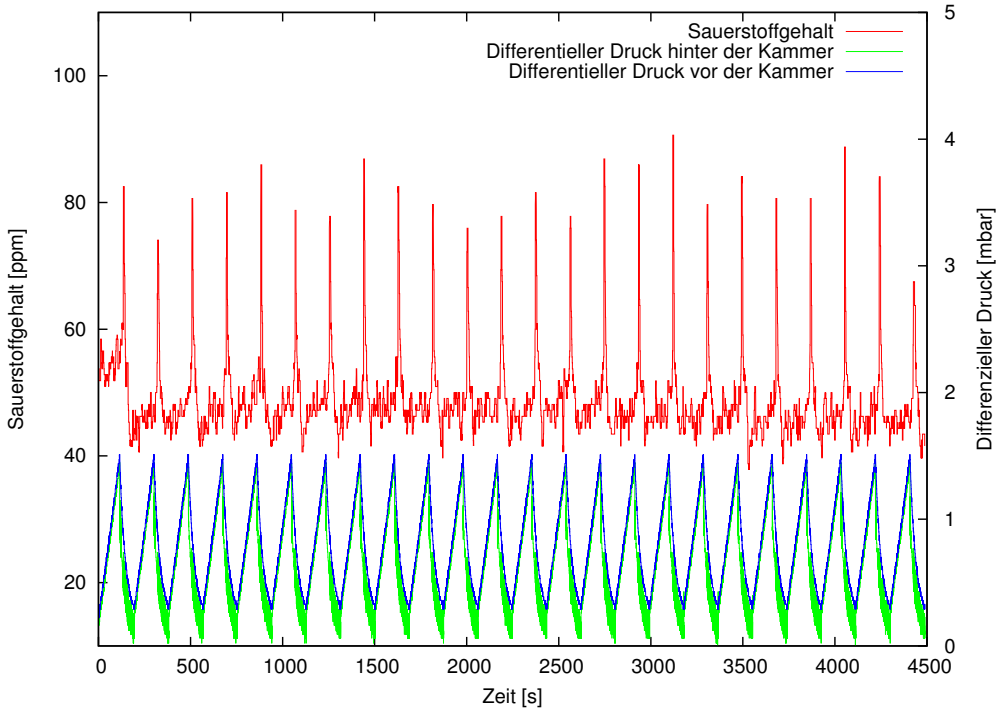


Abbildung 6.11: Diese Daten wurden zu Beginn der Druckzyklen auf 1.0 mbar genommen. Das Niveau, auf das der Sauerstoffgehalt immer wieder fällt, liegt bei (48 ± 2) ppm. Die Spitzen erreichen eine Differenz zum normalen Niveau von (33 ± 6) ppm.

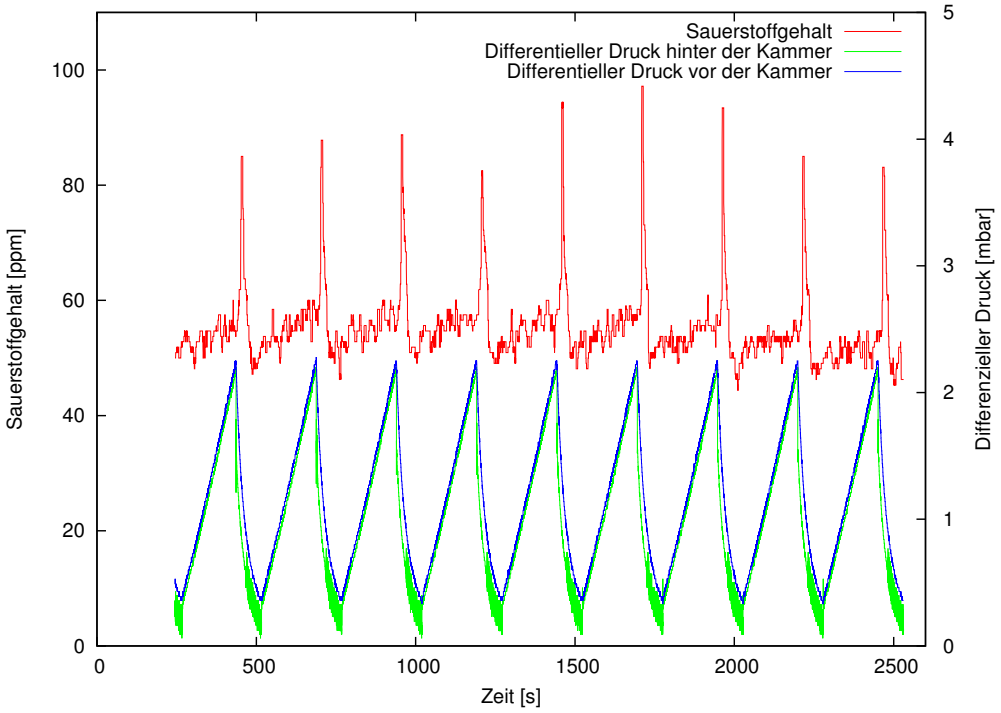


Abbildung 6.12: Die hier dargestellten Daten zeigen die ersten Zyklen bei den Belastungstests bis 1.5 mbar. Das Grundniveau des Sauerstoffgehalts beträgt (53 ± 3) ppm. Die Sauerstoffspitzen erreichen eine Differenz zum Normalniveau von (31 ± 4) ppm.

Die Sauerstoffpeaks könnten ihren Ursprung an Undichtigkeiten im Schlauch oder Verbindungsstücken haben. Ist das Ventil geschlossen, staut sich das Gas in dem System auf, und der in das System eingebrachte Sauerstoff sammelt sich an einer undichten Stelle. Wird das Ventil wieder geöffnet, strömt das Gas aus der Kammer hinaus, spült die Leitungen aus und wird vom Sensor detektiert. Die Sauerstoffverunreinigungen fallen innerhalb kürzester Zeit wieder auf den Ursprungswert. Die Messungen aus Kapitel 6.2 zeigen, dass Verunreinigungen, die aus der Kammer kämen deutlich länger benötigen würden um wieder abzuklingen.
Die Sauerstoffanteile während der verschiedenen Belastungstests verhalten sich ähnlich. Die einzige Ausnahme stellt hier die erste Messung bei $0,5$ mbar Überdruck dar. Dies könnte damit zusammenhängen, dass zu Beginn der Belastungszyklen das System noch nicht so lange ausgespült wurde, wie bei den später durchgeführten Tests. Es könnten sich noch Reste sauerstoffreichen Gases im System befunden haben, welche den Sauerstoffanteil bei Messungen erhöht haben. Durch die erhöhten Sauerstoffwerte würden sich die durch die Kammer verursachten Peaks weniger stark abheben.
Um den Sauerstoffgehalt unter normalen Betriebsbedingungen zu messen, wird nach den Belastungstests noch eine Messung der Sauerstoffkontamination durch die Kammer durchgeführt (siehe Abbildung (6.13)).

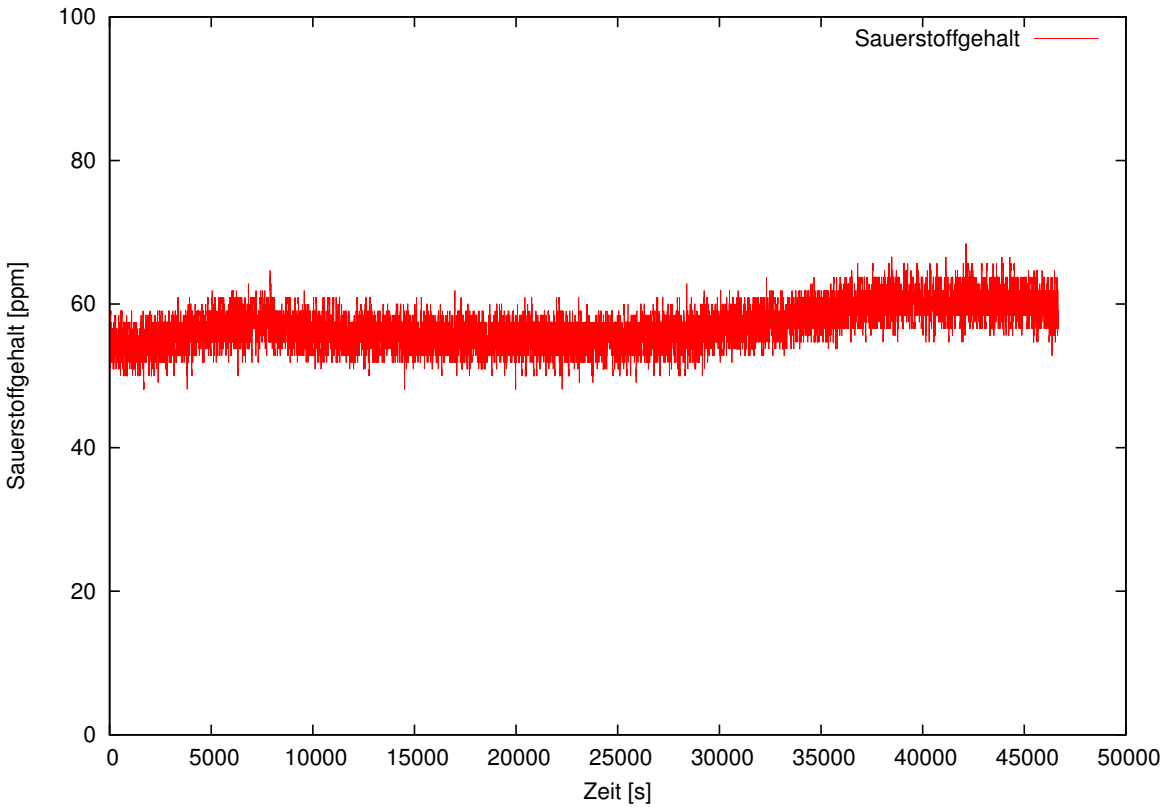


Abbildung 6.13: Der Sauerstoffgehalt wurde über Nacht gemessen. Der Sauerstoffgehalt schwankt gegen Ende der Messung um 60 ppm herum. Der Wert nimmt im Verlauf der Zeit zu. Messungen über einen noch größeren Zeitraum würden genaueren Aufschluss über eventuelle Beschädigungen geben. Starke Beschädigungen würden jedoch größere Sauerstoffanteile verursachen.

Der Sauerstoffgehalt schwankte nach einem Ausspülvorgang von knapp 14 h vor den Belastungstests um 90 ppm. Nach den Belastungstests schwanken die Werte um 60 ppm. Die Werte sind wider Erwarten geringer als vor den Tests. Dies könnte damit zusammenhängen, dass nach dem ersten Ausspülvorgang noch nicht der komplette Sauerstoff ausgespült wurde. Nachdem die Kammer über einen Zeitraum von wenigen Wochen gespült wurde und ständige Druckveränderungen im Gas stattfanden, kann angenommen werden, dass ein Großteil der sauerstoffreichen Restgase ausgelöst wurde. Der geringe Sauerstoffanteil in der Messung nach den Belastungstests lässt den Schluss zu, dass diese keine größeren Schädigungen an der Kammer hinterlassen haben.

7 Zusammenfassung

Zur Charakterisierung des Verhaltens eines Prototypen des CBM-TRDs wurde zunächst ein Gassystem entwickelt, mit dessen Hilfe die verschiedenen in dieser Arbeit vorgestellten Versuche durchgeführt wurden. Als Herzstück der Steuerung und der Datennahme wurde ein *Arduino Uno* genutzt. Leichte Probleme bei der Datennahme wirkten sich nicht negativ auf das Projekt aus und können wahrscheinlich im Rahmen der Weiterentwicklung unter realistischem Aufwand gelöst werden. Das Gassystem konnte alle gestellten Anforderungen erfüllen.

Die Messungen zum Druckabfall an der Kammer ergaben, dass bei einem Fluss von 3 l/h der Druck an jeder Kammer um $(0,16 \pm 0,02)$ mbar abfällt. Da geplant ist, bis zu 6 Kammern in einer Linie zu versorgen, würde dies einen Druckunterschied von $(1,0 \pm 0,1)$ mbar zwischen dem ersten und letzten Detektor bedeuten [23]. Dieser Druckunterschied ist höher als zunächst erwartet. Dies könnte umgangen werden, indem die Rohrdurchmesser der Zu- und Ableitungen vergrößert werden, mehr Anschlüsse für die Gaszu- bzw. -ableitung angebracht werden, indem die Dichtigkeit der Kammern erhöht würde und dadurch der benötigte Fluss verringert würde oder indem weniger Kammern mit einer Zuleitung versorgt werden.
Die Untersuchung des Antwortverhaltens zeigte, dass Druckänderungen größer als $0,04$ mbar am Eingang der Kammer (4 ± 2) s benötigen, um hinter der Kammer gemessen werden zu können. Bei einer Detektorlinie von 6 Detektoren würde es (24 ± 12) s benötigen, bis eine Druckschwankung am Eingang auch am Ende des Systems zu messen ist.

Die Messungen, aus denen der zeitliche Verlauf des Druckabfalls der Kammer bestimmt wurde, ergaben, dass die Kammern sich relativ schnell an den Außendruck anpassen können. Eine einzelne Kammer kann eine Druckänderung von 19 mbar/10min ausgleichen, ohne dass die Kammer einem stärkeren Überdruck als 1 mbar ausgesetzt wurde. Druckänderungen solchen Ausmaßes wurden während des vermessenen Jahres allerdings nicht beobachtet.
Da die Idee des Abschätzens der Auslassgeschwindigkeit als nachrangig betrachtet wurde, wurden die Überdruckzyklen für eine einzelne Kammer deutlich zu hoch angesetzt. Da aber noch nicht klar ist, wie hoch die Belastungen für Kammern in einem größeren Verbund ausfallen, könnten die durchgeführten Tests in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen.
Die Messungen vor der Testung ergaben Sauerstoffwerte im Bereich von 90 ppm, während nach den Tests ein Sauerstoffgehalt von 60 ppm gemessen werden konnte. Daher kann davon ausgegangen werden, dass keine relevanten Schädigungen an der Kammer stattfanden.
Ob anderweitig Schädigungen aufgetreten sind, die nicht die Dichtigkeit der Kammer betreffen, sondern beispielsweise die Durchschlagsfestigkeit der *Kapton*-Folie, kann nicht gesagt werden. Hierfür ist der Sauerstofftest kein geeigneter Indikator.

8 Anhang

8.1 Flussregler

Tabelle 8.1: Gerätenummern der Aalborg Flussmesser.

Flussmesser	Seriennummer
Aalborg 1	277648-2
Aalborg 2	277648-1
Aalborg 3	277648-3
Aalborg 4	Nicht lesbar

8.1.1 Programme

Druckabfall

```
// Include this library for using current loop functions
#include <currentLoop.h>
#define Kanal1 CHANNEL1
#define Kanal2 CHANNEL2
#define Kanal3 CHANNEL3
float current; //Lauf oder Messvariablen
int Ventil=0;// Regelung fuer Ventil
long int t=0; //Zeit
float tread=0; //zeitausgabe
float k=1000; //Variable zur Umrechnung int—>float
//*********************************************
//Steuerung:
int d=100; //Zeitlicher Abstand zwischen zwei Messungen in Millisekunden
int AN=5000 ;  //Zeit(Millisekunden) die das Ventil geoeffnet ist
int AUS=5000;  // Zeit(Millisekunden) die das Ventil geschlossen ist
//Kalibration des Drucksensors
float offset1=11.73; //Bestimmung des offsets rot
float steigung1=1.21; //Bestimmung der steigung rot
//%%%
```

```
int A=0;//Schleifenzaehler
void setup()
{
  //Baud Rate.
  Serial.begin(57600);
  delay(100);
  // Switch the 24V DC-DC converter
  sensorBoard.ON();
  // Festlegung des Pins
  pinMode(12,OUTPUT);
  digitalWrite(12,LOW);
  delay(2000);
}
void loop()
{
//Die Messwerte werden genommen
    if (sensorBoard.isConnected(Kanal1) || sensorBoard.isConnected(Kanal2) )
  {
  do{
    digitalWrite(12,LOW);
    // Get the sensor value as a curren in mA
    current = sensorBoard.readCurrent(Kanal1 );
    //Serial.print("Wert Orbis 1 : ");
    current=(current-offset1)*steigung1; //Kalibration auf den Sensor 1r
    Serial.print(tread);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(current);
    current = sensorBoard.readCurrent(Kanal2 );
    current=(current-offset2)*steigung2;
    Serial.print("\t");
    Serial.print(current);
    current = sensorBoard.readCurrent(Kanal3 ); //Sauerstoff messung
    Serial.println(current);
    //Serial.println(" mA");
    t=t+d;
    tread=t/k;
  A=A+1;
  delay(d);
    }while (A<=((AN+AUS)/d));
  A=0;
  }
```

```
  else {//sollte nichts angeschlossen sein, wird ne null rausgeworfen
        //und das Ventil geoeffnet
    Serial.println("0");
    Serial.print("\t");
    delay(d);
    digitalWrite(12,LOW);
  }
}
```

8.1.2 Drucksensoren kalibrieren

```
// Bibliothek wird eingefuegt um Kanaele auslesen zu koennen
#include <currentLoop.h>
#define Kanal1 CHANNEL1
#define Kanal2 CHANNEL2
float current; //Lauf oder Messvariablen
int Ventil=0;// Regelung fuer Ventil
long int t=0; //Zeit
float tread=0; //zeitausgabe
//*******************************************
//Steuerung:
int d=100; //Zeitlicher Abstand zwischen zwei Messungen in Millisekunden
int AN=5000 ;  //Zeit(Millisekunden) die das Ventil geoeffnet ist
int AUS=2000;  // Zeit(Millisekunden) die das Ventil geschlossen ist
float NORMALDRUCK1=0, UEBERDRUCK1=0, STEIGUNG1=0; //benoetigt um Normaldruck
 //variable/ueeberdruck variable fuer Kanal 1 zu bestimmen
float NORMALDRUCK2=0, UEBERDRUCK2=0, STEIGUNG2=0; //benoetigt um Normaldruck
//variable/ueeberdruck variable fuer Kanal 2 zu bestimmen
int MESSUNGEN=100; //Anzahl der Messzyklen
//Kalibration des Drucksensors
int A=0;//Schleifenzaehler
void setup() //Anfangs Konfigurationen
{
  Serial.begin(57600);//Baud Rate.
  delay(100); //Wartet 100 Millisekunden
  sensorBoard.ON();
  pinMode(12,OUTPUT); //Festlegung der Pins. Pin 12 ausgang
  delay(2000); //wartet 2 Sekunden
  digitalWrite(12,LOW); //Gibt kein Ausgangssignal auf Pin 12
  Serial.println("Vorsicht, UEBERDRUCK entsteht. Kammer und
Bubbler aus dem Fluss herausnehmen"); //Warnung an den betreibenden
  delay(5000);
```

```
}
void loop() //Das eigentliche Programm
{
//Die Kalibration
    if (sensorBoard.isConnected(Kanal1)) //Sichert das nicht belastet wird,
// wenn nichts angeschlossen ist
    if (A==0) //Sorgt dafuer, dass der Kalibrationsvorgang nur
//einmal durchgefuehrt wird
  {
    digitalWrite(12,LOW); //Schaltet das Ventil auf
    delay(10000);
  do{
    // Schleife nimmt Messwerte fuer den Normaldruck
    current = sensorBoard.readCurrent(Kanal1 );
    NORMALDRUCK1=NORMALDRUCK1+current;
 //Nimmt die Messwerte fuer den ersten Sensor
    current = sensorBoard.readCurrent(Kanal2 );
    NORMALDRUCK2=NORMALDRUCK2+current;
//Nimmt die Messwerte fuer den zweiten Sensor
  A=A+1;
  delay(d); //wartet und legt die Messfrequenz fest
    }while (A<=MESSUNGEN); //Anhzahl der Messungen
  NORMALDRUCK1=NORMALDRUCK1/MESSUNGEN; //Bilden des Mittelwerts
  NORMALDRUCK2=NORMALDRUCK2/MESSUNGEN;
  A=0; //setzt zaehler zurueck, fuer zweite schleife
  digitalWrite(12,HIGH); //schliesst Ventil
  delay(120000);
do{ //Nimmt Messwerte von hohem druck
    // Get the sensor value as a curren in mA
    current = sensorBoard.readCurrent(Kanal1 );
    UEBERDRUCK1=UEBERDRUCK1+current; // Nimmt Messwerte
    current = sensorBoard.readCurrent(Kanal2 );
    UEBERDRUCK2=UEBERDRUCK2+current;
  A=A+1;
  delay(d);
    }while (A<=MESSUNGEN); //anzahl der Messungen
  UEBERDRUCK1=UEBERDRUCK1/MESSUNGEN; //Berechnet den Offset
  UEBERDRUCK2=UEBERDRUCK2/MESSUNGEN;
  STEIGUNG1=(UEBERDRUCK1-NORMALDRUCK1)/10;
//Berechnet den Umrechnungsfaktor
  STEIGUNG2=(UEBERDRUCK2-NORMALDRUCK2)/10;
```

```
  Serial.println("Bestimmung der Kalibrationsparameter ergibt:");
 //Gibt Werte an den Nutzer aus
  Serial.print("Umrechnung fuer Kanal1:   ");
  Serial.print(STEIGUNG1);
  Serial.println("mbar/mA");
  Serial.print("Offset fuer Kanal1:   ");
  Serial.print(NORMALDRUCK1);
  Serial.println("mA");
  Serial.println("*********************************");
  Serial.println("Bestimmung der Kalibrationsparameter ergibt:");
  Serial.print("Umrechnung fuer Kanal2:   ");
  Serial.print(STEIGUNG2);
  Serial.println("mbar/mA");
  Serial.print("Offset fuer Kanal2   :");
  Serial.print(NORMALDRUCK2);
  Serial.print("mA");
  }
  else
  { //hat die Messung bereits stattgefunden, wir das Ventil aufgeschaltet
     digitalWrite(12,LOW);
     delay(10000);
  }
  else {//sollte nichts angeschlossen sein, wird ne null
//rausgeworfen und das Ventil geoeffnet
    Serial.println("0");
    Serial.print("\t");
    delay(d);
    digitalWrite(12,LOW);
  }
}
```

Belastungstests

```
//  Bibliothek wird eingefuegt um Kanaele auslesen zu koennen
#include <currentLoop.h>

#define Kanal1 CHANNEL1
#define Kanal2 CHANNEL2
#define Kanal3 CHANNEL3
#define Kanal4 CHANNEL4
```

```
//benoetigt fuer das Nehmen der Messwerte
//*****************************************
//*****************************************
float current; //Lauf oder Messvariablen
float offset=0;// bestimmung des fluss offsets
long int t=0; //Zeit
float tread=0; //zeitausgabe
float k=1000; //Variable zur Umrechnung int-->float
float M; //Variable zur messung des drucks
int f=0;
//*******************************************



int arrayvar=0; //benoetigt als index fuer das array
int durchlaufzaehler=0; //benoetigt als Index fuer die
//Anzahl der Messzyklen
int durchlauefe=15 ; // Anzahl der Testlaeufe
int wartevar=0; //
int wartezeit=700; // Zeit in 1/10sekunden

//*******************************************


// Einstellungen zum Messzyklus
float maxdruck=0.7;    //Maximaldruck, dem der Kammer ausgesetzt wird


float druckgrenze[3]; //Array um druckgrenze zu ueberpruefen
int Ventil=0;// Regelung fuer Ventil

//Steuerung:

int d=100; //Zeitlicher Abstand zwischen zwei Messungen
//in Millisekunden


//Kalibration der Drucksensoren

float offset1=12.30; //Bestimmung des offsets Kanal1
float steigung1=1.15; //Bestimmung der steigung Kanal1
```

```
//%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

float offset2=12.42; //Bestimmung des offsets Kalnal2
float steigung2=1.14; //Bestimmung der steigung Kanal2

int A=0;//Schleifenzaehler

//einstellungen zur Ausgabe und Belegung der Pins
void setup()
{
  //Baud Rate.
  Serial.begin(57600);
  delay(100);
  // Switch the 24V DC-DC converter
  sensorBoard.ON();
  // Festlegung des Pins
  pinMode(12,OUTPUT);
  delay(2000);
  druckgrenze[0]=0;       // Array
  druckgrenze[1]=0;       //
  druckgrenze[2]=0;       //
}

void loop()
{


//Die Messwerte werden genommen
// Ueberpruefen des Anschluss
//#####################################
//#####################################
    if (sensorBoard.isConnected(Kanal1)) //stellt sicher, dass
//Sensoren angeschlossen sind
  {
    delay(10000);
    //Schleifenzaehler
    while (f <=10) //schleife um denn "nulldruck" im system
    //zu bestimmen, auf den der Ueberdruck aufgerechnet wird.
    {
    current = sensorBoard.readCurrent(Kanal1); //liest werte kanal 1
```

```
    current=(current-offset1)*steigung1; //Rechnet strom in druck um
    offset=offset+current; //Mittelt ueber 10 druck messungen
    f=f+1;
    }
    offset =offset/10; //bestimmter offset
    while (durchlaufzaehler<=durchlauefe) //bestimmt die Anzahloe
//der Druckzyklen
    {




  // Nimmt Messwerte

    current = sensorBoard.readCurrent(Kanal1); //Drucksensor 1
    current=(current-offset1)*steigung1; //Kalibrierung des
    //ersten kanals
    Serial.print(tread); //schreibt Zeitvariable aus
    Serial.print("\t");
    Serial.print(current);
   M=current;      //Variable benoetigt um den Druck ins
    //array zu schreiben
    //und das Ventil zu oeffnen
    current = sensorBoard.readCurrent(Kanal2); //Drucksensor 2
    current=(current-offset2)*steigung2; //Kalibrierung
    //des ersten kanals
    Serial.print("\t");
    Serial.print(current);
    Serial.print("\t");
    current = sensorBoard.readCurrent(Kanal3);
    //liest sauerstoffgehalt
    Serial.print(current);
    Serial.print("\t");
    current = sensorBoard.readCurrent(Kanal4);
    //liest umgebungsdruck
    Serial.print(current);
    Serial.println("\t");
    //current = sensorBoard.readCurrent(Kanal3);d
   // Serial.print(current);
    //Serial.print("\t");
```

```
    //current = sensorBoard.readCurrent(Kanal4);
    //Serial.println(current);

 //beschreibt array

    druckgrenze[arrayvar]=M; //Array wird beschrieben um
    //druck zu bestimmen
    arrayvar=arrayvar+1; //Index laeuft

    if (arrayvar==2) //laesst array zaehler wieder von vorne beginnen
    {
      arrayvar=0;
    }


    if ((druckgrenze[0]+druckgrenze[1]+druckgrenze[2]) <=
maxdruck*3+offset*3 && wartevar==0) //legt maximaldruck fest
      {
        digitalWrite(12,HIGH); // schliesst Ventil
      }
    else //sorgt dafuer, dass der Druck wieder auf null abfaellt, bevor
    //das Ventil wieder geschlossen wird
      {
        digitalWrite(12,LOW); // oeffnet Ventil
        wartevar=wartevar+1;

        if (wartevar==wartezeit) //haelt ventil lange genug offen
    //damit der druck entweichen kann
        {

          wartevar=0; //setzt wartevar auf null, damit if bedingung
    //erfuellt ist und das ventil sich wieder schliessen kann
          durchlaufzaehler= durchlaufzaehler+1; //Zaehlt die anzahl
    //der Ventil zyklen mit
        }

      }



    delay(d); //wartet 100 ms
```

```
    t=t+d; //Laesst Zeitvaraible vort laufen
    tread=t/k; //variable um die Zeit auslesen zu koennen


  } //Ende While schleife


        digitalWrite(12,LOW); // beendet messung
        Serial.println("#Messung beendet");
        Serial.print("# Nulldruck im System:");
        Serial.print("\t");
        Serial.println(offset); //schreibt denn nulldruck aus
        delay(86400000); // haelt zustand fuer einen tag



  }



//Sicherung, anschluss
//#########################################
//#########################################


  else {//sollte nichts angeschlossen sein, wird
    //ne null rausgeworfen
    Serial.println("0");
    Serial.print("\t");
    delay(d);
    digitalWrite(12,LOW);
  }



}
```

Literaturverzeichnis

[1] Perer Braun-Munzinger, Johanna Stachel, The quest for the quark-gluon plasma, Juli 2007

[2] J. Schnapka, Doppelspurerkennung unter Verwendung der Kathodenauslese am Zeus-Übergangsstrahlungsdetektor, Bonn 1998

[3] W. Nolting, Grundkurs Theoretische Physik 4, 7. Auflage, Kapitel 2.2, 2010

[4] C. Bergmann, Development, Simulation and Test of Transition Radiation Detector Prototypes for the Compressed Baryonic Matter Experiment at the Facility for Antiproton and Ion Research, Münster 2014

[5] A. Andronic, J.P. Wessels, Transition Radiation Detector, CERN 2011

[6] K.A. Olive et. al (Particle Data Group), Chin. Phys. C38, 090001, 2014, `http://pdg.lbl.gov`

[7] U. Hansen, Vorlesung Geophysik für Fortgeschrittene 1, Wintersemester 2013/2014

[8] W. Nolting, Grundkurs Theoretische Physik 4, 7. Auflage, Kapitel 1.4, 2010

[9] P. J. Mohr, B.N. Taylor, D.B. Newell, CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010, November 2012

[10] C. Gerthsen, Physik, 23. Auflage, Kapitel 3.3.6, 2006

[11] H. Tränkler, L. Reindl, Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft, 2. Auflage, 2014

[12] GESTIS Stoffdatenbank, `http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/007180.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0`, Zugriff am 27.9.2015

[13] *First Sensor*: Datenblatt CTE7000 / CTU7000 Series, entnommen `http://www.first-sensor.com/cms/upload/datasheets/DS_Standard-CTE-CTU7000_E_11507.pdf` Zugriff am 17.9.2015

[14] Oerlikon, Sicherheitsdatenblatt, `http://www.oerlikon.com/leyboldvacuum/de/dokumentation/download-von-dokumenten/safety-data-sheets-download/` Zugriff am 29.9.2015

[15] *Hach*: Anleitung "ORBISPHERE Model K1100 or M1100 Sensor and Model 410 Analyzer", Dokumentennummer DGMK1X00-MAN/E, 2010

[16] *Aalborg*: Datenblatt, Aalborg GFM-Massenflussmesser `http://www.aalborginstruments.de/index.php/main_page/product_info/cPath/64_66_68/products_id/452924`, Zugriff am 24.7.2015

[17] Anleitung *GFM Mass Flow Meters*, Datenblatt TD9411M Rev. K, Juli 2010

[18] ISM GMBH: Bedienungsanleitung: Universeller Gaslecksucher GAS-CHECK 5000is, 1999

[19] entnommen `http://danielscheidler.de/wp-content/uploads/2013/02/ArduinoUno_R3_Front.jpg` Zugriff am 20.9.2015

[20] DuPont, Technisches Daten Blatt: DUPont Kapton HN, 2011

[21] N. Heine, Technische Zeichnungen, Januar 2014

[22] O. Klemm, Privater E-mail verkehr, Mai 2015

[23] D. Emschermann, `http://cbm.uni-muenster.de/cbmroot/more/triggerrate_2014/v14x/00_pad_size_layer00.png`

Danksagungen

Abschließend möchte ich einige Danksagungen aussprechen. Zunächst möchte ich Prof. Wessels für die Aufnahme in die Arbeitsgruppe und Themenstellung danken. Des Weiteren danke ich PD Dr. Christian Klein-Bösing für die Übernahme der Zweitkorrektur.
Martin Kohn und Dr. Cyrano Bergmann sei gedankt für ihre Betreuung der Arbeit. Beide standen mir bei verschiedenartigsten Problemen - ganz gleich ob trivialer Natur oder scheinbar unlösbar-tatkräftig zur Seite.
Besonderer Dank gilt auch Philipp Kähler für sein unermüdliches Gegenlesen, der darüber hinaus bei jeglichen Fragen, auch bei jenen, die nicht die Physik betrafen, ein guter Ansprechpartner war. Er hat sowohl beim Layout als auch bei inhaltlichen Fragen viele wichtige Hinweise gegeben.
Zuletzt möchte ich noch Marvin Fehrenbacher für eine angenehme und vergnügliche Atmosphäre im Büro und für seine ständige Hilfsbereitschaft danken.

Plagiatserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit *Aufbau und Charakterisierung eines Gassystems für den CBM TRD* selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

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