

# GASANALYSESTATION ZUR KONTROLLE DER GASQUALITÄT IN DER PROBELINIE DES CBM-TRD-GASSYSTEMS

BACHELORARBEIT Hannes Olbring

Universität Münster Institut für Kernphysik AG Andronic

Erstgutachter: Prof. Dr. Anton Andronic Zweitgutachter: Apl. Prof. Dr. Christian Klein-Bösing

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, *Hannes Olbring*, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Gedanklich, inhaltlich oder wörtlich übernommenes habe ich durch Angabe von Herkunft und Text oder Anmerkung belegt bzw. kenntlich gemacht. Dies gilt in gleicher Weise für Bilder, Tabellen, Zeichnungen und Skizzen, die nicht von mir selbst erstellt wurden.

Münster, 5. Oktober 2023

Hannes Olbring

## Inhaltsverzeichnis

1	Einle	Einleitung						
2	The	Theorie						
	2.1	Überg	angsstrahlung	5				
		2.1.1	Radiator	5				
		2.1.2	Vieldrahtproportionalkammer	6				
		2.1.3	CBM-TRD	7				
	2.2	Das Gassystem des CBM-TRD						
	2.3	Elektronische Theorie						
	2.4	Tauter	mperatur, Relative Feuchtigkeit und Absolute Feuchtigkeit	11				
		2.4.1	Umrechnung: Absolute und relative Feuchtigkeit	11				
		2.4.2	Umrechnung: Relative Feuchtigkeit und Tautemperatur	14				
3	Gasa	asanalysestation 17						
	3.1	Schaltung						
	3.2	2 Gassensoren						
		3.2.1	Kohlenstoffdioxid-Sensor	21				
		3.2.2	Sauerstoff-Sensor	22				
		3.2.3	Feuchtigkeitssensor	23				
		3.2.4	Flussmessgerät	25				
	3.3	Umgel	bungsluftsensorik	26				
		3.3.1	Feuchtigkeits-und Temperatursensor	26				
		3.3.2	Umgebungsdrucksensor	27				
4	Aufl	oau		29				
	4.1	Feucht	tigkeitsmessung	29				
	4.2	Gassys	stem	32				
		4.2.1	Zirkulationspumpe	33				
		4.2.2	Drucksensoren	37				

5	Methoden, Ergebnisse und Diskussion						
	5.1	Feuchtigkeitsmessung	41				
		5.1.1 Methoden $\ldots$	41				
		5.1.2 Ergebnisse und Diskussion	44				
	5.2	Gassystem	52				
	5.3	Flussmessgerät Nebenbemerkung	58				
6	Zusa	mmenfassung und Ausblick	61				
Α	Unsicherheitsbetrachtung						
	A.1	Datenerfassung mit dem Arduino	65				
		A.1.1 $CO_2$ -Sensor	66				
		A.1.2 $H_2O$ -Sensor	67				
		A.1.3 Flussmessgerät	68				
	A.2	Rebinning	69				
	A.3	Sonstige Unsicherheiten	70				
В	Anhang						
	B.1	Aufbau	73				
		B.1.1 Gasanalysestation	73				
		B.1.2 Gassystem	74				
	B.2	Feuchtigkeitsmessung	76				
		B.2.1 Feuchtigkeitsmessungen	76				
		B.2.2 Flussmessung	80				
		B.2.3 Korrelation Temperatur & Durchfluss	84				
	B.3	Gassystem	87				
		B.3.1 Druckmessungen	87				
		B.3.2 Gasanalysestation	92				
Literatur							

## 1 Einleitung

Das zukünftige *CBM*-Experiment (Compressed-Baryonic-Matter) am *GSI* Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt befindet sich zusammen mit dem Beschleunigerkomplex *FAIR* (Facility for Antiproton and Ion Research in Europe) in der Bauphase. Ein Schema des Bauplans der Anlage ist in Abbildung 1.1 zu sehen. Der Hauptbeschleuniger der Anlage ist der Ringbeschleuniger SIS100, der einen Umfang von 1100 m haben wird [1]. Es sind außerdem mehrere Experimentierringe und -stationen, wie das *CBM*-Experiment, der Anlage zugehörig [1]. Als Injektor fungiert ein schon vorhandener Beschleuniger der *GSI*, der in Abbildung 1.1 zu sehen ist. Die verschiedenen Farben entsprechen der geplanten Baureihenfolge. Das *CBM*-Experiment soll 2028 fertiggestellt sein.



Abbildung 1.1: Zu sehen ist der geplante und schon vorhandene Teil des Beschleunigerkomplexes *FAIR* (Facility for Antiproton and Ion Research in Europe) am *GSI* Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. Die verschiedenen Farben entsprechen der geplanten Reihenfolge der Fertigstellung. Das *CBM*-Experiment gehört dabei zur Kategorie "First Science +", und soll 2028 fertiggestellt werden soll. Entnommen aus [2].

Dieser neue Beschleunigerkomplex soll Teilchenstrahlen von bisher unerreichter Qualität und Intensität erzeugen. Verschiedenste Teilchen sollen beschleunigt werden. Schwerionen, wie zum Beispiel Gold, Uran und Calcium, oder auch Protonen und Antiprotonen. Mithilfe des Ringbeschleunigers SIS100 lassen sich Teilchen mit hohen Energien erzeugen. Dabei erreichen Protonen bis zu 29 GeV, Goldkerne bis zu 11 AGeV und Kerne mit Z/A = 0,5 bis zu 14 AGeV [3]). Um die Teilchen auf ihrer Bahn zu halten werden, mit flüssigem Helium gekühlte, supraleitende Magnete eingesetzt. Für die Experimente werden entweder die beschleunigten Teilchen selbst oder sekundäre Teilchen verwendet [1].

Das CBM-Experiment ist ein *Fixed-Target* Experiment. Das heißt, dass Teilchen auf ein stationäres Ziel, das Target, geleitet werden. Das Experiment wird zur Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas (QGP) verwendet. Hierbei ist die Energiedichte so hoch, dass die Hadronen schmelzen und deren Bestandteile einen neuen Phasezustand bilden, der aus Quarks und Gluonen besteht. Es wird angenommen, dass zu Beginn des Universums solche Temperaturen herrschten, sodass die gesamte Materie im Universum diese Phase angenommen hatte. Beim CBM-Experiment werden eher niedrigere Temperaturen aber hohe Teilchendichten untersucht, was einem bestimmten Bereich des QCD-Phasendiagramms (Quantum-Chromo-Dynamics) entspricht [3].



Abbildung 1.2: Zu sehen ist der Plan für den Aufbau des *CBM*-Experiments. Der *TRD* ist in der Mitte zu sehen. Er besteht aus vier Lagen. Auch die anderen zugehörigen Detektoren sind abgebildet. Entnommen aus [2].

Mit dem CBM-Experiment, welches in Abbildung 1.2 zu sehen ist, sollen insbesondere Elektronen, Myonen und Hadronen bei Schwer-Ionen Kollisionen gemessen werden [4]. Der Detektor selbst ist aus verschiedenen Subdetektoren aufgebaut. Innerhalb eines starken Dipolmagneten, der eine Öffnung von  $\pm 25^{\circ}$  besitzt und ein integrales Magnetfeld von 1 T m erzeugt, befindet sich das Target. Dahinter sind die anderen Detektorschichten aufgebaut, die alle unterschiedliche Zwecke erfüllen. Beispielsweise sollen die unterschiedlichen erzeugten Teilchen auf Impuls oder Flugzeit untersucht werden. Auch die Wegrekonstruktion spielt eine große Rolle. In dieser Arbeit soll der TRD (Transition-Radiation-Detector), der in Abbildung 1.2 markiert ist, näher betrachtet werden. Er besteht aus vier Lagen und erstreckt sich von 4,1 m bis 5,9 m hinter dem Zentrum des Magnetfelds. Mit dem TRD, der aus Vieldrahtproportionalkammern aufgebaut ist, werden Elektronen und Positronen mit einem Impuls von etwa p > 1,0 GeV/c identifiziert. Außerdem dient er zur Wegrekonstruktion von geladenen Teilchen. Auch geladene Pionen werden in den Vieldrahtproportionalkammern sind mit Gas gefüllt, wobei dieses Gas mit einem Gassystem zirkuliert, analysiert und aufbereitet wird [3].

In dieser Arbeit wird mit der Probelinie dieses *TRD*-Gassystems gearbeitet. Hierfür wird eine Analysestation konzipiert und gebaut, welche die Gasqualität innerhalb des Gassystems bestimmt und abbildet.

Es wird mit dem hier vorgestellten prototypischen System der Feuchtigkeitseinlass durch das Eintrittsfenster der *CBM-TRD*-Kammern untersucht, um so den Betrieb des *TRDs* unter realen Bedingungen besser charakterisieren zu können und optimalen Betrieb zu ermöglichen. Außerdem wird die Probelinie des Gassystems mit der eingebauten Zirkulationspumpe in Betrieb genommen. Während die Pumpe später für die hauptsächliche Gaszirkulation im Gesamtsystem genutzt wird, wird sie in dieser Arbeit zunächst für einen Systemstart in Betrieb gesetzt. Dabei wird die Gasqualität mit der hier konzipierten Gasanalysestation gemessen.

## 2 Theorie

## 2.1 Übergangsstrahlung

Die Übergangsstrahlung entsteht beim Übergang von hochrelativistischen Teilchen zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Dieelektrizitätskonstanten  $\varepsilon$ . Bei Annäherung eines geladenen Teilchens an ein Medium, bildet sich eine Spiegelladung, welche gemeinsam mit der Ladung des Teilchens einen Dipol erzeugt. Die Feldstärke dieses Dipols verändert sich beim Annähern und verschwindet beim Eintreten in das Medium. Dieser veränderliche Dipol emittiert Photonen aus, die als Übergangsstrahlung identifiziert werden [5]. Die Intensität dieser Strahlung hängt vom Lorentz-Faktor  $\gamma = \frac{p}{mv}$  ab. Sie eignet sich deshalb zur Unterscheidung von Teilchen, die zwar den gleichen Impuls und die gleiche Ladung haben, aber unterscheidliche Masse. Der *CBM-TRD* soll dabei die Teilchen, welche diese Übergangsstrahlung erzeugen, unterscheiden von denen, die sie nicht erzeugen. Im Falle des *CBM-TRD* sind dies hochrelativistische Elektronen und Positronen, die die Strahlung erzeugen, und geladene Pionen, die keine Übergangsstrahlung erzeugen.

#### 2.1.1 Radiator

Die Übergangsstrahlung wird beim CBM-TRD durch sogenannte Radiatoren erzeugt. Diese Radiatoren besitzen viele Übergänge zwischen Materialien mit verschieden Dieelektrizitätskonstanten. Es werden zwei Typen von Radiatoren unterschieden: reguläre und irreguläre [6, S. 135]. Reguläre Radiatoren zeichnen sich durch die reguläre Anordnung von parallel gestapelten Materialien aus. Sie verwenden kohärente Interferenz und erzeugen eine hohe Anzahl an Photonen. In irregulären Materialien entsteht die Strahlung an den zufällig angeordneten Übergängen im Material. Hierfür werden Schäume oder Fasern verwendet. Die durchschnittliche Zahl erzeugter Photonen ist bei irregulären Radiatoren niedriger [3]. Allerdings sind die irregulären deutlich günstiger zu produzieren und werden deshalb beim CBM-TRD verwendet.

### 2.1.2 Vieldrahtproportionalkammer

Die durch die Radiatoren erzeugte Übergangsstrahlung soll detektiert werden. Beim CBM-TRD wird dies durch sogenannte asymmetrische Vieldrahtproportionalkammern (Multi Wire Proportional Champer: MWPC) erreicht. In Abbildung 2.1 ist der Aufbau einer solchen MWPC gezeigt.

Ein asymmetrischer MWPC besteht aus einer Ebene von dünnen, gleichmäßig verteilten Anodendrähten, die zwischen zwei Kathodenplatten platziert sind. Außerdem ist zwischen einer der Kathodenplatten und den Anodendrähten eine Ebene von Kathodendrähten platziert. Diese haben meist einen größeren Durchmesser als die Anodendrähte. Sie teilen die Kammer in zwei Teile auf. Den Driftbereich und den Verstärkungsbereich, die jeweils in Abbildung 2.1 zu sehen sind. Dieser Driftbereich wird durch die Kathodendrähte erzeugt, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen die TR-Photonen zu absorbieren. Innerhalb der Kammer befindet sich ein Gasgemisch, welches meist zum größten Teil aus einem Nobelgas und zum kleinen Teil aus einem organischen "Löschgas" wie CO<sub>2</sub> besteht [7, Kap. 4.2].



Abbildung 2.1: Zu sehen ist der Aufbau einer asymmetrischen Vieldrahtproportionalkammer. Treten Teilchen in die Kammer ein, ionisieren sie durch Stoßionisation Gasmoleküle, sodass Elektronen-Ionen-Paare entstehen. Diese werden durch das herrschende elektrische Feld getrennt, wobei die Elektronen zu den Anodendrähten beschleunigen und Elektronenlawinen auslösen. Diese werden als induzierte Spiegelladung an einem Kathodenpad gemessen. Entnommen aus [3].

Tritt ein geladenes Teilchen in die Kammer ein werden durch Stoßionisation Gasmoleküle ionisiert. Es entstehen Elektronen-Ionen-Paare. Auch die *TR*-Photonen erzeugen solche Elektronen-Ionen-Paare. Hauptsächlich ist dabei der photoelektrische Effekt von Bedeutung. Innerhalb der Kammer werden die Paare durch das herrschende elektrische Feld getrennt. Die positiv geladenen Ionen wandern zu den Kathoden, während die Elektronen sobald sie den Verstärkungsbereich erreicht haben zu den Anodendrähten hin beschleunigt werden. Durch diese Beschleunigung sorgen die Elektronen dafür, dass weitere Elektronen-Ionen-Paare entstehen, welche wiederum neue erzeugen. Es entsteht eine so genannte Elektronenlawine. Diese Lawinen erzeugen Spiegelladungen auf den Kathodenplatten, die dann detektiert werden können. Die Stärke der gemessenen Signale hängen mit der Art der Teilchen zusammen, sodass diese unterschieden werden können.

## 2.1.3 CBM-TRD

Die technischen Details zur Übergangsstrahlungsdetektion beim CBM-Experiment sollen hier beschrieben werden.

Es werden beim CBM-Experiment asymmetrische MWPCs der vorher beschriebenen Art verwendet. Vor den MWPCs sind Schaumstoff Radiatoren angebracht. Der ganze CBM-TRD wird dabei aus mehreren Kammern zusammengesetzt.

Die Ortsauflösung ist von großer Wichtigkeit für den CBM-TRD, da nicht nur unterschieden werden soll welche Teilchen in den Detektor eintreten, sondern auch wie deren Trajektorie aussieht. Daher wird die Kathodenplatte auf der gegenüberliegenden Seite des Radiators in mehrere Pads unterteilt und es sind mehrere TRD Module hintereinander angebracht um den Weg des Teilchens rekonstruieren zu können.

Eine schematische Zeichnung der Geometrie der *CBM-TRD MWPCs* ist in Abbildung 2.2 zu sehen. Der Driftbereich beträgt 5 mm, während der Verstärkungsbereich  $2 \times 3,5$  mm lang ist. Dabei sind die Anodendrähte in der Mitte des Bereichs zwischen Kathodendrähten und dem Back-panel angebracht.

		Back-panel
3.75 mm 2.5 mm	Pad group 1 3.5mm	Pad group 2
2.5mm 2.5mm	3.5 mm	Cathoda
		Cathode
	5.0 mm	Drift

Entrance window

Abbildung 2.2: Zu sehen ist eine schematische Zeichnung der Geometrie der im *CBM-TRD* verwendeten *MWPCs*. Der Driftbereich erstreckt sich über 5 mm hinter dem Eintrittsfenster. Die Geometrie der Kathoden- und Anodendrähte sorgt dafür, dass der Verstärkungsbereich insgesamt 7 mm lang ist, wobei zwischen Kathodendrähten und den Anodendrähten 3,5 mm Platz ist. Entnommen aus [3].

In Abbildung 2.3 sind die verschiedenen Schichten der Kammern zu sehen. Das Eintrittsfenster besteht aus einer 25 µm dicken Kaptonfolie, die auf einer Seite mit einer 0,05 µm dicken Aluminiumschicht beschichtet ist. Diese Folie fungiert als Kathode und sorgt für Gasdichtigkeit. Dabei darf sich die Folie nicht, durch schwankenden Außendruck, über einen bestimmten Punkt verformen. Daher wird zur Stabilisierung ein Gitter aus Carbonfasern über die Folie angebracht, welches die nötige mechanische Unterstützung bietet. Hinter der Folie sind die Kathoden- und Anodendrähte, wie vorher beschrieben, angebracht. Das ganze Gasvolumen ist eingeschlossen von der Kaptonfolie und der Pad-plane, die sich hinter den Drähten befindet. Diese Pad-plane wird auf eine 23 mm dicke Bienenwabenstruktur aus Carbonfasern geklebt, welche wiederum von einem Aluminiumrahmen gehalten wird. Diese Komponenten dienen der mechanischen Stabilität [3].



Abbildung 2.3: Zu sehen ist der in Schichten gezeigte Aufbau einer der *CBM MWPCs*. Das Eintrittsfenster stellt eine Kaptonfolie dar, auf die, für mechanische Stabilität, ein Gitter aus Carbonfasern angebracht wird. Hinter dem Eintrittsfenster befinden sich die Kathoden- und

Anodendrähte in der, in Abbildung 2.2 zu sehenden, Geometrie. Entnommen aus [3].

## 2.2 Das Gassystem des CBM-TRD

Beim *CBM-TRD* werden mehrere der Vieldrahtkammern verbaut. In Abbildung 2.4 ist der Aufbau einer der vier Schichten des *CBM-TRD* zu sehen. Dabei sind 20 Kammern der Größe 99x99 cm und 34 Kammern der Größe 56x56 cm in einer Schicht verbaut. Die Gasversorgung der einzelnen Kammern ist vertikal in fünf Reihen aufgeteilt, wobei jede Kammer zwei Gaseingänge und zwei Gasausgänge besitzt. Die einzelnen Reihen sind mit wechselnden blautönen markiert. Bei dem Detektorgas wird ein Gasgemisch aus 85 %Xe und 15 %CO<sub>2</sub> (Volumenanteile) verwendet werden. Xenon wird als Edelgas gewählt, da es einen großen Absorptionswirkungsquerrschnitt für die, von den Radiatoren erzeugte, Strahlung besitzt [3]. Da Xenon aber ein schwer zu beschaffenes und teures Edelgas ist, ist eine Rezirkulation und Wiederaufbereitung essentiell. Das Gassystem hat mehrere Komponenten, die für die Justierung und Aufbereitung verantwortlich sind.

In dieser Arbeit wird mit der Probelinie dieses Gassystems gearbeitet.



Abbildung 2.4: Zu sehen ist die Gasversorgung einer der Schichten des *CBM-TRD*. Dabei werden mehrere der Kammern versorgt, die seriell miteinander verbunden sind. Jede Schicht besteht aus fünf Gaslinien. Jede Kammer besitzt zwei Gaseingänge und zwei Gasausgänge. Hier kennzeichnen wechselnde blautöne die Reihen der Gasversorgung. Entnommen aus [3].

## 2.3 Elektronische Theorie

In dieser Arbeit werden verschiedene Sensoren elektrisch ausgelesen. Hierzu wird ein Arduino Uno verwendet. Es ist dafür ein elektrischer Schaltkreis zu bauen. Um diesen verstehen zu können müssen grundlegende Eigenschaften solcher Schaltkreise erarbeitet werden. Eine der wichtigsten Grundlagen der Elektrik ist das Ohm'sche Gesetz. Es besagt, dass der Strom I, der in einem elektrischen Leiter fließt, proportional zu der Spannung U ist.

$$U = RI \tag{2.1}$$

Dieser Proportionalitätsfaktor ist der **Ohm'sche Widerstand** R, wobei dieser in der Regel temperaturabhängig ist. Das Ohm'sche Gesetz ist nicht immer erfüllt. Es wird zwischen Ohm'schen und nicht-Ohm'schen Leitern unterschieden. Hier soll allerdings immer von Ohm'schen Leitern ausgegangen werden [8, Kap. 3.1.5].

Neben dem Ohm'schen Gesetz spielen auch die Kirchhoff'schen Regeln eine Rolle. Es werden zwei dieser Kirchhoff'sche Regeln unterschieden. Die erste ist als die Knotenregel bezeichnet, die besagt, dass die Summe aller in einem Punkt *P* einlaufen und auslaufenden Ströme null ist. Die zweite Kirchhoff'sche Regel ist die Maschenregel, die wiederum besagt, dass die Summe aller Spannungen entlang eines geschlossenen Weges, der Masche, null ist [9, Kap. 2.4]. Die Berücksichtigung der Kirchhoff'schen Regeln spielt bei der Auslegung der genutzten Schaltung eine entscheidende Rolle, auch wenn diese nicht explizit in der Beschreibung dieser Schaltung erwähnt werden.

## 2.4 Tautemperatur, Relative Feuchtigkeit und Absolute Feuchtigkeit

Der hier verwendete Gasfeuchtigkeitssensor misst die Tautemperatur von Wasser innerhalb des Gases. Die Unsicherheit ist auch als Temperatur angegeben. Sie beträgt  $\pm 2$  °C. Da allerdings die absolute Feuchte als Volumenmischverhältnis in ppmV betrachtet werden soll, und der Zusammenhang zwischen Tautemperatur und absoluter Feuchte nicht linear ist, wird hier diese Umrechnung betrachtet. Die Einheit ppmV ergibt sich zum Einen aus der Einheit ppm, was für *parts per million* steht. Das bedeutet also, wie viele Moleküle pro Millionen Moleküle dem Gesuchten entsprechen. Und zum Anderen aus dem nachgestellten V, welches kennzeichnet, dass es sich um ein Volumenmischverhältnis handelt. Die relative Feuchte, die meist in Prozent angegeben wird, ist auch eine verwandte Größe. Da der Zusammenhang nicht linear ist, muss um die Unsicherheit eines ppmV Wertes betrachten zu können, dieser erst als Taupunkt ausgedrückt werden. Dann werden die zwei Werte des Taupunkts betrachtet, die um 2 °C neben diesem Wert liegen, welche dann wieder als ppmV Werte ausgedrückt werden um die Unsicherheit angeben zu können. Im Folgenden werden die nötigen Umrechnungen und Grundlagen beschrieben.

## 2.4.1 Umrechnung: Absolute und relative Feuchtigkeit

Es wird zunächst eine Berechnung der relativen Feuchtigkeit in dem Gas aus der absoluten Feuchtigkeit in ppmV durchgeführt. Diese relative Feuchtigkeit ist nach Gleichung (3) in [10] definiert als

$$R_{\rm H} = 100 \frac{e}{e_{\rm s}},\tag{2.2}$$

wobei e dem tatsächlichen Wasserdampfdruck und  $e_s$  dem gesättigten Wasserdampfdruck entspricht. Gesättigt bedeutet in diesem Fall, dass Wasserdampf bei diesem Druck an Oberflächen kondensiert, also flüssig wird. Diese Formel lässt sich für den tatsächlichen Wasserdampfdruck umformen:

$$e = e_{\rm s} \frac{R_{\rm H}}{100}.\tag{2.3}$$

Hier lässt sich die ideale Gasgleichung

$$pV = \frac{m}{M}RT \tag{2.4}$$

einfügen [11, Gl. 14.2]. Dabei ist p der Druck, V das Volumen, m die Masse, M die molare Masse, R die universelle Gaskonstante, welche 8,314 J/(mol K) beträgt [11, Gl. 12.7], und T die Temperatur. Der tatsächliche Wasserdampfdruck e soll dabei dem Druck p des idealen Gases entsprechen. Es ergibt sich

$$e_{\rm s}\frac{R_{\rm H}}{100}V = \frac{m}{M}RT.$$
(2.5)

Nun ist das Verhältnis von Masse m zu Volumen V zu betrachten:  $C = \frac{m}{V}$ . Durch Umformung folgt

$$C = \frac{m}{V} = e_{\rm s} \frac{R_{\rm H}}{100} \frac{M}{RT},\tag{2.6}$$

was der absoluten Feuchtigkeit in  $kg/m^3$  entspricht. Um den Wert als Volumenmischverhältnis in ppmV ausdrücken zu können, wird folgende Formel betrachtet:

$$C_{\rm ppmV} = \frac{V_{\rm m} \cdot 10^6}{M} C. \tag{2.7}$$

Wobei  $C_{\rm ppmV}$  der Konzentration in ppmV,  $V_{\rm m}$  dem Molvolumen, M der Molaren Masse und C der Konzentration in kg/m<sup>3</sup> entspricht. Der Faktor 10<sup>6</sup> ergibt sich daraus, dass die Teile pro Millionen betrachtet werden. Das Molvolumen für ein ideales Gas ergibt sich durch Umstellen der idealen Gasgleichung

$$V_{\rm m} = \frac{V}{n} = \frac{RT}{p}.$$
(2.8)

Sie gibt das Volumen eines idealen Gases für ein Mol des Stoffes bei einer Temperatur Tund einem Druck p an. Es lassen sich Gleichungen (2.6), (2.7) und (2.8) kombinieren, sodass sich

$$C_{\rm ppmV} = \frac{V_{\rm m} \cdot 10^6}{M} C = e_{\rm s} \frac{R_{\rm H}}{100} \frac{M}{RT} \frac{V_{\rm m} \cdot 10^6}{M} = e_{\rm s} \frac{R_{\rm H}}{100} 10^6 \frac{1}{p}$$
(2.9)

für die Umrechnung der absoluten Feuchtigkeit und der relativen Feuchtigkeit ergibt.

#### Der gesättigte Wasserdampfdruck

Die Berechnung des gesättigten Wasserdampfdrucks  $e_s$  ist im Allgemeinen abhängig von Temperatur und Druck. Es sind viele solcher Formeln bekannt, die sowohl empirisch aber auch theoretisch hergeleitet wurden [10]. Hier soll die Magnus-Formel, die von Gustav Magnus 1844 experimentell hergeleitet wurde, verwendet werden, da sie am häufigsten verwendet wird und Ergebnisse mit hoher Genauigkeit liefert [10]. Sie ist von der Form

$$e_{\rm s}\left(t\right) = C_1 \exp\left(\frac{A_1 t}{B_1 + t}\right). \tag{2.10}$$

Es werden die in [12] vorgeschlagenen Koeffizienten verwendet. Diese sind  $C_1 = 6,1094$  mbar,  $A_1 = 17,625$  und  $B_1 = 243,03$  °C. Es muss allerdings beachtet werden, dass für Gase, die nicht nur aus Wasserdampf bestehen, ein Erweiterungsfaktor hinzu multipliziert werden muss, der vom Druck abhängt. Dieser beträgt  $f_w(p) = 1,00071e^{0,000\,004\,5\,\text{mbar}\cdot p}$ . Für eine fest angenommene Temperatur von 20 °C und einen fest angenommenen Druck von 1013 mbar ergibt sich so ein Sättigungsdampfdruck von 23,458 mbar. Um nun die Umrechnung der absoluten Feuchtigkeit und der relativen Feuchtigkeit abzuschließen, werden  $e_s$  und p = 1013 mbar in Gleichung (2.9) eingesetzt:

$$C_{\rm ppmV} = \frac{23,458}{1013} \cdot 10^4 \cdot R_{\rm H}$$
(2.11)

$$\Leftrightarrow \qquad R_{\rm H} = \frac{1013}{23,458} \cdot 10^{-4} \cdot C_{\rm ppmV}. \tag{2.12}$$

## 2.4.2 Umrechnung: Relative Feuchtigkeit und Tautemperatur

Nun soll der Zusammenhang der relativen Feuchtigkeit  $R_{\rm H}$  und dem Taupunkt  $t_{\rm T}$  betrachtet werden. Die Temperatur auf die ein System mit anfänglicher Temperatur T und Druck p, isobar abgekühlt werden muss um gesättigt zu sein, ist die Tautemperatur  $t_{\rm T}$ . Diese Definition lässt sich nach [10, Gl. 5] implizit schreiben als

$$e_{\rm s}\left(t_{\rm T}\right) = e\left(t\right).\tag{2.13}$$

Um die Beziehung zwischen der relativen Feuchtigkeit  $R_{\rm H}$  und der Tautemperatur herzuleiten, wird wieder die Magnus-Formel nach Gleichung (2.10) verwendet. Einsetzen von Gleichung (2.10) in Gleichung (2.13) liefert folgenden Ausdruck [10].

$$e(t) = e_{s}(t_{T}) = C_{1} \exp\left(\frac{A_{1}t_{T}}{B_{1} + t_{T}}\right)$$

$$\Leftrightarrow \qquad \ln\left(\frac{e(t)}{C_{1}}\right) = \frac{A_{1}t_{T}}{B_{1} + t_{T}}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \ln\left(\frac{e(t)}{C_{1}}\right)(B_{1} + t_{T}) = A_{1}t_{T}$$

$$\Leftrightarrow \qquad B_{1}\ln\left(\frac{e(t)}{C_{1}}\right) = t_{T}\left(A_{1} - \ln\left(\frac{e(t)}{C_{1}}\right)\right)$$

$$\Leftrightarrow \qquad t_{T} = \frac{B_{1}\ln\left(\frac{e(t)}{C_{1}}\right)}{A_{1} - \ln\left(\frac{e(t)}{C_{1}}\right)}.$$
(2.14)

Einsetzen von Gleichung (2.3) in Gleichung (2.14) ergibt

$$t_{\rm T} = \frac{B_1 \ln\left(\frac{e_{\rm s}(t)\frac{R_{\rm H}}{100}}{C_1}\right)}{A_1 - \ln\left(\frac{e_{\rm s}(t)\frac{R_{\rm H}}{100}}{C_1}\right)}.$$
(2.15)

Nun lässt sich Gleichung (2.10) einsetzen:

$$t_{\rm T} = \frac{B_1 \ln \left(\frac{C_1 \exp\left(\frac{A_1 t}{B_1 + t}\right) \frac{R_{\rm H}}{100}}{C_1}\right)}{A_1 - \ln \left(\frac{C_1 \exp\left(\frac{A_1 t}{B_1 + t}\right) \frac{R_{\rm H}}{100}}{C_1}\right)}{C_1}$$
  
$$\Leftrightarrow \qquad t_{\rm T} = \frac{B_1 \left[\ln \left(\frac{R_{\rm H}}{100}\right) + \frac{A_1 t}{B_1 + t}\right]}{A_1 - \ln \left(\frac{R_{\rm H}}{100}\right) - \frac{A_1 t}{B_1 + t}}.$$
 (2.16)

Somit ist ein Ausdruck gefunden, mit dem eine gegebene relative Luftfeuchtigkeit in den zugehörigen Taupunkt bei einer bestimmten Temperatur umgewandelt werden kann. Diese Formel lässt sich nun auch so umformen, dass aus einem gegebenen Taupunkt die relative Luftfeuchtigkeit bestimmt werden kann:

$$t_{\rm T} = \frac{B_1 \left[ \ln \left( \frac{R_{\rm H}}{100} \right) + \frac{A_1 t}{B_1 + t} \right]}{A_1 - \ln \left( \frac{R_{\rm H}}{100} \right) - \frac{A_1 t}{B_1 + t}}$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{1}{t_{\rm T}} = \frac{A_1 - \ln \left( \frac{R_{\rm H}}{100} \right) - \frac{A_1 t}{B_1 + t}}{B_1 \left[ \ln \left( \frac{R_{\rm H}}{100} \right) + \frac{A_1 t}{B_1 + t} \right]}$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{B_1}{t_{\rm T}} = \frac{A_1}{\ln \left( \frac{R_{\rm H}}{100} \right) - \frac{A_1 t}{B_1 + t}} - 1$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{t_{\rm T} A_1}{B_1 + t_{\rm T}} = \ln \left( \frac{R_{\rm H}}{100} \right) + \frac{A_1 t}{B_1 + t}$$

$$\Leftrightarrow \quad R_{\rm H} = 100 \left[ \frac{e^{\frac{A_1 t_{\rm T}}{B_1 + t_{\rm T}}}}{e^{\frac{A_1 t}{B_1 + t_{\rm T}}}} \right].$$
(2.17)

## 3 Gasanalysestation

Die Gasanalysestation wurde konzipiert, um die Informationen verschiedener Gassensoren zu erfassen und zu bündeln. In dieser Arbeit dient sie zur Messung des Feuchtigkeitseintrags einer *CBM-TRD*-Kammer und zur Messung der Gasqualität in einem Test-Gassystem für den *CBM-TRD*.

Die Gasanalysestation ist aus verschiedenen Einzelsensoren aufgebaut. Zu diesen gehören die eigentlichen Gassensoren. Dabei handelt es sich um einen CO<sub>2</sub>-Sensor, einen O<sub>2</sub>-Sensor und einen Feuchtigkeitssensor. Außerdem ist ein Flussmessgerät eingebaut. Es messen zusätzlich externe Sensoren die Luftfeuchte, die Temperatur und den Außendruck, um Korrelationen mit den Werten innerhalb des Gases entdecken zu können. In der Gasanylsestation ist auch die verwendete Ausleseelektronik, die einen Arduino und einen Raspberry Pi beinhaltet, verbaut. In Abbildung 3.1 ist eine schematische Zeichnung der Gasanalysestation zu sehen. Mit dem Arduino werden zwei der drei Gassensoren und das Flussmessegerät mittels eines 4-20 mA Signals ausgelesen. Der Sauerstoff-Sensor übergibt über eine serielle RS485-Schnittstelle seine Daten direkt an den Raspberry Pi. Die externen Sensoren, die die Umweltparameter messen sind direkt mit dem Pi verbunden. Der Raspberry Pi bündelt die Daten und schickt sie an einen Stand PC, wo die Daten dann gespeichert werden. Auf den Raspberry Pi lässt sich mittels einer Ethernetverbindung zugreifen. In Abbildung 3.2(a) ist die Frontansicht der Gasanalysestation zu sehen. Zu erkennen sind der CO<sub>2</sub>-Sensor, der O<sub>2</sub>-Sensor, das Display des Flussmessgeräts und der H<sub>2</sub>O-Sensor. Die Bauteile sind alle innerhalb des Schranks verbaut, der mit Rädern frei verschiebbar ist, sodass dieser auch zukünftig an verschiedenen Messaufbauten verwendet werden kann. In Abbildung 3.2(b) ist die Rückansicht zu sehen. Hier ist der Gasein- und auslass zu erkennen.



Abbildung 3.1: Zu sehen ist eine schematische Zeichnung der Gasanalysestation. Die verschiedenen Gassensoren und das Flussmessgerät sind aufeinanderfolgend verbunden. Mit dem Arduino werden das Flussmessgerät, der CO<sub>2</sub>- und der Feuchtigkeitssensor ausgelesen. Dieser überträgt die Daten dann genau wie der O<sub>2</sub>-Sensor, seriell zum Raspberry Pi. Der Raspberry Pi zeichnet gleichzeitig die Daten der externen Sensoren für die Umgebungsparameter auf, die mit einer  $I^2C$ -Verbindung gesteuert werden. Über eine Ethernetverbindung wird mit dem Pi kommuniziert.



(a) Zu sehen ist die Frontansicht der Gasanalysestation. Die verschiedenen Sensoren (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und Flussmessgerät) sind jeweils beschriftet. Die Bauteile sind in einem frei bewegbaren Schrank verbaut.



(b) Abgebildet ist die Rückansicht der Gasanalysestation. Zu erkennen sind der Gaseinlass (links) und der Gasauslass (rechts).

Abbildung 3.2: Abgebildet ist die Frontansicht, in Abbildung 3.2(a), und die Rückansicht, in Abbildung 3.2(b), der Gasanalysestation.

## 3.1 Schaltung

Der CO<sub>2</sub>- und der H<sub>2</sub>O-Sensor und das Flussmessgerät geben ein 4-20 mA-Signal aus. Da die analogen Eingänge des Arduinos, der hier verwendet wird, nur ein Spannungssignal messen können, muss das Stromsignal mit einem Widerstand in ein Spannungssignal umgewandelt werden. Die analogen Eingänge sind dazu ausgelegt eine Spannung von 0 V bis 5 V zu messen. Um aus den Stromsignalen Spannungssignale passend zu den Spezifikationen des Analog-Digital-Wandlers erzeugen zu können, braucht es nach dem Ohm'schen Gesetz in Gleichung (2.1)

$$\frac{5\,\mathrm{V}}{20\,\mathrm{mA}} = 250\,\Omega \tag{3.1}$$

einen Widerstand von  $250 \,\Omega$ . Hier werden Widerstände mit  $249 \,\Omega$  verwendet, um etwaige Schwankungen abfangen zu können. Das heißt, dass ein Stromwert von  $4 \,\mathrm{mA}$  einem Spannungswert von  $0,996 \,\mathrm{V}$ entspricht. Genauso entsprechen  $20 \,\mathrm{mA}$ ,  $4,98 \,\mathrm{V}$ .

Das zugehörige Schaltbild, um die von den drei Sensoren erzeugte Stromsignale zu transformieren, ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Die Sensoren sind jeweils parallel mit den Widerständen geschaltet.



Abbildung 3.3: Zu sehen ist das Schaltbild für die Auslese der drei Sensoren mittels eines Arduinos. Mit den parallel geschalteten Widerständen werden die erzeugten Stromsignale in Spannungssignale umgewandelt, die vom Arduino gelesen werden können. Abbildung des Arduinos entnommen aus [13].

Mit dem eingebauten Analog-Digital-Wandler, welcher eine Bit-Tiefe von  $2^{10} = 1024$  besitzt [14], ordnet der Arduino das erzeugte Spannungssignal den zugehörigen Kanälen zu. Die Spannung ergibt sich dann über

$$U = \frac{\text{Kanal}}{1023} \cdot 5 \,\text{V}.\tag{3.2}$$

Aufgrund der limitierten Bit-Tiefe ist die Auflösung des Arduinos begrenzt. Über Umstellen von Gleichung (2.1) sind dann aus den Spannungswerten die Stromwerte zu berechnen. Mit diesen Stromwerten ist auf die eigentlichen Sensorwerte zu schließen. Die Berechnung ist für die drei Sensoren unterschiedlich. Da die Sensorwerte sich linear zu den Stromwerten verhalten sind jeweils zwei Wertepaare notwendig, um eine allgemeine Umrechnung zu ermöglichen. Die Umrechnung ergibt sich über

$$y = mx + n. \tag{3.3}$$

Es handelt sich um einen linearen Zusammenhang. Mit zwei Wertepaaren  $(I_1, y_1)$  und  $(I_2, y_2)$ , die aus den Spezifikationen der Sensoren folgen, ergeben sich m und n über Gleichungen (3.4) und (3.5).

$$m = \frac{y_2 - y_1}{I_2 - I_1} \tag{3.4}$$

$$n = \frac{y_1 I_2 - y_2 I_1}{I_2 - I_1} \tag{3.5}$$

**CO<sub>2</sub>-Sensor:** Die Wertepaare beim CO<sub>2</sub>-Sensor sind  $((12,76 \pm 0,03) \text{ mA}; 16,5\%)$  und (20 mA; 30%). Es ergeben sich dann  $m_{\text{CO}_2} = (1,864 \pm 0,008) \%/\text{mA}$  und  $n_{\text{CO}_2} = (-7,3 \pm 0,2) \%$ . Die Angabe in % bezeichnet den prozentualen Anteil des CO<sub>2</sub> im Gas. **H<sub>2</sub>O-Sensor:** Beim Feuchtigkeitssensor sind die Wertepaare durch (4 mA; 0 ppmV) und

(20 mA; 16000 ppmV) gegeben. Es ergibt sich  $m_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ ppmV/mA}$  und  $n_{\text{H}_2\text{O}} = -4000 \text{ ppmV}$ . **Flussmessgerät:** Für das Flussmessgerät sind die Wertepaare ((4,42 ± 0,03) mA; (2,93 ± 1,00) l/h) und (20 mA; 100 l/h). Es ergeben sich  $m_{\text{Flow}} = (6,23\pm0,07) \text{ l mA/h}$  und  $n_{\text{Flow}} = (-24,6\pm1,4) \text{ l/h}$ .

Die Unsicherheiten der angegebenen Werte folgt über Kapitel A im Anhang. Dies gilt auch für alle weiteren Unsicherheiten.

## 3.2 Gassensoren

### 3.2.1 Kohlenstoffdioxid-Sensor

Bei dem Kohlenstoffdioxid-Sensor handelt es sich um einen *Model 601 NDIR* der Firma *CAI*. Dieser ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Ein großer Drift der Kalibrierung sorgt dafür, dass den mit dem Gerät gemessenen Werten nicht ohne weiteres vertraut werden sollte. Dieser Drift und die Unzuverlässigkeit ist ein bekanntes Problem bei  $CO_2$ -Sensoren [15], wobei hier vorerst keine Lösung für dieses Problem zu finden ist.



Abbildung 3.4: Zu sehen ist das verwendete Modell eines CO<sub>2</sub>-Sensors. Es handelt sich um einen *Model 601 NDIR* der Firma *CAI*. Entnommen aus [16].

#### **Funktionsprinzip:**

In Abbildung 3.5 ist der Querschnitt des  $CO_2$ -Sensors zu sehen. Es handelt sich um einen NDIR-Sensor (nicht-dispersive Infrarot-Spektroskopie). Er misst die Gaskonzentration des Kohlenstoffdioxids anhand einer einzigartigen Absorptionslinie im Infrarotbereich.

Das Gerät besteht aus einer Infrarotquelle, einem rotierenden "Chopper", einer Messzelle und einem Detektor, der mit dem zu detektierenden Gas gefüllt ist; in diesem Fall  $CO_2$ . Die Infrarotquelle emittiert Infrarotstrahlung, wobei durch den "Chopper" dafür gesorgt wird, dass das Infrarotlicht in einer bestimmten vorgegebenen Frequenz in die Messzelle eintritt. In der Messzelle wird das Licht absorbiert oder gedämpft. Danach trifft das Licht auf den vorderen Detektor. In der vorderen Kammer wird das Licht teilweise absorbiert, während der Rest in der hinteren Kammer absorbiert wird. Es entsteht ein Druckunterschied, der über die Verbindung der beiden Kammern ausgeglichen wird. Dieses Ausgleichen wird von einem Micro-Flow Sensor gemessen und kann mit der Gaskonzentration in Verbindung gebracht werden [16].



Abbildung 3.5: Zu sehen ist der Querschnitt des Infrarot CO<sub>2</sub> Sensor. Mit einem "Chopper" wird die Eindringfrequenz des erzeugten Infrarotlichts bestimmt. Dieses Licht wird von dem zu untersuchenden Gas absorbiert oder abgeschwächt. Mittels des restlichen Lichts lässt sich ein Druckunterschied innerhalb der vorderen und hinteren Messkammer erzeugen. Dieser Druckunterschied gleicht sich aus, was von einem Micro-Flow Sensor detektiert wird. Entnommen aus [16].

## 3.2.2 Sauerstoff-Sensor

Die Sauerstoffkonzentration im zu untersuchenden Gas wird durch eine Hach Orbisphere 510 mit einem elektrochemischen Sensor gemessen. Dieser ist in Abbildung 3.6 zu sehen. Mit diesem Sensor sind Sauerstoffkonzentrationen von wenigen ppmV bis zu atmosphärischen Konzentrationen messbar. Allerdings wurden bei dem Sensor für niedrige Konzentrationen von  $\leq 20$  ppmV Ungenauigkeiten festgestellt. Es reicht aber als qualitative Einordnung in einen niedrigen Messbereich.

Der Sauerstoffsensor kommuniziert mittels einer seriellen RS485-Schnittstelle mit dem *Raspber*ry Pi. Die Orbisphere besitzt eine Unsicherheit von 1 % [17].



Abbildung 3.6: Zu sehen ist der verwendete Sauerstoffsensor. Es handelt sich um eine *Hach Orsbisphere 510*. Entnommen aus [18].



Abbildung 3.7: Abgebildet ist eine schematische Zeichnung des Sauerstoffsensors. Dieser basiert auf dem Prinzip der Elektrolyse. Im Bild ist die gasdurchlässige Membran (membrane), das aufgelöste Elektrolyt (electrolyte), die Kathode (center electrode) und die Anode (counter electrode) zu sehen. Der Schutzring (guard ring) vermindert den Einfluss anderer Gase auf die Messung [17, S. 15f]. Entnommen aus [17]

### **Funktionsprinzip:**

Eine schematische Zeichnung des Sensors ist in Abbildung 3.7 zu sehen. Der Sauerstoffsensor basiert auf dem chemischen Prinzip der Elektrolyse. Er ist so aufgebaut, dass das Gas an einer gasdurchlässigen Membran vorbei geführt wird, wo ein Teil des Sauerstoffs in dem aufgelösten Elektrolyt getrennt wird. In dieser Lösung befinden sich außerdem eine Anode und Kathode an die eine Spannung angelegt wird. An der Kathode reagiert der Sauerstoff nun und sorgt für einen messbaren Strom, der proportional zum Sauerstoffanteil in dem Gas ist [17, S. 15f].

### 3.2.3 Feuchtigkeitssensor

Die Feuchtigkeitsmessung des Gases wird mit dem Moisture Monitor Series 35 Single-Channel Hygrometer der Firma General Electrics durchgeführt. Der Sensor ist in Abbildung 3.8 zu sehen. Er besitzt einen Sensorkopf, der in Echtzeit den Tau/Gefrierpunkt des Gases über einen Messbereich von -110 °C bis 60 °C auf  $\pm 2$  °C genau bestimmen kann. Aus diesem Tau/Gefrierpunkt lässt sich, nach Kapitel 2.4, bei bekanntem Druck und Temperatur die Feuchtigkeit

berechnen. Da der Sensor den Feuchtigkeitswert als absolute Feuchtigkeit in ppmV angibt, ist diese Umrechnung nur für die Unsicherheitsbetrachtung wichtig. Der *Moisture Meter* gibt ein 4-20 mA Signal aus, welches mit dem *Arduino* ausgelesen wird.



Abbildung 3.8: Zu sehen ist der für die Feuchtigkeitsmessung verwendete Sensor. Es handelt sich um den *Moisture Monitor Series 35 Single-Channel Hygrometer* der Firma *General Electrics.* Der Sensorkopf ist in Abbildung 3.9 zu sehen. Entnommen aus [19].

### Funktionsprinzip:

Der Sensor ist ein Aluminiumstreifen, der eloxiert wird. Auf diesen wird dann eine Goldbeschichtung aufgedampft. Die Aluminiumbasis und die Goldschicht bilden so zwei Elektroden eines Aluminiumoxidkondensators. Wasserdampf wird durch die Goldschicht transportiert, an der sich die Moleküle in den Poren des Oxids ansiedeln, wie in Abbildung 3.10 dargestellt. Je nach Menge dieser Moleküle verändert sich die Kapazität des durch die Aluminium- und Goldschicht gebildeten Kondensators. Diese Veränderung lässt sich messen und ist direkt proportional zur Feuchtigkeit in dem Gas [20].



Abbildung 3.9: Zu sehen ist eine Skizze des Sensorkopfes des Feuchtigkeitssensors. Die Feuchtigkeitsmessung basiert auf der Veränderung der Kapazität einer eloxierten Aluminiumschicht und einer Goldschicht im Kontakt mit Wassermolekülen. In Abbildung 3.10 ist dieses Prinzip ver-

deutlicht. Entnommen aus [20].



Abbildung 3.10: Zu sehen ist eine Zeichnung der prinzipiellen Funktionsweise der Feuchtigkeitsmessung. Auf eine eloxierte Aluminiumschicht wird eine dünne Goldschicht aufgedampft, die sich permeabel zu Wassermolekülen verhält. Die Gold- und die Aluminiumschicht bilden einen Kondensator, dessen Kapazität sich je nach Anzahl von Wassermolekülen in der Aluminiumoxidschicht verändert. Entnommen aus [21].

### 3.2.4 Flussmessgerät

Bei dem hier verwendeten Flussmessgerät handelt es sich um ein *GFM 17 MASS FLOW ME-TER* von der Firma *Aalborg*, welches einen Messbereich von  $0 - 100 \,\text{l/h}$  und eine Genauigkeit von 1%FS = 11/h besitzt [22]. Auch dieser Sensor gibt ein 4-20 mA Signal aus. Das hier verwendete Gerät wurde mit einem Gasgemisch von 82%Ar und  $18\%\text{CO}_2$  (Volumenanteile) kalibriert. Zu beachten ist, dass das Flussmessgerät nach dem Einschalten erst die optimale Betriebstemperatur erreichen muss.

**Funktionsprinzip:** Innerhalb des in Abbildung 3.11(a) zu sehenden MASS FLOW ME-TERS wird das einströmende Gas aufgeteilt. Ein kleiner Teil des Gases wird abgesondert, wobei die Geometrie des Sensors dafür sorgt, dass die beiden Ströme laminar verlaufen. Um nun den Fluss im Gasstrom bestimmen zu können, wird dem Gas an einem Punkt im Rohr Wärmeenergie zugefügt und die Temperatur an zwei Punkten, die symmetrisch verteilt um den Heizpunkt liegen, im Rohr gemessen. Dies ist in Abbildung 3.11(b)) zu sehen. Die Temperaturdifferenz ist direkt proportional zum Fluss.



T1 H T2

(a) Abgebildet ist das verwendete Flussmessgerät der Firma *Aalborg*. Entnommen aus [23].

(b) Abgebildet ist das Prinzip des verwendeten Flussmessgeräts. Entnommen aus [24].

Abbildung 3.11: Das hier verwendete Flussmessgerät und eine Skizze des Funktionsprinzips sind hier in den Abbildungen 3.11(a) und 3.11(b) zu sehen. Das Gas wird in zwei laminare Ströme aufgeteilt, wobei bei dem einen ein Punkt im Rohr erhitzt wird und die Temperaturdifferenz zwischen zwei Punkten dann proportional zum Durchfluss ist.

## 3.3 Umgebungsluftsensorik

Da bei der Untersuchung der Gasqualität äußere Einflüsse, wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Umgebungsdruck, eine große Rolle spielen können, werden Sensoren außerhalb der Gasanalysestation angebracht, um diese Werte zu messen. Die Umgebungsluftsensorik besteht aus zwei integrierten Schaltkreisen, die jeweils unterschiedliche Aufgaben erfüllen, aber beide mit einer  $I^2C$ -Verbindung (Inter-Integrated-Connection) mit dem *Raspberry Pi* kommunizieren. Diese  $I^2C$ -Verbindung ist ideal für kurze Distanzen und geringe Bandbreiten. Sie basiert auf einer Master-Slave Architektur, wobei hier der *Raspberry Pi* dem Master und die Sensoren den Slaves entsprechen. Der Master und die Slaves sind über zwei Leitungen verbunden. Die serielle Datenleitung (*SDA*) und die serielle Taktangabe (*SCL*) [25].

## 3.3.1 Feuchtigkeits-und Temperatursensor

Bei dem Sensor, der Luftfeuchtigkeit und Umgebungstemperatur misst, handelt es sich um einen *SI7021* Sensor der Firma *Adafruit*. Dieser ist in Abbildung 3.12 zu sehen. Dieser ist ein integrierter Schaltkreis mit eingebautem Analog-Digital-Wandler, Signal Prozessor, Kalibrationsdaten und  $I^2C$  Interface. Er hat eine Genauigkeit von  $u(f_{amb}) = 3\%$  für die Relative Feuchtigkeit und  $u(T_{amb}) = 0.4$  °C für die Temperaturmessung.

### Funktionprinzip:

Bei dem Feuchtigkeitssensor handelt es sich um einen auf Kunststoffdielektrika basierenden kapazitiven Sensor. Er ist aufgebaut aus zwei Elektroden und einem Dielektrikum, welches je nach Feuchtigkeit seine Permeabilität ändert und somit die Kapazität des kapazitiven Elementes. Dieses Prinzip ist in Abbildung 3.13 abgebildet.

Die Temperatur wird gemessen indem die Veränderung der Basis-Emitter-Spannung  $V_{\text{BE}}$  an einem Transistor gemessen wird. Die herrschende Temperatur beeinflusst die Eigenschaften der verbauten Halbleiter, was wiederum die Basis-Emitter-Spannung beeinflusst [26].



Abbildung 3.12: Zu sehen ist der verwendete Feuchtigkeits- und Temperatursensor Si7021 der Firma Adafruit. Dieser misst Temperatur und Feuchtigkeit und lässt sich über eine  $I^2C$ -Schnittstelle ansprechen. Entnommen aus [27].



Er increases as moisture is absorbed

Abbildung 3.13: Abgebildet ist das Funktionsprinzip des Luftfeuchtigkeitssensors des *Si7021*-Sensor. Es handelt sich um einen kapazitiven Sensor mit einem Kunststoffdielktrikum. Die Wassermoleküle der Luft beeinflussen die Permeabilität dieses Elements, was sich als Änderung der Kapazität messen lässt. Entnommen aus [26].

### 3.3.2 Umgebungsdrucksensor

Der Umgebungsdrucksensor ist ein *BMP390*-Sensor der Firma *Adafruit*, wobei das Sensorprinzip von der Firma *Bosch* entwickelt wurde. Dieser ist in Abbildung 3.14 zu sehen. Auch hier handelt es sich um einen integrierten Schaltkreis. Der Sensor kann neben seiner Funktion als Umgebungsdrucksensor auch die Temperatur messen und als Altimeter verwendet werden. Hier wird allerdings nur die Funktion als Drucksensor verwendet. Es kann mittels einer  $I^2C$ oder einer *SPI*-Verbindung mit dem Sensor kommuniziert werden. Hier wird  $I^2C$  verwendet. Der Sensor besitzt eine Genauigkeit von  $u(p_{amb}) = 50 \text{ Pa} = 0.5 \text{ mbar } [28].$ 

### **Funktionsprinzip:**

Zur Druckmessung wird ein Mikroelektromechanisches System (*MEMS*) mit einer flexiblen Membran verwendet. Der Außendruck wirkt einem Referenzdruck innerhalb des Sensors entgegen, sodass sich die Membran leicht verformt. Diese Verformung wird von einem Piezoelement erfasst und dann in ein Signal umgewandelt.



Abbildung 3.14: Abgebildet ist der verwendete Außendrucksensor *BMP390* der Firma *Adafruit.* Das Sensorprinzip ist von der Firma *Bosch* entwickelt. Mittels einer kleinen flexiblen Membran, einem Referenzdruck und einem Piezoelement, welches die Verformungen der Membran misst, lässt sich der Außendruck bestimmen. Entnommen aus [29]

## 4 Aufbau

In dieser Arbeit werden zwei verschiedene Aufbauten betrachtet.

Zuerst soll der Aufbau beschrieben werden, mit welchem die Feuchtigkeitswerte im Detektorgas einer *CBM-TRD*-Kammer gemessen werden. Hierbei sollen auch Umwelteinflüsse betrachtet werden, da sich die Kammer frei in einem nicht klimakontrollierten Raum befindet. Dann wird die Gasanalysestation verwendet um quantitativ das erste Einfüllen von Gas in die Testlinie des *CBM-TRD*-Gassystems zu untersuchen. Dabei wird lediglich das Gassystem untersucht. Es ist keine *CBM-TRD*-Kammer eingebaut.

## 4.1 Feuchtigkeitsmessung

In Abbildung 4.1 ist ein Schema des Aufbaus der Feuchtigkeitsmessung zu sehen. Aus einer Gasflasche wird Gas eingeführt, wobei der Druck mit einem Druckminderer auf 1 bar bis 2 bar relativ zum Außendruck reduziert wird. Statt dem final vorgesehenen Gasgemisch wird ersatzweise zunächst mit einem Gemisch aus 82%Ar und 18%CO<sub>2</sub> (Volumenanteile) gearbeitet. Mittels eines Flussreglers können verschiedene Flüsse eingestellt werden. Hinter dem Flussregler ist ein Flussmessgerät der Firma *Aalborg* angebracht, dessen Daten allerdings nicht aufgezeichnet werden, sondern nur einer Abschätzung und Einstellung vor Ort dient. Das Gas fließt vorbei an zwei Bubblern, die einen Überdruck in der Kammer verhindern. Weiterhin fließt das Gas durch eine *CBM-TRD*-Kammer und danach in die Gasanalysestation, in der die Feuchte des Gases gemessen wird. Die Gasanalysestation misst parallel Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Außendruck, wie in Kapitel 3 beschrieben.



Abbildung 4.1: Schematisch zu sehen ist der Aufbau für die Feuchtigkeitsmessung. Mittels eines Flussreglers werden verschiedene Flüsse eines Gasgemisches aus 82 %Ar und 18 %CO<sub>2</sub> (Volumenanteile) eingestellt. Das Gas fließt in eine *CBM-TRD*-Kammer, wobei zwei Bubbler einen Überdruck in der Kammer verhindern. Hinter der Kammer befindet sich die Gasanalysestation, welche die Feuchtigkeit des Gases und den Fluss misst.

**Flussregler:** Bei dem Flussregler handelt es sich um einen Massendurchflussregler der *red-y smart series* der Firma *Vögtlin*. In Abbildung 4.2 ist der Flussregler zu sehen. Er lässt sich über eine analoge oder serielle Schnittstelle steuern. Auf dem Display wird der eingestellte und aktuelle Fluss gezeigt. Das Gerät in diesem Aufbau ist eigentlich für Xenon kalibriert. Da allerdings ein Gasgemisch aus Argon und Kohlenstoffdioxid verwendet wird, entspricht der eingestellte Fluss nicht exakt dem tatsächlichen Fluss. Dieser kann aber nach [22] über Multiplikation mit einem Umrechnungsfaktor von 0, 92213 berechnet werden. Die Umrechnung ist in Kapitel B.1.1 im Anhang erklärt. Sie sorgt für eine zusätzliche Unsicherheit von 10%, die mit der Unsicherheit des Flussreglers von 1% kombiniert werden muss. Der Fluss wird auch mit dem in der Gasanalysestation verbauten Flussmessgerät gemessen. Die Flussmessung des Flussreglers basiert auf dem gleichen thermischen Prinzip wie beim Flussmessgerät der Firma *Aalborg*, beschrieben in Kapitel 3.2.4.


Abbildung 4.2: Zu sehen ist der für die Feuchtigkeitsmessung verwendete Flussregler. Es handelt sich um einen Massendurchflussregler der *red-y smart series* der Firma *Vögtlin*. Die Flussmessung basiert auf dem gleichen thermischen Prinzip wie bei dem Flussmessgerät der Firma *Aalborg*. Dieses Prinzip ist in Kapitel 3.2.4 beschrieben. Entnommen aus [30].

**Bubbler:** Zum Schutz der Kammer vor Überdruck werden Bubbler verwendet. Die hier verwendeten Bubbler wurden von Daniel Bonaventura und Felix Fidorra entworfen.

Das Prinzip basiert auf der Verdrängung von Flüssigkeiten durch Gas. Diese Flüssigkeit ist häufig ein Öl. Hier wird Diffelen Normal verwendet, was ein Vakuumöl ist und selbst bei geringen Unterdrücken nicht verdunstet [31]. Bei den hier verwendeten Bubblern wird eine zylindrische Öffnung in das Öl eingetaucht. Bei einem Überdruck verdrängt das Gas das Öl und ab einem bestimmten, durch eine Kalibration der Höhe des Öls festgelegten, Druck kann das Gas den Bubbler verlassen. Die Kalibration ist in [32, Kap. 4.3.5] beschrieben und beruht auf der Hydrostatik. Die hier verwendeten Bubbler sind auf einen Überdruck von 1 mbar eingestellt.



Abbildung 4.3: Zu sehen ist eine technische Zeichnung der hier verwendeten Bubbler. Das Design stammt von Daniel Bonaventura und Felix Fidorra. Die Dimensionen sind in mm angegeben. Der Bubbler basiert auf dem Prinzip der Verdrängung von Flüssigkeiten der Hydrostatik. Bei Überdruck verdrängt das Gas die Flüssigkeit und ab einem bestimmten, vorher eingestellten, Druck weicht das Gas aus dem Bubbler aus. Die hier verwendeten Bubbler sind auf einen Überdruck von 1 mbar eingestellt [33].

## 4.2 Gassystem

Zur Untersuchung der *CBM-TRD*-Kammern wurde ein Test-Gassystem konzipiert, in welches, im Rahmen dieser Arbeit, erstmals Gas eingefüllt wird. Das ganze System wird dabei von einer *SPS* (Speicherprogrammierbare Steuerung) gesteuert. Ein funktionales Blockdiagramm dieses Gassystems ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Für weitere Details ist Abbildung B.1 im Anhang zu betrachten. Dort sind die verschiedenen Drucksensoren gezeigt, die mittels der *SPS* ausgelesen werden und hier während der Erstmessung verwendet werden. Hier wird nur der Bereich der Zirkulationspumpe genauer erklärt, da dieser Bereich für die Messung von Bedeutung ist. Mit der *SPS* werden auch mit der Pumpe und den steuerbaren Ventilen kommuniziert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde sich mit dem Anschließen und der Steuerung dieser Bauteile beschäftigt.

Mixstation: Da in den *CBM-TRD*-Kammern ein bestimmtes Gasgemisch eingefüllt werden muss, wird über eine Mixstation das passende Gemisch erzeugt. Diese Mixstation besitzt zwei Eingänge. Einen für ein Löschgas und einen für ein Edelgas. Außerdem besteht sie aus mehreren Ventilen und Flussreglern, um die zugefügte Gasmenge zu bestimmen. Bei der hier durchgeführten Messung wird allerdings vorgemischtes "Sagox", welches aus 82 %Ar und 18%CO<sub>2</sub> (Volumenanteile) besteht, verwendet.

**Drucksteuerung:** Aufgrund des druckempfindlichen Eintrittsfenster der Kammern aus einer mit Aluminium beschichteten Kaptonfolie, müssen Außendruckänderungen schnell kompensiert werden. Dies geschieht durch eine geeignete Drucksteuerung. Die Drucksteuerung ist in jeweils einen Bereich vor und hinter der Kammer unterteilt. Dort sind Drucksensoren und Ventile verbaut, sowie ein Druckreduzierer im vorderen Teil.

Innerhalb der Kammer selbst soll maximal ein Druck von 1 mbar relativ zum Außendruck herrschen.



Abbildung 4.4: Zu sehen sind die funktionalen Blöcke des *CBM-TRD* Test-Gassystem. In der Mixstation wird ein Gasgemisch eingeführt, wobei hier "Sagox", welches aus 82 %Ar und 18 %CO<sub>2</sub> (Volumenanteile) besteht, verwendet wird. Die Drucksteuerung kontrolliert den Druck, sodass die Pumpe passend arbeiten kann und ein geeigneter Druck innerhalb der Kammer herrscht. Die Zirkulationspumpe erzeugt einen passenden Druck innerhalb des Systems, wobei die Regelung über ein steuerbares Ventil gelöst wird.

#### 4.2.1 Zirkulationspumpe

In Abbildung 4.5 ist eine genauere Zeichnung des Abschnitts der Zirkulationspumpe zu sehen. Diese wird hier genauer betrachtet, da in dieser Arbeit die Mixstation nicht benutzt wird und vorgemischtes Gas eingefüllt wird. Außerdem ist die Drucksteuerung in dieser Arbeit von keiner Bedeutung, da keine Messung mit einer tatsächlichen Kammer durchgeführt wird. Stattdessen wird diese Leitung kurzgeschlossen.

Die roten Pfeile zeigen die Gasflussrichtung, bzw. die Pumprichtung an. Die Pumpe wird mit

voller Leistung betrieben. Der größte Fluss im System wird also erreicht, wenn die Ventile, die den Eingang und Ausgang der Pumpe verbinden, geschlossen sind. Der Fluss wird kontrolliert und geregelt, indem das steuerbare Ventil die Menge des rückläufigen Gases anpasst. Das steuerbare Ventil wird noch genauer in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Die einzelnen zusätzlichen Handventile dienen zum Einstellen des Arbeitspunkts und des Regelungsbreichs.

Die beiden Puffervolumina erfüllen verschiedene Zwecke. Das Puffervolumen 2 fängt Außendruckänderungen ab. Falls der Außendruck sinkt, steigt der relative Innendruck der Kammer. Da der relative Innendruck der Kammer aber bei 1 mbar relativ zum Außendruck gehalten werden soll, wird das überschüssige Gas im großen Puffervolumen 2 gespeichert. Genauso wird zusätzliches Gas dort gespeichert, um Druckanstiege kompensieren zu können. Das Puffervolumen 1 dient als Dämpfung für den Druck-Regelkreis.



Abbildung 4.5: Abgebildet ist eine genauere Zeichnung der Zirkulationspumpe. Die Pumpe läuft auf Maximalleistung, während das steuerbare Ventil (V4), je nach Öffnungsstand, den Fluss regelt. Die einzelnen zusätzlichen Handventile dienen zum Einstellen des Arbeitspunkts und des Regelungsbreichs. Die Puffervolumina erfüllen unterschiedliche Aufgaben. Das Puffervolumen 2 kompensiert Außendruckänderungen. Bei einem sinkenden Außendruck steigt der relative Innendruck der Kammer, und umgekehrt. Bei der hier durchgeführten Testmessung wird das Gas durch den Gasausgang ausgespült und in die Gasanalysestation geleitet.

Das Puffervolumen 1 dient als Dämpfung für den Druck-Regelkreis.

#### Pumpe

Bei der in dem Gassystem verbauten Pumpe handelt es sich um eine Membranpumpe N96STDC-B-M der Firma KNF. In Abbildung 4.6 ist der Aufbau der Pumpe zu sehen. Dabei ist (1) der pneumatische Pumpeneinlass, (2) der pneumatische Pumpenauslass, (3) der Motor und (4) der elektrische Anschluss. Dieser elektrische Anschluss ist aus sechs Leitungen mit verschiedenen Farben aufgebaut. Zwei dieser Leitungen sorgen für die Stromversorgung (rot und schwarz). Eine andere bestimmt die Drehrichtung, bzw. Pumprichtung (gelb). Noch eine schaltet den Motor ein und aus (weiß). Bei den letzten zwei gibt eine davon die Drehzahl aus (blau) und die andere gibt entweder das Eingangssignal für eine Pulsweitenmodulation an oder, falls sie auf Erdung liegt, sorgt sie dafür, dass der Motor auf maximaler Leistung läuft (grün). Um die richtige Pumprichtung zu bestimmen, werden die in Abbildung 4.5 abgebildeten Ventile 1 - 6 geschlossen und die Druckänderung bei den Drucksensoren P5 und P6 beobachtet. Bei einer nicht geschlossenen Leitung [34, S. 21] erhöht sich der Druck bei P6 und bei P5 fällt er. Dies ist die gewünschte Drehrichtung. Nach [34, S. 21] entspricht dies einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn.

#### **Funktionsprinzip:**

In Abbildung 4.7 ist ein Querschnitt der Pumpe zu sehen. Der Exzenter (5) und der Pleuel (6) bewegen die Membran (4) auf und ab. Sie saugt das Gas durch das Einlassventil (2) ein und drückt es durch das Auslassventil (1) wieder heraus. Der Förderraum ist vom Pumpenantrieb durch die Membran separiert [34, S. 13].



Abbildung 4.6: Zu sehen ist die im Aufbau des Gassystems verwendete Membranpumpe. Oben sind der Pumpeneinund Auslass zu sehen, während hinter dem Block der zylindrische Motor zu sehen ist. Von ihm ist auch der elektrische Anschluss zu sehen, der aus sechs Kabeln besteht.



Abbildung 4.7: Zu sehen ist ein Querschnitt der verwendeten Membranpumpe. Mittig ist der Exzenter und der Pleuel zu sehen, welche die elastische Membran, hier in gelb, auf und ab bewegen. Bei dem grünen Einlassventil, wird das Gas eingesaugt, in den Förderraum geleitet und dann durch das rote Auslassventil wieder heraus gestoßen. Entnommen aus [34, S. 13].

### Ventil

Bei dem steuerbaren Ventil handelt es sich um ein 2-Wege-Regelventil der Baureihe 8B der Firma Armaturen AG Von Rohr. Zu sehen ist dieses Modul in Abbildung 4.8. Es ist aus drei Teilen aufgebaut. Dem pneumatischen Hubantrieb (1 & 3), der Elektronik (2), und dem Einsitz-Stellventil (4). Die Elektronik (2) bildet in Verbindung mit dem Antrieb ein Regelungssystem. Ein Servo-Potentiometer misst die aktuelle Stellung des Antriebs und gibt sie als Istwert zurück. Der Sollwert wird über ein 4-20 mA Signal zugeführt. Soll- und Istwert werden auf dem Display abgebildet, das in Abbildung 4.8 zu sehen ist. Die Regelung arbeitet elektropneumatisch und als Hilfsenergie dient Druckluft. Die Stellsignale bewirken Druckänderungen in der Antriebskammer und damit eine Verstellung des Antriebs, bis der Istwert dem Sollwert entspricht. Bei dem Einsitz-Stellventil (4) handelt es sich um ein Regelventil mit einem Parabolkegel.



Abbildung 4.8: Zu sehen ist das im Gassystem verwendete steuerbare Ventil. Es handelt sich um ein 2-Wege Regelventil der Baureihe 8B von der Firma Armaturen AG Von Rohr. Aufgebaut ist es aus drei Teilen. Dem pneumatischen Hubantrieb (1 & 3), der Elektronik (2), und dem Einsitz-Stellventil (4).

### 4.2.2 Drucksensoren

Innerhalb des Gassystems werden zwei verschiedene Arten von Drucksensoren verwendet. Eine Art ist der Typ A-10 der Firma *Wika*. Der Drucksensor des Herstellers Wika wird in verschiedenen Varianten mit unterschiedlichen Messbereichen verwendet. Abgebildet ist einer dieser Drucksensoren in Abbildung 4.9. Dieser basiert auf dem piezoresistiven Effekt. Eine dünne Membran wird durch den Druck verbogen, was zu einer Widerstandsänderung führt, welche dann gemessen wird [35]. Die Sensoren besitzen je nach Messbereich eine unterschiedliche Unsicherheit [36].

Die andere Art ist ein Sensor des Herstellers *First Sensor* mit der Modellbezeichnung *SQ223-18093*. Zu sehen ist dieser in Abbildung 4.10. Auch dieser Sensor basiert auf dem piezoresistiven Effekt [37].

Die Messbereiche mit den zugehörigen Unsicherheiten sind in Tabelle 4.1 zu finden. Die

Unsicherheit der *Wika*-Drucksensoren folgt nach [36], während die Unsicherheit der *First Sensor*-Sensoren 0,077 mbar beträgt. Dies folgt nach [38] und der Fehlerrechnung, die in Kapitel 3.1.1 von der Bachelorarbeit von Luisa Faber [39] zu sehen ist. Es werden dieselben Annahmen getroffen. Die Nummerierung P1 bis P8 folgt dem in Abbildung B.1 zu sehenden Schema des Gassystems.

Tabelle 4.1: Zu sehen sind die Messbereiche und die Unsicherheiten der verschiedenen im Gassystem verwendeten Drucksensoren. Diese sind jeweils durchnummeriert von P1 bis P8.
Diese Nummerierung folgt nach dem in Abbildung B.1 zu sehenden Schema des Gassystems.
Es ist zusätzlich noch der Hersteller angegeben. Hier werden Sensoren der Firma Wika und der Firma First Sensor verwendet.

Drucksensor	Marke	Messbereich in mBar	Unsicherheit
P1	Wika	0/4000	1% der Spanne = $40$ mbar
P2	Wika	0/250	1,3% der Spanne = $3,25$ mbar
P3	First Sensor	-10/10	$0,077\mathrm{mbar}$
P4	First Sensor	-10/10	$0,077\mathrm{mbar}$
P5	Wika	-50/50	1,8% der Spanne = $1,8$ mbar
P6	Wika	0/4000	$1 \%$ der Spanne = $40 \mathrm{mbar}$
Ρ7	Wika	0/10000	1% der Spanne = $100$ mbar
P8	Wika	0/10000	$1\%$ der Spanne = $100\mathrm{mbar}$



Abbildung 4.9: Abgebildet ist eine Art von den im Gassystem verwendeten Drucksensoren. Es handelt sich um einen Typ A-10 Drucksensor der Firma Wika. Speziell ist hier der Sensor P6 am großen Puffervolumen zu sehen. Es werden verschiedene Ausführungen mit unterschiedlichen Messbereichen verwendet, welche unterschiedliche Unsicherheiten besitzen [36]. Die verwendeten Reichweiten mit den zugehörigen Unsicherheiten sind in Tabelle
4.1 aufgelistet. Die Nummerierung P1 bis P8 folgt dem in Abbildung B.1 zu sehenden Schema des Gassystems.



Abbildung 4.10: Abgebildet ist die andere Art von Drucksensoren, welche im Gassystem verwendet werden. Es handelt sich um einen Sensor der Firma *First Sensor* mit der Modellbezeichnung SQ223-18093. Dieser besitzt einen Messbereich von -10 mbar bis 10 mbar mit einer Unsicherheit von 0,077 mbar. Diese Unsicherheit folgt über [38] und der Fehlerrechnung, die in Kapitel 3.1.1 von der Bachelorarbeit von Luisa Faber [39] zu sehen ist. Es werden dieselben Annahmen getroffen.

# 5 Methoden, Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden soll zuerst der Feuchtigkeitseintrag in eine CBM-TRD-Kammer betrachtet werden. Danach wird eine erste Testmessung mit der Testlinie des CBM-TRD-Gassystems betrachtet.

# 5.1 Feuchtigkeitsmessung

#### 5.1.1 Methoden

Bei der Feuchtigkeitsmessung werden mittels des Flussreglers verschiedene Flüsse eingestellt. Diese liegen zwischen 21/h und 71/h. Der größte Flusswert ist durch die Flusswiderstände in der Gasanalysestation begrenzt. Bei höheren Flüssen würde sich der Druck innerhalb der Kammer erhöhen, was dafür sorgen würde, dass die Bubbler im Aufbau auslösen.

Für jede Messreihe liegt die Messzeit bei über 24 Stunden. Es wird auf eine Konvergenz des Feuchtigkeitswerts gewartet. Eine Konvergenz wird hier dann identifiziert, wenn die Feuchtigkeit über mehrere Stunden den gleichen Wert hat.

Um eine Funktion zu finden, die den Datenverlauf beschreibt, müssen zunächst einige Annahmen getroffen werden. In ein Volumen V strömen zwei Gase ein. Ein Gasgemisch und Wasserdampf. Dies in einer Skizze in Abbildung 5.1 schematisch dargestellt. In diesem Fall besteht das Gasgemisch aus 82 %Ar und 18 %CO<sub>2</sub> (Volumenanteile). Das Wasser tritt durch die Kaptonfolie in die Kammer ein. Diese zwei Gase besitzen jeweils einen Fluss von  $F_{H_2O}$ und  $F_{Gas}$ . Diese Flüsse addieren sich zu einem gesamten Fluss  $F_{in}$ . Dabei wird angenommen, dass der Fluss von Wasser in die Kammer konstant ist, da die Feuchtigkeit in der Kammer gegenüber der Luftfeuchte zu vernachlässigen ist. Aus dem Volumen existiert auch ein Fluss hinaus  $F_{out}$ . In diesem Experiment gilt  $F = F_{in} = F_{out}$ .



Abbildung 5.1: Zu sehen ist eine schematische Zeichnung der Feuchtigkeitsmessung. Der Gaszufluss in die Kammer wird hier als Addition von zwei Flüssen betrachtet  $F_{\rm in} = F_{\rm H_2O} + F_{\rm Gas}$ . Die Kammer wird hier als konstantes Volumen V angenommen. Aus diesem Volumen gibt es außerdem einen Gasausfluss  $F_{\rm out}$ . Diese beiden Flüsse sind gleich:  $F = F_{\rm in} = F_{\rm out}$ .

Um die zeitliche Änderung der Konzentration der Feuchtigkeit für diese Situation zu beschreiben soll zuerst die Änderung der Masse im Volumen betrachtet werden:

$$\frac{dM}{dt} = \text{Zufluss} - \text{Abfluss.}$$
(5.1)

Die Masse ist gegeben durch M(t) = C(t)V, wobei C(t) die Konzentration im Volumen ist. Der Massenzufluss ist gegeben durch die Multiplikation des Volumenflusses  $F_{in}$  mit der Konzentration des einfließenden Gases  $C_{in}$ . Die Konzentration ist als Verhältnis der beiden Gasflüsse zu identifizieren:

$$C_{\rm in} = \frac{F_{\rm H_2O}}{F_{\rm Gas}}.$$
(5.2)

So ergibt sich der Zufluss zu

$$\operatorname{Zufluss} = F_{\text{in}} \frac{F_{\text{H}_2\text{O}}}{F_{\text{Gas}}} = F \frac{F_{\text{H}_2\text{O}}}{F_{\text{Gas}}}.$$
(5.3)

Der Massenabfluss ist als Multiplikation des Flusses aus dem Volumen  $F_{\text{out}}$  mit der Konzentration im Volumen C zu verstehen:

$$Abfluss = F_{out}C = FC.$$
(5.4)

Es folgt so insgesamt für die zeitliche Änderung der Konzentration im Volumen

$$\frac{dM}{dt} = \text{Zufluss} - \text{Abfluss}$$
(5.5)

$$\Leftrightarrow \qquad \frac{d(C(t)V)}{dt} = F\left(\frac{F_{\rm H_2O}}{F_{\rm Gas}} - C(t)\right) \tag{5.6}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \frac{dC(t)}{dt} = \frac{F}{V} \left( \frac{F_{\rm H_2O}}{F_{\rm Gas}} - C(t) \right). \tag{5.7}$$

Es handelt sich um eine lineare, inhomogene Differentialgleichung erster Ordnung. Diese lässt sich mit dem Verfahren des Trennens der Variablen lösen:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{F}{V} \left( \frac{F_{\rm H_2O}}{F_{\rm Gas}} - C(t) \right)$$
(5.8)

$$\Leftrightarrow \qquad \int \frac{dC(t)}{\frac{F_{\rm H2O}}{F_{\rm Gas}} - C(t)} = \frac{F}{V} \int dt \tag{5.9}$$

$$\Leftrightarrow \qquad -\ln\left(\frac{F_{\rm H_2O}}{F_{\rm Gas}} - C(t)\right) = \frac{F}{V}(t + \tilde{b}) \tag{5.10}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \frac{F_{\rm H_2O}}{F_{\rm Gas}} - C(t) = e^{-\frac{F}{V}(t+\tilde{b})} \tag{5.11}$$

$$\Leftrightarrow \qquad C(t) = -e^{-\frac{F}{V}\left(t+\tilde{b}\right)} + \frac{F_{\rm H_2O}}{F_{\rm Gas}}.$$
(5.12)

Der Parameter  $\tilde{b}$  wird dabei durch die Anfangsbedingungen festgelegt. Da diese nicht bekannt oder von Bedeutung sind, werden sie hier nicht betrachtet. Wird diese Funktion nun für lange Zeiten beobachtet  $(t \to \infty)$  ergibt sich eine Konvergenz gegen

$$\lim_{t \to \infty} C(t) = \frac{F_{\rm H_2O}}{F_{\rm Gas}}.$$
(5.13)

Somit ist der Konvergenzwert die einfließende Konzentration  $\frac{F_{\text{H}_2\text{O}}}{F_{\text{Gas}}}$ , was auch zu erwarten ist. Zur Bestimmung von Konvergenzwerten werden unterschiedliche Durchflüsse  $F_{\text{Gas}}$  für den Zeitraum einer Messung eingestellt. Werden die Konvergenzwerte gegen die eingestellten Flüsse aufgetragen, wird ein ~  $\frac{1}{F_{\text{Gas}}}$  Zusammenhang erwartet.

So folgen insgesamt die zwei hier verwendeten Fitfunktionen. Zuerst für die Messungen der Feuchtigkeitsverläufe:

$$f(t) = ae^{-ct} + b. (5.14)$$

Dabei ist b der Konvergenzwert, während a und c freie Fitparameter sind.

Werden dann verschiedene Konvergenzwerte gegen die jeweiligen Durchflüsse eingestellt ergibt sich

$$f(D) = \frac{a}{D} \tag{5.15}$$

als Fitungsfunktion.

### 5.1.2 Ergebnisse und Diskussion

#### Bestimmung des Flusses

Der Fluss wird mit einem Flussregler von Vögtlin eingestellt, sodass dieser konstant über die Messzeit ist. Um diesen konstanten Fluss mit dem Flussmessgerät in der Gasanalysestation zu bestimmen, wird er über die Messzeit gemittelt. Bei einer Veränderung des Flusses am Flussregler ist diese Veränderung allerdings nicht direkt in der Gasanalysestation zu messen. Dies liegt daran, dass die eingebaute CBM-TRD-Kammer als Puffervolumen agiert. Deshalb werden bei der Bestimmung des Flusses als Mittelwert über die Messzeit die ersten 15 Minuten nicht betrachtet. Dieser Wert ist willkürlich gewählt nach Beobachtung des Flusses. In Abbildung 5.2 ist hier exemplarisch der Verlauf des Flusses für eine Messung zu sehen. Dabei ist der nicht betrachtete Bereich markiert. Eine Mittelung ergibt hier  $(4,4 \pm 1,1)$ l/h. Eingestellt ist bei dieser Messung ein Fluss von 41/h. Nach Berechnung des eingestellten Flusses über den Umrechnungsfaktor, zu sehen in Kapitel B.1.1 im Anhang, ergibt sich hier  $(3.7 \pm 0.4)$  l/h. Diese Umrechnung wird durchgeführt, da der Flussregler auf ein anderes Gas kalibriert ist. Die Abweichung lässt sich erklären. Über die Dauer der verschiedenen mit der Gasanalysestation durchgeführten Experimente lässt sich eine Versetzung des Nullpunkts des Flussmessgeräts beobachten. Der Flussverlauf ist für die anderen Messungen in Kapitel B.2.2 im Anhang zu finden. Auch bei diesen ergeben sich Abweichungen zwischen den ermittelten und den berechneten Flüssen. Es werden deshalb im Folgenden bei der Feuchtigkeitsmessung die berechneten Werte des Flussreglers verwendet.



Abbildung 5.2: Zu sehen ist der Verlauf des Flusses bei einer der Feuchtigkeitsmessungen. Dabei sind die Werte von je 30 Minuten gemittelt worden. Nach Mittelung ergibt sich ein Fluss von  $(4,4 \pm 1,1)$ l/h. Dieser Wert ist mit dem Flussmessgerät in der Gasanalysestation gemessen. Es ist zu beachten, dass die ersten 15 Minuten bei dieser Mittelung nicht betrachtet werden, da bei einer Änderung des Fluss mit dem Flussregler, diese Änderung erst verspätet bei der Gasanalysestation zu messen ist. Dies liegt daran, dass die *CBM-TRD*-Kammer als Puffervolumen agiert. Der Fluss wird durch den Flussregler konstant geregelt. Der auf dem Display angegebene Wert ist hier 41/h. Nach Umrechnung aufgrund der Kalibration, nach Kapitel B.1.1 im Anhang, ergibt sich  $(3,7 \pm 0,4)$ l/h. Die Abweichung dieser Werte lässt sich über die Beobachtung einer Verschiebung des Nullpunkts des Flussmessgeräts erklären. Es wird hier keine Zeitunsicherheit betrachtet, da diese immer mit der Computeruhr aufgezeichnet wird, und diese als genau genug angenommen wird. Im Folgenden gilt dies auch für die anderen Messungen.

#### Verlauf der Feuchtigkeit

In Abbildung 5.3 ist exemplarisch das Ergebniss einer der Feuchtigkeitsmessungen mit einem Fluss von  $(3,69\pm0,04)$ l/h abgebildet. Die übrigen Messungen sind in Kapitel B.2.1 im Anhang zu sehen. Im oberen Graph ist der Verlauf der Feuchtigkeit in Abhängigkeit von der Zeit zu sehen. In dunkelblau sind dabei die Messwerte abgebildet, während die hellblaue Umrandung der Unsicherheit nach Kapitel 2.4 entspricht. Der Fit folgt der in Gleichung 5.14 gegebenen Exponentialfunktion. Dieser exponentielle Zusammenhang ist hier, sowie bei den anderen Messungen im Anhang, gut zu beobachten. Die Fitparameter sind hier:

$$a = (1433 \pm 15) \text{ ppmV}$$
  $b = (2903 \pm 14) \text{ ppmV}$   $c = (0,1046 \pm 0,0004) \frac{1}{\text{h}}$ 

Die Fitparameter und ihre Unsicherheiten ergeben sich aus *ODR*-Fits (Orthogonal Distance Regression) des *ODR*-Pakets von SciPy [40]. Dies ist im Folgenden auch bei anderen Fits der Fall.

Der für einen Fluss von  $(3,69 \pm 0,04)$ l/h konvergierte Wert ist also  $(2903 \pm 14)$  ppmV. Die restlichen konvergierten Feuchtigkeitswerte und die zugehörigen Flüsse sind in Tabelle 5.1 aufgelistet und in Abbildung 5.4 als Graph dargestellt. In dem Graphen sind die Unsicherheiten der Feuchtigkeitswerte nicht zu sehen, da sie zu klein sind. Der nach Gleichung (5.15) erwartete ~ 1/D Zusammenhang ist eingezeichnet, wobei sich der Fitparameter zu  $a = 7730 \pm 1266$ ergibt. Die Messpunkte liegen allerdings nicht gut auf dem Fit, was sich vermutlich durch hier nicht betrachtbare Einflüsse ergibt. Es mag sich dabei um Einflüsse der Umweltparameter handeln, deren genau physikalische Wirkung hier nicht erklärt werden kann.



Abbildung 5.3: Zu sehen sind zwei verschiedene Graphen, die zur selben Messreihe gehören. Dabei sind jeweils die Daten von 30 Minuten für einen Wert gemittelt worden. Im oberen Graph sind die Feuchtigkeitswerte (dunkelblau) innerhalb der Kammer abgebildet. Der hellblaue Bereich entspricht der Unsicherheit dieser Werte berechnet nach Kapitel 2.4. In magenta ist ein exponentieller Fit nach Gleichung (5.14) eingefügt. Die zugehörigen Parameter sind:  $a = (1433 \pm 15) \text{ ppmV}, c = (0,1046 \pm 0,0004) 1/\text{h} \text{ und } b = (2903 \pm 14) \text{ ppmV}.$  In dem unteren Graph sind die Außentemperatur und die Luftfeuchtigkeit abgebildet, wobei vor allem bei der Temperatur eine gute Konstanz zu sehen ist.

Tabelle 5.1: Aufgelistet sind die konvergierten Feuchtigkeitswerte in ppmV mit den zugehörigen Flüssen in l/h. Bei den Flüssen werden die nach Kapitel B.1.1 im Anhang umgerechneten Werte des Flussreglers verwendet. Die konvergierten Feuchtigkeitswerte ergeben sich durch die Fits nach Gleichung (5.14) für die verschiedenen Messungen.

Fluss in l/h	Konvergierter Feuchtigkeitswert in ppmV	
$1,8 \pm 0,2$	$\pm 0,2$ 2854 $\pm 3$	
$2,8\pm0,3$	$3623\pm15$	
$3,7 \pm 0,4$	$2903 \pm 14$	
$4,6 \pm 0,5$	$2601 \pm 5$	
$5,5\pm0,6$	$1537 \pm 9$	



Abbildung 5.4: Abgebildet sind die konvergierten Feuchtigkeitswerte in ppmV gegen die zugehörigen Flüsse in l/h. Bei den Flüssen werden die nach Kapitel B.1.1 im Anhang umgerechneten Werte des Flussreglers verwendet. Die Unsicherheiten der Feuchtigkeitswerte sind nicht zu erkennen, da sie zu klein sind. Der nach Gleichung (5.15) erwartete  $\sim 1/D$  Zusammenhang ist eingezeichnet. Es ergibt sich der Fitparameter  $a = 7730 \pm 1266$ , wobei der Fit die Werte nicht passend trifft.

#### Nicht gelungene Messung

In Abbildung 5.5 ist der Feuchtigkeitsverlauf einer weiteren Feuchtigkeitsmessung zu sehen, bei der die Konvergenz gegen einen bestimmten Feuchtigkeitswert nicht zu beobachten ist. Bei dieser Messung ist ein Fluss von  $(2,8 \pm 0,3)$  l/h eingestellt. Mit diesem Fluss wurde nach einiger Zeit eine weitere Messung durchgeführt, bei der die Konvergenz eindeutig zu erkennen ist, wie in Abbildung B.3 zu sehen. Auffällig ist hier, dass die Werte der Außentemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit vergleichsweise stark schwanken. Vermutlich ist das aber kein Grund für die fehlende Konvergenz. Denn große Schwankungen der Umgebungsparameter sind auch bei der Messung, bei der die Konvergenz zu beobachten ist, gegeben. Dazu ist Abbildung B.3 im Anhang zu betrachten.



Abbildung 5.5: Zu sehen sind zwei verschiedene Graphen, die zur selben Messreihe gehören. Dabei sind jeweils die Daten von 60 Minuten zu einem Wert gemittelt worden. Im oberen Graph sind die Feuchtigkeitswerte (dunkelblau) innerhalb der Kammer abgebildet. Der hellblaue Bereich entspricht der Unsicherheit dieser Werte berechnet nach Kapitel 2.4. Hierbei ist die Konvergenz der Feuchtigkeitswerte nicht zu beobachten. In dem unteren Graph sind die Außentemperatur und die Luftfeuchtigkeit abgebildet, wobei diese starke Schwankungen zeigen. Da allerdings eine weitere Messung mit demselben Fluss durchgeführt wurde, bei der diese Konvergenz sehr gut zu beobachten ist, und die Umweltparameter dennoch stark schwanken, wie in Abbildung B.3 im Anhang zu sehen, kann diese Schwankung nicht direkt als Ursache identifiziert werden.

Bei dieser Messung ist allerdings eine hohe Korrelation der Außentemperatur zum gemessenen Fluss in der Gasanalysestation zu beobachten. In Abbildung 5.6 ist der Fluss bei der Messung zu sehen. Es lassen sich keine direkten Schwankungen erkennen, da der Fluss vom Flussregler konstant gehalten wird. In Abbildung 5.7 ist die Korrelation zu sehen, wobei der Korrelationskoeffizient 0,91 beträgt und mittels des *Python* Pakets *Numpy* berechnet wird. Es werden Unsicherheiten vernachlässt, da hier nur der prinzipielle Zusammenhang von Bedeutung ist und keine weiteren Berechnungen oder Ableitungen aus dieser Messung vorgenommen werden. Die hier beobachtete hohe Korrelation kann eine Erklärung für die fehlende Konvergenz sein, denn bei den anderen gelungenen Messungen ist diese Korrelation nicht zu erkennen. Die Abbildungen mit den zugehörigen Korrelationskoeffizienten sind in Kapitel B.2.3 im Anhang zu sehen. Ohne weitere Messungen in einer kontrollierten Umgebung ist dieser Zusammenhang allerdings nicht abschließend zu bestätigen.



Abbildung 5.6: Zu sehen ist der Verlauf des Flusses bei der nicht gelungenen Feuchtigkeitsmessung. Der Fluss wird mit dem Flussmessgerät gemessen und es ergibt sich ein mittlerer Fluss von  $(3,4 \pm 1,1)$ l/h. Dabei sind die Werte von je 30 Minuten gemittelt worden. Es ist zu beachten, dass die ersten 15 Minuten bei dieser Mittelung nicht betrachtet werden, da bei einer Änderung des Flusses mit dem Flussregler, diese Änderung erst verspätet bei der Gasanalysestation zu messen ist. Der Fluss wird durch den Flussregler konstant gehalten. Der auf dem Display angegebene Wert ist hier 31/h. Nach Umrechnung aufgrund der Kalibration nach Kapitel B.1.1 im Anhang ergibt sich  $(2,8 \pm 0,3)$  l/h.



Korrelation Temperatur und Durchfluss; Messung: 2,8±0,3 l/h Korrelationskoeffizient: 0,91

Abbildung 5.7: Zu sehen ist die Korrelation zwischen dem an der Gasanalysestation gemessenen Fluss und der Außentemperatur bei der nicht gelungenen Messung mit einem Fluss von  $(2,8 \pm 0,3)$ l/h. Die jeweiligen Werte von Fluss und Temperatur sind dabei über 60 Minuten gemittelt. Die Korrelation ist im Vergleich zu den anderen durchgeführten Messungen sehr hoch, wie in Kapitel B.2.3 im Anhang zu sehen. Dies mag ein Grund für die fehlende Konvergenz der Feuchtigkeit sein. Ohne weitere Messungen ist dieser Zusammenhang allerdings nicht abschließend zu bestätigen.

## 5.2 Gassystem

Im Rahmen dieser Arbeit wird erstmals Gas in das konzipierte Gassystem eingefüllt. Das ganze System wird dabei mittels einer *SPS* (Speicherprogrammierbare Steuerung) gesteuert. Bei dem erstmaligen Einfüllen des Gases bilden sich Drücke innerhalb des Systems, die mit verschiedenen Drucksensoren gemessen werden. Die Positionen dieser Sensoren im System sind in Abbildung B.1 im Anhang zu sehen. Die Verläufe der Drücke sind in Kapitel B.3.1 im Anhang abgebildet. Zusätzlich sind die Verläufe der mit der Gasanalysestation gemessenen Werte dort einzusehen. Dazu gehören die CO<sub>2</sub>-Konzentration, die O<sub>2</sub>-Konzentration, die Feuchtigkeit, der Fluss, die Luftfeuchtigkeit, die Temperatur und der Luftdruck.

Bei der Auswertung fällt auf, dass die Daten der Gasanalysestation, die mit einem Raspberry Pi gebündelt werden, einen falschen Zeitstempel besitzen, da auf dem Raspberry Pi nicht die richtige Zeit gespeichert ist. Dies liegt an dem häufigen Ein- und Ausschalten des Geräts. Es finden zwei Messungen statt. Eine Druckmessung über die SPS und die Gasmessung mit der Gasanalysestation. Und, da diese nicht gleichzeitig gestartet werden, muss eine andere Möglichkeit der Synchronisierung der Daten gefunden werden. Hier wird auf die Erstellzeit der Datei der Gasmessung zurückgegriffen und diese mit den, in der Druckmessung, richtigen Zeitstempeln verbunden. Dies ist ein umständliches Verfahren, weshalb auf dem *Raspberry* Pi ein Programm installiert wird, welches die eigene Zeit ständig über die Netzwerkverbindung kalibriert. So werden nun die Datenpunkte der beiden Messungen passende Zeitstempel besitzen, sodass lediglich innerhalb der Daten ein Startpunkt definiert werden muss.

#### Fluss und Druckverlauf:

Hier sind die Verläufe des gemessenen Flusses aus dem System hinaus und der Verlauf des Drucks an Drucksensor P6 in Abbildungen 5.8 und 5.9 zu sehen. P6 wird hier gewählt, da dieser den Druck innerhalb des Puffervolumen 2 misst, welches sich direkt vor dem Gasausgang und somit vor der Gasanalysestation befindet. Es lässt sich beobachten, dass der Fluss und der Druck sich jeweils Null annähern, während das Gas aus dem System fließt. Es ist allerdings zu beachten, dass der Druck augenscheinlich eher Null erreicht als der Fluss. Die Unsicherheit der Druckwerte lässt aber eine Übereinstimmung der Verläufe dennoch zu. Es soll zusätzlich noch der Druckverlauf am Drucksensor P3 betrachtet werden. Der Verlauf ist in Abbildung 5.10 zu sehen. Der Drucksensor P3 befindet sich, wie in Abbildung B.1 zu sehen ist, nah an der *CBM-TRD*-Kammer, wobei bei dieser Messung keine Kammer eingebaut ist und diese Verbindung mit Schläuchen überbrückt wird. Hier ist eine spätere Konvergenz des Drucks gegen Null zu erkennen, was mit dem Fluss übereinstimmt. Da es sich lediglich um eine Beispielmessung handelt und die Drucksensoren deshalb einen ähnlichen Verlauf zeigen ist der Vergleich mit diesem Drucksensor P3 sinnvoll.



Abbildung 5.8: Zu sehen ist der zeitliche Verlauf des Flusses aus dem System hinaus bei der ersten Beispielmessung mit dem Gassystem, bei der erstmals Gas in das System eingefüllt wird. Die Werte von drei Minuten sind hier jeweils zusammengefasst. Der Fluss fällt nach ungefähr 100 min auf Null ab. Der Fluss ist auch für den Rest der Messung Null. Diese Konvergenz gegen Null ist zu beobachten, da für die Messung Gas in das System gegeben wird, sich so Druck aufbaut, und das Gas dann durch den Gasauslass und die Gasanalysestation austritt.



Abbildung 5.9: Zu sehen sind die ersten drei Stunden des Druckverlaufs an Drucksensor P6 bei der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 3 Minuten gemittelt. Der Druck erreicht nach ungefähr 80 min den Nullpunkt. Der Drucksensor P6 befindet an dem großen Puffer Volumen 2, wie in Abbildung B.1 zu sehen. Der Sensor besitzt einen Messbereich von 0/4000 mbar.



Abbildung 5.10: Zu sehen sind die ersten drei Stunden des Druckverlaufs an Drucksensor P3 bei der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 3 Minuten gemittelt. Der Druck erreicht nach ungefähr 100 min den Nullpunkt. Der Drucksensor P3 befindet sich wie P2 hinter dem Druckreduzierer, wie in Abbildung B.1 zu sehen, wobei er einen Messbereich von -10/+10 mbar besitzt. Daher ist der maximale Druck von 10mbar zu sehen. Der Verlauf deckt sich mit dem Verlauf des Sensors P4, da diese, wie in Abbildung B.1 zu sehen ist, direkt hintereinander aufgebaut sind.

Es ist weiterhin zu beobachten, dass alle Drucksensoren, hier P2 bis P6, die sich bzgl. des Gasflusses hinter dem Druckreduzierer, der in Abbildung B.1 zu sehen ist, befinden einen ähnlichen Verlauf zeigen und zu Null konvergieren. Dies ist in Kapitel B.3.1 im Anhang zu sehen.

#### Sauerstoffkonzentration:

In Abbildung 5.11 ist der Verlauf der Sauerstoffkonzentration bei der ersten Beispielmessung mit dem Gassystem zu sehen. Auffällig ist hierbei, dass schon zu Beginn der Messung die Sauerstoffkonzentration bei ungefähr 2000 ppmV also 0,2% liegt. Es lässt sich daraus schließen, dass zu Beginn der Messung das System nicht mit Luft gefüllt war. Dies liegt daran, dass das System vorher schon auf Dichtigkeit geprüft wurde und dabei mit Gas gefüllt wurde. Auch weiterhin bleibt die Konzentration deutlich unter der in der Luft, was so auch zu erwarten ist, da das Gas, welches in das Gassystem eingefügt wird 82 %Ar und 18 %CO<sub>2</sub> (Volumenanteile) ist. Über den eigentlichen Verlauf der Sauerstoffkonzentration lässt sich qualitativ keine Aussage treffen.



Abbildung 5.11: Zu sehen ist der Verlauf der Sauerstoffkonzentration bei der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Zu bemerken ist, dass schon zu Beginn der Messung die Sauerstoffkonzentration bei 2000 ppmV liegt, dass heißt bei 0,2%. Das Gas innerhalb des Systems ist also zu Beginn nicht Luft. Es wurde vorher schon gespült.

## 5.3 Flussmessgerät Nebenbemerkung

Um die Nullpunktsversetzung des Flussmessgeräts weiterhin zu charakterisieren wird eine weitere Messung durchgeführt. Im folgenden ist der Aufbau schematisch in Abbildung 5.12 gezeigt. Der Fluss wird mit dem Flussregler von *Vögtlin* eingestellt und dann mit dem in der Gasanalysestation verbauten Flussmessgerät von *Aalborg* gemessen. Es werden verschiedene Flüsse eingestellt. Im niedrigen Messbereich wird der Fluss kleinschrittiger erhöht als im höheren Messbereich, weil dies dem erwarteten zukünftigen Arbeitsbereich entspricht. So wird der ganze Messbereich des Flussmessgeräts ausgeschöpft. Es werden zusätzlich zu den Flüssen, die von den jeweiligen Displays abgelesen werden, der Strom des 4-20 mA Signals des Flussmessgeräts aufgeschrieben. In Abbildung 5.13 sind die Messdaten gezeigt. Dabei ist zu erkennen, dass der Zusammenhang vor allem unter Berücksichtigung der Unsicherheiten linear verläuft und, dass der Strom zum passenden Messbereich die gleiche Steigung zeigt. Dies ist so auch zu erwarten, da die Schnittstelle mit der die Werte gemessen werden keine Rolle spielen sollte. Um nun die mit dem Flussmessgerät gemessenen Werte in die tatsächlichen Werte umzuformen wird ein linearer Zusammenhang gefittet

$$f(D) = m \cdot D + n, \tag{5.16}$$

wobei sich  $m_{\rm F} = 1,27 \pm 0,02$  und  $n_{\rm F} = (2,2 \pm 0,2) \, \text{l/h}$  für das Flussmessgerät, und  $m_{\rm S} = (0,198 \pm 0,003) \, \text{mA h/l}$  und  $n_{\rm S} = (4,40 \pm 0,02) \, \text{mA}$  für den Strom ergeben. Diese Funktion ist allerdings das Ergebnis, für den mit dem Flussmessgerät gemessenen Fluss bzw. dem Strom in Abhängigkeit von dem Fluss des Flussreglers und nicht anders herum. Daher muss noch eine Umrechnung stattfinden.

$$f(D) = m \cdot D + n \tag{5.17}$$

$$\Leftrightarrow \qquad D(f) = \frac{1}{m} \cdot f - \frac{m}{n} \tag{5.18}$$

$$\Leftrightarrow \qquad D(f) = \tilde{m}f + \tilde{n} \tag{5.19}$$

mit  $\tilde{m} = \frac{1}{m}$  und  $\tilde{n} = -\frac{m}{n}$ . Es ergeben sich  $\tilde{m}_{\rm F} = 0,787\pm0,007$  und  $\tilde{n}_{\rm F} = (-1,7\pm0,2)$  l/h, und  $\tilde{m}_{\rm S} = (5,06\pm0,07)$  l/(h mA) und  $\tilde{n}_{\rm S} = (-22,2\pm0,3)$  l/h. Diese Werte werden hier nicht verwendet, und sollten auch in Zukunft aufgrund der Zeitabhängigen Nullpunktsversetzung.



Abbildung 5.12: Zu sehen ist der Aufbau für die Kalibrationsmessung des Flussmessgeräts, es werden mithilfe des Flussreglers der Firma *Vögtlin* verschiedene Flüsse eingestellt und dabei die Flüsse, die das Flussmessgerät von *Aalborg* in der Gasanalysestation angibt, vom Display abgelesen und aufgeschrieben. Außerdem wird dabei der Strom des 4-20 mA Signals aufgezeichnet.



Abbildung 5.13: Zu sehen sind die Ergebnisse der Kalibrationsmessung des Flussmessgeräts. Der zugehörige Aufbau ist in Abbildung 5.12 zu sehen. Im niedrigen Messbereich sind die Schritte der Flusserhöhung kleiner als im hohen Messbereich, da dieser niedrige Bereich der erwartete zukünftige Arbeitsbereich ist. Die Zusammenhänge des eingestellten Flusses und des abgelesenen Flusses bzw. des abgelesenen Stroms sind, im Rahmen der Unsicherheit, linear. Es ist ein linearer Fit  $f(D) = m \cdot D + n$  eingezeichnet, wobei sich die Fitparameter zu  $m_{\rm F} = 1,27 \pm 0,02$  und  $n_{\rm F} = (2,2 \pm 0,2)$ l/h für das Flussmessgerät, und  $m_{\rm S} = (0,198 \pm 0,003)$  mA h/l und  $n_{\rm S} = (4,40 \pm 0,02)$  mA für den Strom ergeben.

# 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Gasanalysestation konzipiert und konstruiert. Diese verbindet verschiedene Gassensoren bündelt die Daten. Dies ermöglicht eine schnelle und einfache Methode Sensoren in einen Aufbau zu integrieren und auszulesen. Da die Analysestation auf Dichtigkeit getestet wurde, wird hierdurch das Risiko für Undichtigkeiten im Gesamtsystem verringert, da nicht alle Sensoren einzeln verbunden und auf Dichtigkeit getestet werden müssen. Bei den eingebauten Gassensoren handelt es sich um einen  $CO_2$ -Sensor, einen  $O_2$ -Sensor und einen Feuchtigkeitssensor. Zusätzlich ist ein Flussmessgerät und verschiedene externe Sensoren, die die Umweltparameter messen, eingebaut. Bei diesen Umweltparametern handelt es sich um die Außentemperatur, die Luftfeuchtigkeit und den Luftdruck. Der  $CO_2$ -Sensor seriell mit einer 4-20 mA Verbindung ausgelesen. Dieser Arduino ist dann wie der  $O_2$ -Sensor seriell mit einem Raspberry Pi verbunden, welcher die Daten bündelt und weiterschickt. Die Umweltsensorik wird mit einer I<sup>2</sup>C Verbindung mit dem Raspberry Pi verbunden. Mittels dieser Station werden verschiedene Untersuchungen durchgeführt, wobei diese auch in Zukunft für verschiedene Aufbauten verwendet werden kann.

Es wurde eine Messung durchgeführt mit der der Feuchtigkeitseintrag in eine CBM-TRD-Kammer unter realen Bedingungen charakterisiert werden soll. Dazu wird ein Gasgemisch mit 82 %Ar und 18 %CO<sub>2</sub> Volumenanteile durch die Kammer geleitet, wobei ein Fluss mit einem Flussregler vorgegeben wird. Die Feuchtigkeit und der Fluss werden mit der Gasanalysestation gemessen. Bei der Flussmessung fällt allerdings auf, dass das Flussmessgerät der Firma *Aalborg* eine große Nullpunktsversetzung besitzt, sodass für die Feuchtigkeitsmessungen der eingestellte Fluss des Flussreglers verwendet wird. Da der Flussregler allerdings auf Xenon kalibriert ist und hier das vorher angesprochene Argon, CO<sub>2</sub> Gasgemisch verwendet wird, muss eine Umrechnung des Flusses stattfinden.

Um eine Charakterisierung der Nullpunktsversetzung zu ermöglichen, wird eine weitere Messung durchgeführt, bei der mit dem Flussregler, über den ganzen Messbereich des Flussmessgeräts, Flüsse eingestellt werden. Dabei ist ein linearer Zusammenhang zwischen den Flüssen weiterhin zu beobachten, wobei nun zu empfehlen ist, dass vor einer Messung mit der Gasanalysestation eine solche Kalibrationsmessung durchzuführen ist. Hier ergeben sich sich die Parameter  $\tilde{m}_{\rm F} = 0,787 \pm 0,007$  und  $\tilde{n}_{\rm F} = (-1,7 \pm 0,2)$ l/h zur Umrechnung des mit dem Flussmessgerät gemessenen Flusses in den eingestellten Fluss mit dem linearen Zusammenhang  $D(f) = \tilde{m} \cdot f + \tilde{n}$ .

Bei der Feuchtigkeitsmessung wird zunächst eine theoretische Betrachtung der Situation angestellt, bei der sich ergibt, dass die Feuchtigkeit für einen bestimmten Fluss gegen einen Wert konvergieren sollte. Dies ist so auch zu beobachten. Aus der gleichen theoretischen Überlegung folgt dabei, dass für verschiedene fest eingestellte Flüsse die konvergierten Werte ein antiproportionales Verhalten aufzeigen. Es wird dabei ein Fit nach  $f(D) = \frac{a}{D}$  eingefügt, wobei D der Durchfluss in l/h und a der Fitparameter ist. Der Fitparameter ergibt sich hierbei zu  $a = 7730 \pm 1266$ . Der Fit liegt allerdings nicht sehr gut auf den gemessenen Werten, was allerdings nicht direkt zu erklären ist und vermutlich an nicht betrachteten Einflüssen liegt. Es mag sich dabei um Einflüsse der Umweltparameter handeln, deren genau physikalische Wirkung hier nicht erklärt werden kann.

Bei einer Messung, die mit einem Fluss von  $(2,8 \pm 0,3)$ l/h stattgefunden hat, ist die Konvergenz nicht zu beobachten. Es lassen sich dabei große Schwankungen der Außentemperatur und Luftfeuchtigkeit beobachten. Da allerdings auch bei einer wiederholten Messung mit diesem Fluss große Schwankungen in den beobachteten Variablen zu sehen sind, und die Konvergenz dennoch erhalten wird, sind diese Schwankungen kein Grund für die fehlende Konvergenz. Es wird bei dieser Messung allerdings eine hohe Korrelation zwischen dem gemessenen Fluss und der Außentemperatur beobachtet. Der Korrelationskoeffizient ergibt sich zu 0,91. Diese hohe Korrelation ist bei den geglückten Messungen nicht zu beobachten. Diese Korrelation könnte also eine Erklärung für die fehlende Konvergenz liefern. Ohne weitere Messungen in einer kontrollierten Umgebung ist dieser Zusammenhang aber nicht abschließend zu bestätigen. Für eine weitere Betrachtung des Feuchtigkeitseintrags in eine *CBM-TRD*-Kammer sollte die Messung für mehrere unterschiedliche Flüsse durchgeführt werden. Außerdem sollte diese Messung in einer klimakontrollierten Umgebung stattfinden. Hierbei ist die Kontrolle der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit von besonderem Interesse.

Es wird eine erstmalige Testmessung, mit der Probelinie des *CBM-TRD*-Gassystems, durchgeführt. Dabei wird Gas in das System geleitet, und Druck aufgebaut. Das Gas wird dann wieder aus dem System hinausgeleitet, wo es mit der Gasanalysestation untersucht wird. Es werden verschiedene Drucksensoren mittels einer *SPS* (Speicherprogrammierbare Steuerung) ausgelesen. Auch wird ein Ventil und eine zugehörige Pumpe mit der *SPS* angesteuert und verbunden. Es lassen sich der Fluss aus dem System und die im System gemessenen Drücke vergleichen. Nachdem Gas in das System eingefüllt wird, fließt das Gas nachdem der Ausgang geöffnet wird ab. Der Fluss fällt nach ungefähr 100 min auf Null ab. Der Druck am Drucksensor P6, der sich am dem Puffervolumen befindet, welches direkt vor dem Ausgang liegt, fällt schon nach 80 min auf Null ab. Die Werte passen im Rahmen der Messunsicherheiten dennoch zueinander. Weiterhin wurde der Verlauf des Drucksensors P3 betrachtet, der sich besser mit dem Verlauf des Flusses deckt. Dieser besitzt einen deutlich kleineren Messbereich und eine kleinere Unsicherheit.

Weiterhin lässt sich die Sauerstoffkonzentration während der Messung beschreiben. Diese ist schon zu Beginn der Messung bei einem Wert von ungefähr 2000 ppmV (0,2%). Das heißt, dass das System auch zu Beginn der Messung nicht mit Luft gefüllt war. Das System wurde schon vorher auf Dichtigkeit geprüft, wobei Gas in das System geleitet wurde. Auch bei der weiteren Messung bleibt die Sauerstoffkonzentration niedrig, was sich mit dem verwendeten Gasgemisch von 82 %Ar und 18 %CO<sub>2</sub> (Volumenanteile) begründen lässt. Über den eigentlichen Verlauf der Konzentration lässt sich hier allerdings keine Aussage treffen.

Mit dem Gassystem werden in Zukunft weitere Messungen durchgeführt. Dabei ist vor allem eine Regelung mit den Drucksensoren und dem Ventil der Zirkulationspumpe von größter Wichtigkeit. So lassen sich dann verschiedene Regelungsmodi für das Gassystem erzeugen. Wie ein Spülungsvorgang oder ein Operationsmodus, bei denen dann auch eine oder mehrere *CBM-TRD*-Kammern eingebaut sind. Ebenfalls lassen sich längerfristige Systemparameter wie der Feuchteeintrag und der Sauerstoffeintrag bestimmen.

# A Unsicherheitsbetrachtung

## A.1 Datenerfassung mit dem Arduino

Bei der Betrachtung der 4-20 mA Signale mit dem Arduino ist zuerst die Unsicherheit der 249  $\Omega$  Widerstände zu betrachten, die zur Umrechnung des Stromsignals in ein Spannungssignal verwendet werden. Die Unsicherheit beträgt laut Hersteller 0,1 % [41]. Die Unsicherheit beträgt also  $u(R) = 0,249 \Omega$ . Die Bit-Tiefe des Analog-Digital-Wandlers, welche 2<sup>10</sup> beträgt [14], sorgt für eine Unsicherheit nach Rechteckverteilung [42]. Dabei ist zu betrachten zwei Spannungswerte bei 1023 Bits, die 5 V darstellen,

$$\frac{5\,\mathrm{V}}{1023} = 0,0049\,\mathrm{V}.\tag{A.1}$$

auseinander liegen. Es folgt also mit Rechtecksunsicherheit nach GUM [42]

$$u(U) = \frac{0,0049 \,\mathrm{V}}{2\sqrt{3}} \approx 0,0015 \,\mathrm{V}.$$
 (A.2)

Der Stromwert ergibt sich über I = U/R. Also folgt über Fehlerfortpflanzung eine Unsicherheit von

$$u(I) = \sqrt{\left(u(U)\frac{1}{R}\right)^2 + \left(-u(R)\frac{U}{R^2}\right)^2} \approx 0.03 \,\mathrm{mA}.$$
 (A.3)

Diese Unsicherheit muss für die Sensoren, die mit dem 4-20 mA Signalen ausgelesen werden, betrachtet werden. Bei diesen ergibt sich die Umrechnung der Stromwerte in die tatsächlichen Werte über einen linearen Zusammenhang nach Kapitel 3.1. Dieser lineare Zusammenhang erfolgt aus zwei bekannten Wertepaaren. Diese Wertepaare können Unsicherheiten besitzen, sodass sich auch für die Steigungen und Verschiebungen Unsicherheiten ergeben. Mit Gleichungen (A.4) und (A.5)

$$m = \frac{y_2 - y_1}{I_2 - I_1} \tag{A.4}$$

$$n = \frac{y_1 I_2 - y_2 I_1}{I_2 - I_1} \tag{A.5}$$

folgen Unsicherheiten von

$$u(m) = \frac{1}{I_2 - I_1} \sqrt{\left(u\left(I_1\right)\frac{y_2 - y_1}{I_2 - I_1}\right)^2 + \left(u\left(I_2\right)\frac{y_1 - y_2}{I_2 - I_1}\right)^2 + \left(-u\left(y_1\right)\right)^2 + \left(u\left(y_2\right)\right)^2}$$
(A.6)

und

$$u(n) = \frac{1}{I_2 - I_1} \left[ \left( u(I_1) I_2 \frac{y_1 - y_2}{I_2 - I_1} \right)^2 + \left( u(I_2) I_1 \frac{y_2 - y_1}{I_2 - I_1} \right)^2 + \left( u(y_1) I_2 \right)^2 + \left( u(y_2) I_1 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$
(A.7)

Mit diesen Unsicherheiten folgt für die Berechnung der Sensorwerte über den linearen Zusammenhang der Gleichung (A.8)

$$y = m \cdot I + n \tag{A.8}$$

eine Unsicherheit von

$$u(y) = \sqrt{(u(m)I)^2 + (u(I)m)^2 + (u(n))^2}.$$
(A.9)

Diese Unsicherheit muss für den  $CO_2$ -Sensor, den Feuchtigkeitssensor und das Flussmessgerät einzeln betrachtet werden.

## A.1.1 CO<sub>2</sub>-Sensor

Beim CO<sub>2</sub>-Sensor hat nur eines der Wertepaare, mit denen die Parameter der Geradengleichung berechnet werden, Unsicherheiten  $((12,74 \pm 0.03) \text{ mA}; (16,500 \pm 0.003) \%)$ . Das andere Wertepaar ist durch die eingestellte Reichweite vorausgesetzt. Es ergeben sich so Unsicherheiten für Steigung und Offset von
$$u(m_{\rm CO_2}) = \frac{1}{20\,\mathrm{mA} - 12,76\,\mathrm{mA}} \cdot \sqrt{\left(0,03\,\mathrm{mA} \cdot \frac{30\,\% - 16,5\,\%}{20\,\mathrm{mA} - 12,76\,\mathrm{mA}}\right)^2 + (0,003\,\%)^2}$$
  
= 0,008 %/mA (A.10)  
$$u(n_{\rm CO_2}) = \frac{1}{20\,\mathrm{mA} - 12,76\,\mathrm{mA}} \cdot \left[\left(0,03\,\mathrm{mA} \cdot 20\,\mathrm{mA} \cdot \frac{16,5\,\% - 30\,\%}{20\,\mathrm{mA} - 12,76\,\mathrm{mA}}\right)^2 + (0,003\,\% \cdot 20\,\mathrm{mA})^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
  
= 0,2 %. (A.11)

So ergibt sich mit Gleichung (A.9) insgesamt für den  $CO_2$ -Sensor die Unsicherheit:

$$u(y_{\rm CO_2}) = \sqrt{(0,008\%/\rm{mA} \cdot 20\,\rm{mA})^2 + (0,03\,\rm{mA} \cdot 1,864\%/\rm{mA})^2 + (0,2\%)^2}$$
  
= 0,27\%. (A.12)

Dabei wird 20 mA für den Wert von I verwendet. Dies entspricht dem Maximalwert und da die Unsicherheit monoton mit der Stromstärke wächst wird dies als obere Grenze für die Unsicherheit verwendet. Die insgesamte Unsicherheit für den CO<sub>2</sub>-Sensor ergibt sich aus einer Kombination aus diesem Wert und der intrinsischen Unsicherheit des Sensors. Diese intrinsische Unsicherheit wird hier durch die Rechteckverteilung dargestellt. Der Sensor gibt die Werte auf zwei Dezimalstellen genau aus. Somit folgt mit Rechteckverteilung nach GUM [42]

$$u_{\text{Rechteck};\text{CO}_2} = \frac{0.01\,\%}{2\sqrt{3}} = 0.003\,\%.$$
 (A.13)

Werden diese Unsicherheiten kombiniert ergibt sich

$$u_{\rm CO_2} \approx 0.27 \,\%.$$
 (A.14)

### A.1.2 H<sub>2</sub>O-Sensor

Beim H<sub>2</sub>O-Sensor besitzen die Wertepaare, mit denen die Geradengleichung zur Berechnung der Sensorwerte ermittelt werden, keine Unsicherheiten, da sie vom Gerät vorausgesetzt sind. Daher sind die Unsicherheiten  $u(m_{H_2O}) = u(n_{H_2O}) = 0$ . Es ergibt sich so für die Berechnung der Werte aus dem Stromsignal eine Unsicherheit von

$$u(y_{\rm H_2O}) = u(I) m = 0.03 \,\mathrm{mA} \cdot 1000 \,\mathrm{ppmV/mA} = 30 \,\mathrm{ppmV}.$$
 (A.15)

Diese Unsicherheit muss wiederum mit der intrinischen Unsicherheit des Sensors kombiniert werden. Diese Unsicherheit ist nach Hersteller als  $\pm 2$  °C angegeben. Dies als die Unsicherheit der Tautemperatur des Wassers innerhalb des Gases zu verstehen. Da allerdings die Werte als absolute Feuchtigkeit in ppmV angegeben sind müssen diese Werte ineinander umgerechnet werden. Diese zugehörigen Umrechnungen sind in Kapitel 2.4 erklärt. Es wird dabei so vorgegangen, dass zuerst die absolute Feuchtigkeit in ppmV in eine relative Feuchtigkeit in % umgerechnet wird. Danach wird diese relative Feuchtigkeit mit der Tautemperatur in Verbindung gebracht. Von diesem Wert werden dann die zwei Temperaturen betrachtet, die jeweils 2 °C neben dem Wert liegen. Diese werden jeweils zurück in eine absolute Feuchtigkeit umgewandelt um dann die untere und obere Unsicherheit darzustellen. Diese beiden Werte werden dann mit dem hier berechneten Wert von 30 ppmV kombiniert.

### A.1.3 Flussmessgerät

Beim Flussmessgerät besitzt nur ein Wertepaar, zur Berechnung der Geradengleichung, Unsicherheiten

 $((4,42 \pm 0,03) \text{ mA}; (2,93 \pm 0,03) \text{ l/h})$ . Es handelt sich dabei um eine Nullpunktsmessung, die in Abbildung A.1) zu sehen ist, wo Mittelwert und Standardabweichung gebildet werden.



Abbildung A.1: Zu sehen sind die Messwerte einer Nullpunktsmessung. Da das Flussmessgerät eine Verschiebung besitzt, muss dies betrachtet werden. Es ergibt sich als Mittelwert mit Standardabweichung:  $(2,93 \pm 0,03)$  l/h.

Das andere Wertepaar ist vom Gerät vorgegeben (20 mA; 100 l/h). Es ergeben sich so Unsicherheiten für Steigung und Offset

$$u(m_{\rm Fluss}) = \frac{1}{20\,\mathrm{mA} - 4,42\,\mathrm{mA}} \cdot \sqrt{\left(0,03\,\mathrm{mA}\frac{100\,\mathrm{l/h} - 2,93\,\mathrm{l/h}}{20\,\mathrm{mA} - 4,42\,\mathrm{mA}}\right)^2 + \left(0,03\,\frac{\mathrm{l}}{\mathrm{h}}\right)^2} = 0,0122\,\frac{\mathrm{lmA}}{\mathrm{h}}$$
(A.16)  
$$u(n_{\rm Fluss}) = \frac{1}{20\,\mathrm{mA} - 4,42\,\mathrm{mA}} \cdot \left[\left(0,03\,\mathrm{mA} \cdot 20\,\mathrm{mA} \cdot \frac{100\,\mathrm{l/h} - 2,93\,\mathrm{l/h}}{20\,\mathrm{mA} - 4,42\,\mathrm{mA}}\right)^2 + \left(0,03\,\frac{\mathrm{l}}{\mathrm{h}} \cdot 20\,\mathrm{mA}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
$$\approx 0,243\,\frac{\mathrm{l}}{\mathrm{h}}.$$
(A.17)

So ergibt sich mit Gleichung (A.9) die Unsicherheit der Datenaufnahme des Arduinos für das Flussmesser

$$u(y_{\rm Fluss}) = \sqrt{\left(0,0122 \,\frac{\rm l\,mA}{\rm h} \cdot 20\,\rm mA\right)^2 + \left(0,03\,\rm mA \cdot 6,23\,\frac{\rm l\,mA}{\rm h}\right)^2 + \left(0,243\,\frac{\rm l}{\rm h}\right)^2} \\ \approx 0.5\,\frac{\rm l}{\rm h}.$$
(A.18)

Auch hier wird 20 mA als Stromwert verwendet um eine obere Schranke der Unsicherheit festzulegen. Der hier berechnete Wert muss noch mit der intrinsischen Unsicherheit des Flussmessers kombiniert werden. Diese beträgt nach Hersteller  $u_{\text{Hersteller;Fluss}} = 11/h$ . Insgesamt ergibt sich so eine Unsicherheit von

$$u_{\rm Fluss} \approx 1.1 \, \frac{\rm l}{\rm h}$$
 (A.19)

# A.2 Rebinning

Da die Gasanalysestation und der damit verbundene Arduino und Raspberry Pi jeweils pro Sekunde einen Datenpunkt ausgeben, und die Messungen meist über mehrere Stunden, wenn nicht Tage laufen, ist es sinnvoll den Mittelwert von mehreren Datenpunkten zu erfassen. Dies wird als sogenanntes *Rebinning* bezeichnet. Beim mitteln über mehrere Werte wird hier folgende Formel des aritmetischen Mittels verwendet siehe [43]:

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}.$$
(A.20)

Gleichzeitig muss allerdings für diesen Mittelwert die Standardabweichung betrachtet werden, die eine weitere Unsicherheit verursacht. Diese ist nach [43] folgendermaßen zu berechnen:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})}{n-1}}.$$
 (A.21)

Diese Unsicherheit wird jeweils mit den vorher betrachteten Unsicherheiten kombiniert.

# A.3 Sonstige Unsicherheiten

### Umweltsensorik:

Mit der Umweltsensorik werden Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck gemessen. Die Unsicherheiten sind folgende [44] [28]):

$$u(T) = 0.4 \,^{\circ}\mathrm{C} \tag{A.22}$$

$$u(H) = 3\%$$
 (A.23)

$$u(P) = 0.5 \,\mathrm{mbar} \tag{A.24}$$

### Sauerstoffsensor:

Der Sauerstoffsensor besitzt eine Unsicherheit von 1 % [17].

#### Flussregler:

Der Flussregler der Firma *Vögtlin* besitzt eine vom Hersteller angegebenen Unsicherheit von 1 %. Durch die in Kapitel B.1.1 beschriebene Umrechnung ergibt sich eine zusätzliche Unsicherheit von 10 %, sodass für den Flussregler insgesamt eine Unsicherheit von

$$u_{\text{Flussregler}} = \sqrt{(1\%)^2 + (10\%)^2} \approx 10\%.$$
 (A.25)

### Drucksensoren:

Die im Gassystem verwendeten Drucksensoren besitzen jeweils unterschiedliche Messbereiche und damit verbundene Unsicherheiten. In Tabelle A.1 sind diese Messbereiche und Unsicherheiten aufgelistet. Tabelle A.1: Zu sehen sind die Messbereiche und die Unsicherheiten der verschiedenen im Gassystem verwendeten Drucksensoren. Diese sind jeweils durchnummeriert von P1 bis P8.
Diese Nummerierung folgt nach dem in Abbildung B.1 zu sehenden Schema des Gassystems.
Es ist zusätzlich noch der Hersteller angegeben. Hier werden Sensoren der Firma Wika und der Firma First Sensor verwendet.

Drucksensor	Marke	Messbereich in mBar	Unsicherheit
P1	Wika	0/4000	1% der Spanne = $40$ mbar
P2	Wika	0/250	1,3% der Spanne = $3,25$ mbar
P3	First Sensor	-10/10	$0,\!077\mathrm{mbar}$
P4	First Sensor	-10/10	$0,077\mathrm{mbar}$
P5	Wika	-50/50	1,8% der Spanne = $1,8$ mbar
P6	Wika	0/4000	1% der Spanne = $40$ mbar
P7	Wika	0/10000	1% der Spanne = $100$ mbar
P8	Wika	0/10000	1% der Spanne = $100$ mbar

# Nebenbemerkung für das Flussmessgerät

Die Parameter für die Geradengleichung der Kalibrationsmessung ergeben sich aus den Fitparametern, die sich aus dem *ODR*-Fit des *ODR*-Pakets von SciPy [40] ergeben. Die Unsicherheiten der Fitparameter ergeben sich auch so. Die Umrechnung der Parameter folgen über

$$\tilde{m} = \frac{1}{m} = 0,787$$
(A.26)

$$\tilde{n} = -\frac{m}{n} = -1.7 \,\frac{l}{h},$$
(A.27)

mit  $m=1,27\pm0,02$ und  $n=(2,2\pm0,2)\,\mathrm{l/h.}$ Daraus ergeben sich nach Fehlerfortpflanzung die Unsicherheiten

$$u(\tilde{m}) = u(m)\frac{1}{m^2} = 0,007$$
 (A.28)

$$u(\tilde{n}) = \sqrt{\left(u(n)\frac{1}{m}\right)^2 + \left(u(m)\frac{n}{m^2}\right)^2} = 0.2\frac{1}{h}.$$
 (A.29)

# **B** Anhang

# B.1 Aufbau

#### **B.1.1 Gasanalysestation**

### Umrechnung der Kalibration für Xenon zu Ar/CO2

Der hier für die Feuchtigkeitsmessung verwendete Flussregler der Firma  $V\"{o}gtlin$  ist für ein Xenon Gas kalibriert. Da hier allerdings ein 82 %Ar und 18 %CO<sub>2</sub> (Volumenanteile) verwendet wird muss eine Umrechnung stattfinden, um den tatsächlich eingestellten Fluss zu bestimmen. Diese Umrechnung wird im folgenden beschrieben, und folgt den in [22] gegebenen Formeln und angegebenen Werten.

Die Kalibration basiert auf den sogenannten K Faktoren. Dieser K Faktor wird von der Gasdichte und dem spezifischen Wärmekoeffizient abgeleitet. Hier werden allerdings die in [22] gegebenen K Faktoren verwendet. Mit den K Faktoren von den Gasen lässt sich so ein Zusammenhang mit dem Fluss finden:

$$\frac{Q_{\rm a}}{Q_{\rm r}} = \frac{K_{\rm a}}{K_{\rm r}}.\tag{B.1}$$

Dabei ist  $Q_a$  der Fluss vom tatsächlichen Gas (Hier: 82 %Ar und 18 %CO<sub>2</sub> (Volumenanteile)),  $Q_r$  der Fluss eines Referenzgases (Hier: Xenon) und  $K_a$  und  $K_r$  die zugehörigen K Faktoren. Es ergibt sich so also der Fluss von dem tatsächlichen Gas zu

$$Q_{\rm a} = Q_{\rm r} \cdot \frac{K_{\rm a}}{K_{\rm r}}.\tag{B.2}$$

Die hier wichtigen K Faktoren sind in Tabelle B.1 aufgelistet. Sie folgend den in [22] angegebenen Werten.

Es ergibt sich so insgesamt ein Umrechnungsfaktor von

$$\frac{K_{\rm a}}{K_{\rm r}} = \frac{0,82 \cdot 1,4573 + 0,18 \cdot 0,7382}{1,44} = 0,92213.$$
(B.3)

Tabelle B.1: Aufgelistet sind die für die Umrechnung der Kalibration des Flussreglers verwendeten K Faktoren. Diese sind jeweils aus [22] entnommen.

Gas	K Faktor
Xenon	1,44
$CO_2$	0,7382
Argon	1,4573

Diese Umrechnung sorgt für eine zusätzliche Unsicherheit von 10% [22].

# B.1.2 Gassystem



Abbildung B.1: Zu sehen ist eine detailierte Zeichnung des Gassystems mit den zugehörigen Teilen. Diese Abbildung ist von Felix Fidorra erstellt worden. Bei der *Mixing Unit* wird das Gas in das System eingeführt, während das *Pressure Steering* Modul für einen passenden Druck innerhalb der *CBM-TRD*-Kammer sorgt. Die *Circular Pump* sorgt für einen passenden Fluss innerhalb des Systems.

# **B.2 Feuchtigkeitsmessung**

## **B.2.1 Feuchtigkeitsmessungen**



Abbildung B.2: Zu sehen sind zwei verschiedene Graphen, die zur selben Messreihe gehören. Dabei sind jeweils die Daten von je 30 Minuten gemittelt worden. Im oberen Graph sind die Feuchtigkeitswerte (dunkelblau) innerhalb der Kammer abgebildet. Der hellblaue Bereich entspricht der Unsicherheit dieser Werte berechnet nach Kapitel 2.4. In magenta ist ein exponentieller Fit nach Gleichung (5.14) eingefügt. Die zugehörigen Parameter sind:  $a = (-436 \pm 7) \text{ ppmV}, c = (0,241 \pm 0,009) \text{ 1/h}$  und  $b = (2854 \pm 3) \text{ ppmV}$ . Zu beachten ist hier, dass die Feuchtigkeit beim annähern an den konvergierten Wert wächst. Dies liegt daran, dass vor dieser Messung ein höherer Fluss eingestellt war und so die Feuchtigkeit geringer ist. In dem unteren Graph sind die Außentemperatur und die Luftfeuchtigkeit abgebildet.



Abbildung B.3: Zu sehen sind zwei verschiedene Graphen, die zur selben Messreihe gehören. Dabei sind jeweils die Daten von je 30 Minuten gemittelt worden. Im oberen Graph sind die Feuchtigkeitswerte (dunkelblau) innerhalb der Kammer abgebildet. Der hellblaue Bereich entspricht der Unsicherheit dieser Werte berechnet nach Kapitel 2.4. In magenta ist ein exponentieller Fit nach Gleichung (5.14) eingefügt. Die zugehörigen Parameter sind:  $a = (5602 \pm 100) \text{ ppmV}, c = (0,063 \pm 0,002) \text{ 1/h}$  und  $b = (3623 \pm 15) \text{ ppmV}$ . Zu beachten ist hier, dass die Messzeit größer ist als bei den anderen Messungen. Dies liegt daran, dass diese Messung nicht an eine andere angeschlossen hat, sondern beginnt nachdem die Kammer für längere Zeit nicht mit Gas gespült wurde und somit die Anfangsfeuchtigkeit größer ist als bei anderen Messungen. In dem unteren Graph sind die Außentemperatur und die Luftfeuchtigkeit abgebildet.



Abbildung B.4: Zu sehen sind zwei verschiedene Graphen, die zur selben Messreihe gehören. Dabei sind jeweils die Daten von je 30 Minuten gemittelt worden. Im oberen Graph sind die Feuchtigkeitswerte (dunkelblau) innerhalb der Kammer abgebildet. Der hellblaue Bereich entspricht der Unsicherheit dieser Werte berechnet nach Kapitel 2.4. In magenta ist ein exponentieller Fit nach Gleichung (5.14) eingefügt. Die zugehörigen Parameter sind:  $a = (331 \pm 6) \text{ ppmV}, c = (0,137 \pm 0,007) 1/\text{h}$  und  $b = (2601 \pm 5) \text{ ppmV}$ . In dem unteren Graph sind die Außentemperatur und die Luftfeuchtigkeit abgebildet.



Abbildung B.5: Zu sehen sind zwei verschiedene Graphen, die zur selben Messreihe gehören. Dabei sind jeweils die Daten von je 30 Minuten gemittelt worden. Im oberen Graph sind die Feuchtigkeitswerte (dunkelblau) innerhalb der Kammer abgebildet. Der hellblaue Bereich entspricht der Unsicherheit dieser Werte berechnet nach Kapitel 2.4. In magenta ist ein exponentieller Fit nach Gleichung (5.14) eingefügt. Die zugehörigen Parameter sind:  $a = (1024 \pm 21) \text{ ppmV}, c = (0,1626 \pm 0,0007) 1/\text{h} \text{ und } b = (1537 \pm 9) \text{ ppmV}.$  Hier ist der Verlauf der Außentemperatur deutlich variabler.

## **B.2.2 Flussmessung**



Abbildung B.6: Zu sehen ist der Verlauf des Flusses bei einer der Feuchtigkeitsmessungen. Dabei sind die Werte von je 30 Minuten gemittelt worden. Nach Mittelung ergibt sich ein Fluss von  $(2,3 \pm 1,1)$ l/h. Dieser Wert ist mit dem Flussmessgerät in der Gasanalysestation gemessen. Dabei ist zu beachten, dass die ersten 15 Minuten bei dieser Mittelung nicht betrachtet werden, da bei einer Änderung des Fluss mit dem Flussregler, diese Änderung erst verspätet bei der Gasanalysestation zu messen ist. Dies liegt daran, dass die *CBM-TRD*-Kammer als Puffervolumen agiert. Der Fluss wird durch den Flussregler konstant geregelt. Der auf dem Display angegebene Wert ist hier 21/h. Nach Umrechnung aufgrund der Kalibration ergibt sich  $(1,8 \pm 0,2)$ l/h. Die Abweichung dieser Werte lässt sich über die Beobachtung einer Verschiebung des Nullpunkts erklären.



Abbildung B.7: Zu sehen ist der Verlauf des Flusses bei einer der Feuchtigkeitsmessungen. Dabei sind die Werte von je 30 Minuten gemittelt worden. Nach Mittelung ergibt sich ein Fluss von  $(3,4 \pm 1,1)$ l/h. Dieser Wert ist mit dem Flussmessgerät in der Gasanalysestation gemessen. Dabei ist zu beachten, dass die ersten 15 Minuten bei dieser Mittelung nicht betrachtet werden, da bei einer Änderung des Fluss mit dem Flussregler, diese Änderung erst verspätet bei der Gasanalysestation zu messen ist. Dies liegt daran, dass die *CBM-TRD*-Kammer als Puffervolumen agiert. Der Fluss wird durch den Flussregler konstant geregelt. Der auf dem Display angegebene Wert ist hier 31/h. Nach Umrechnung aufgrund der Kalibration ergibt sich  $(2,8 \pm 0,3)$ l/h. Die Abweichung dieser Werte lässt sich über die Beobachtung einer Verschiebung des Nullpunkts erklären.



Abbildung B.8: Zu sehen ist der Verlauf des Flusses bei einer der Feuchtigkeitsmessungen. Dabei sind die Werte von je 30 Minuten gemittelt worden. Nach Mittelung ergibt sich ein Fluss von  $(5,5 \pm 1,1)$ l/h. Dieser Wert ist mit dem Flussmessgerät in der Gasanalysestation gemessen. Dabei ist zu beachten, dass die ersten 15 Minuten bei dieser Mittelung nicht betrachtet werden, da bei einer Änderung des Fluss mit dem Flussregler, diese Änderung erst verspätet bei der Gasanalysestation zu messen ist. Dies liegt daran, dass die *CBM-TRD*-Kammer als Puffervolumen agiert. Der Fluss wird durch den Flussregler konstant geregelt. Der auf dem Display angegebene Wert ist hier 51/h. Nach Umrechnung aufgrund der Kalibration ergibt sich  $(4,6 \pm 0,5)$ l/h. Die Abweichung dieser Werte lässt sich über die Beobachtung einer Verschiebung des Nullpunkts erklären.



Abbildung B.9: Zu sehen ist der Verlauf des Flusses bei einer der Feuchtigkeitsmessungen. Dabei sind die Werte von je 30 Minuten gemittelt worden. Nach Mittelung ergibt sich ein Fluss von  $(6,4 \pm 1,1)$ l/h. Dieser Wert ist mit dem Flussmessgerät in der Gasanalysestation gemessen. Dabei ist zu beachten, dass die ersten 15 Minuten bei dieser Mittelung nicht betrachtet werden, da bei einer Änderung des Fluss mit dem Flussregler, diese Änderung erst verspätet bei der Gasanalysestation zu messen ist. Dies liegt daran, dass die *CBM-TRD*-Kammer als Puffervolumen agiert. Der Fluss wird durch den Flussregler konstant geregelt. Der auf dem Display angegebene Wert ist hier 61/h. Nach Umrechnung aufgrund der Kalibration ergibt sich  $(5,5 \pm 0,6)$ l/h. Die Abweichung dieser Werte lässt sich über die Beobachtung einer Verschiebung des Nullpunkts erklären.



## **B.2.3 Korrelation Temperatur & Durchfluss**

Abbildung B.10: Zu sehen ist die Korrelation zwischen dem an der Gasanalysestation gemessenen Fluss und der Außentemperatur bei der geglückten Messung mit einem Fluss von  $(1,8\pm0,2)$ l/h. Die Korrelation ist vergleichsweise hoch, es lässt sich jedoch kein bestimmten Zusammenhang erkennen.



Abbildung B.11: Zu sehen ist die Korrelation zwischen dem an der Gasanalysestation gemessenen Fluss und der Außentemperatur bei der geglückten Messung mit einem Fluss von  $(2,8 \pm 0,3)$ l/h. Es lässt sich kein Zusammenhang erkennen.



Abbildung B.12: Zu sehen ist die Korrelation zwischen dem an der Gasanalysestation gemessenen Fluss und der Außentemperatur bei der geglückten Messung mit einem Fluss von  $(3,7 \pm 0,4)$ l/h. Es lässt sich kein Zusammenhang erkennen.



Abbildung B.13: Zu sehen ist die Korrelation zwischen dem an der Gasanalysestation gemessenen Fluss und der Außentemperatur bei der geglückten Messung mit einem Fluss von  $(4,6 \pm 0,5)$ l/h. Es lässt sich kein Zusammenhang erkennen.



Abbildung B.14: Zu sehen ist die Korrelation zwischen dem an der Gasanalysestation gemessenen Fluss und der Außentemperatur bei der geglückten Messung mit einem Fluss von  $(5,5 \pm 0,6)$ l/h. Es lässt sich kein Zusammenhang erkennen.

# **B.3 Gassystem**

# B.3.1 Druckmessungen



Abbildung B.15: Zu sehen sind die ersten drei Stunden des Druckverlaufs an Drucksensor P1 bei der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 3 Minuten gemittelt. Der Drucksensor P1 befindet sich direkt hinter dem Gaseinlass, zu sehen in Abbildung B.1, und besitzt einen Messbereich von 0/4000 mbar.



Abbildung B.16: Zu sehen sind die ersten drei Stunden des Druckverlaufs an Drucksensor P2 bei der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 3 Minuten gemittelt. Der Drucksensor P2 besitzt einen Messbereich von 0/250 mbar und befindet sich hinter dem Druckreduzierer, zu sehen in Abbildung B.1. Dadurch lässt sich der niedrige gemessene Druck erklären.



Abbildung B.17: Zu sehen sind die ersten drei Stunden des Druckverlaufs an Drucksensor P3 bei der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 3 Minuten gemittelt. Der Drucksensor P3 befindet sich wie P2 hinter dem Druckreduzierer (siehe Abbildung B.1), wobei er einen Messbereich von -10/+10 mbar besitzt. Daher ist der maximale Druck von 10mbar zu sehen. Der Verlauf deckt sich mit dem Verlauf des Sensors

P4, da diese direkt hintereinander aufgebaut sind, zu sehen in Abbildung B.1.



Abbildung B.18: Zu sehen sind die ersten drei Stunden des Druckverlaufs an Drucksensor P4 bei der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 3 Minuten gemittelt. Der Drucksensor P4 befindet sich direkt hinter dem Drucksensor P3, zu sehen in Abbildung B.1, und besitzt den gleichen Messbereich von -10/+10 mbar, was die Übereinstimmung der Kurven erklärt.



Abbildung B.19: Zu sehen sind die ersten drei Stunden des Druckverlaufs an Drucksensor P5 bei der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 3 Minuten gemittelt. Der Drucksensor P5 befindet sich direkt vor der Pumpe, zu sehen in Abbildung B.1, die allerdings während der Messung nicht aktiv ist. Der Sensor besitzt einen Messbereich von -50/+50 mbar.



Abbildung B.20: Zu sehen sind die ersten drei Stunden des Druckverlaufs an Drucksensor
P6 bei der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 3
Minuten gemittelt. Der Drucksensor P6 befindet an dem großen Puffer Volumen 2, zu sehen in Abbildung B.1. Der Sensor besitzt einen Messbereich von 0/4000 mbar.



Abbildung B.21: Zu sehen ist der ganze Druckverlauf an Drucksensor P7 bei der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 30 Minuten zu einem Wert gemittelt. Bei diesem Drucksensor wird das Gas in das System eingefügt, weshalb der Sensor den Druck der Gasflasche hinter dem Druckreduzierer misst, zu sehen in Abbildung B.1. Er besitzt einen Messbereich von 0/10000 mbar.



Abbildung B.22: Zu sehen ist der ganze Druckverlauf an Drucksensor P8 bei der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 30 Minuten zu einem Wert gemittelt. Der Wert dieses Drucksensors liegt während der ganzen Messung bei Null. Hier wird während der Messung kein Gas entlang geführt. Er besitzt einen Messbereich von 0/10000 mbar.

### **B.3.2 Gasanalysestation**

### Gasssensoren



Abbildung B.23: Zu sehen ist der Verlauf der  $CO_2$ -Konzentration, während der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 30 Minuten zu einem Wert gemittelt. Über den Verlauf der Konzentration können hier keine qualitativen Aussagen getroffen werden, da der  $CO_2$ -Sensor oft Fehler aufweist [15], die hier nicht gelöst werden können.



Abbildung B.24: Zu sehen ist der Verlauf der H<sub>2</sub>O-Konzentration, während der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 30 Minuten zu einem Wert gemittelt. Über den Verlauf der Konzentration können hier keine qualitativen Aussagen getroffen werden,

### Umweltsensorik



Abbildung B.25: Zu sehen ist der Verlauf der Luftfeuchtigkeit, während der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 30 Minuten zu einem Wert gemittelt.



Abbildung B.26: Zu sehen ist der Verlauf der Außentemperatur, während der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 30 Minuten zu einem Wert gemittelt.



Abbildung B.27: Zu sehen ist der Verlauf des Luftdrucks, während der ersten Testmessung mit dem Gassystem. Es werden jeweils die Daten von 30 Minuten zu einem Wert gemittelt.

# Literatur

- GSI. Die Beschleunigeranlage. https://www.gsi.de/forschungbeschleuniger/ fair/die\_maschine. (Besucht am 28.06.2023).
- [2] Norbert Herrmann. CBM report. 41th CBM Collaboration Meeting, TUD, Darmstadt.6. März 2023.
- [3] C. Blume, C. Bergmann und D. Emschermann. "Technical Design Report for the CBM". In: (Okt. 2018).
- [4] Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR. https://www.cbm.gsi.de/ detectors. (Besucht am 10.07.2023).
- [5] J. Schnapka. Doppelspurerkennung unter Verwendung der Kathodenauslese am ZEUS-Übergangsstrahlungsdetektor. 1998.
- [6] A. Andronic und J.P. Wessels. "Transition radiation detectors". In: (Feb. 2012).
- [7] Cyrano S.H. Bergmann. "Development, Simulation and Test of Transition Radiation Detector Prototypes for the Compressed Baryonic Matter Experiment at the Facility for Antiproton and Ion Research". Diss. WWU Münster, 2014.
- [8] Wolfgang Nolting. Grundkurs Theoretische Physik 3. Springer, 2013.
- [9] Wolfgang Demtröder. Experimentalphysik 2. Springer, 2017.
- [10] MARK G. LAWRENCE. The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air. 22. Juli 2004.
- [11] Paul A. Tipler und Gene Mosca. Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. Springer.
- [12] Alduchov, A. Oleg and Eskridge, Robert E. Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure.
- [13] File:ArduinoUno.svg. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ArduinoUno.
   svg. (Besucht am 03.08.2023).
- [14] analogRead(). https://www.arduino.cc/reference/de/language/functions/ analog-io/analogread/. (Besucht am 21.08.2023).
- [15] Philipp Kähler und Chilo Garabatos Cuadrado: Private Kommunikation. 12. Sep. 2023.
- [16] CAI. Model 600-NDIR USERS MANUAL.
- [17] Hach. ORBISPHERE Model 31xxx Electrochemical Sensors INSTALLATION and MAIN-TENANCE MANUAL. Mai 2009.

- [18] Orbisphere 510 O2 Controller, Panelmontage, 10-30 VDC, 0/4-20 mA, Drucksensor. https://de.hach.com/orbisphere-510-o-sub-2-sub-controller-panelmontage-10-30-vdc-0-4-20-ma-drucksensor/product?id=23637609653. (Besucht am 21.08.2023).
- [19] GE PANAMETRICS MOISTURE MONITOR SERIES 35, MMS35-331-1-100 FREE SHIP. https://www.ebay.com/itm/GE-PANAMETRICS-MOISTURE-MONITOR-SERIES-35-MMS35-331-1-100-FREE-SHIP-/281945436656. (Besucht am 21.08.2023).
- [20] General Electrics. Moisture Monitor Series 35 Single-Channel Hygrometer. Okt. 2021.
- [21] SYSTECH Illinois. ALUMINIUM OXIDE (Al2O3) MOISTURE SENSOR. Juni 2016.
- [22] Aalborg. OPERATING MANUAL GFM MASS FLOW METERS. Sep. 2004.
- [23] GFM Massendurchflussmesser. URL: https://www.aalborginstruments.de/gfmmassendurchflussmesser\_o/20 (besucht am 14.08.2023).
- [24] red-y. Handbuch red-y smart series. 2007.
- [25] Mankar, Jayant and Chaitali, Darode and Komal and Trivedi, Madhura, Konoje and Prachi, Shahare. *REVIEW OF 12C PROTOCOL*.
- [26] SILICON LABS. Si70XX HUMIDITY AND TEMPERATURE SENSOR DESIGNER 'S GUIDE. 2016.
- [27] Lady Ada. Adafruit Si7021 Temperature + Humidity Sensor. 1. Dez. 2022.
- [28] Bosch. BMP390 High-performance barometric pressure sensor.
- [29] Kattni Rembor. Adafruit BMP388 and BMP390 Precision Barometric Pressure and Altimeter. 9. Mai 2023.
- [30] Vögtlin Instruments. Red-y Smart Mass Meter Controller. URL: https://www. icenta.co.uk/red-y-smart-mass-meter.html (besucht am 20.09.2023).
- [31] Felix Fidorra: Private Kommunikation.
- [32] Ruben Weber. Gas Tightness Measurements for CBM-TRD Modules. 2022.
- [33] Daniel Bonaventura: Private Kommunikation.
- [34] KNF.  $N96_DC B MOriginalBetriebs undMontageanleitung.$  Feb. 2021.
- [35] Hr. Spielmann (Wika): Private Kommunikation.
- [36] Wika. Druckmessumformer Für allgemeine industrielle Anwendungen Typ A-10. Mai 2023.
- [37] Glossar. https://www.first-sensor.com/de/glossar/index.html. (Besucht am 18.09.2023).
- [38] FirstSensor. SQ223-18093 / 3005302.
- [39] Luisa Faber. Entwicklung und Inbetriebnahme eines Gassystems zu Untersuchung einer CBM-TRD Kammer unter Gasfluss. 2021.

- [40] The SciPy community. Orthogonal distance regression. URL: https://docs.scipy. org/doc/scipy/reference/odr.html (besucht am 20.11.2021).
- [41] Arcol. MRA Precison Metal Film Resistors. 5. Sep. 2011.
- [42] Joint Committee for Guides in Metrology. Guide to the expression of uncertainty in measurement Part 6: Developing and using measurement models. 2020. URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM\_GUM\_6\_2020.pdf/d4e77d99-3870-0908-ff37-c1b6a230a337 (besucht am 06.09.2023).
- [43] Hartmut Schiefer und Felix Schiefer. *Statistik für Ingenieure*. Springer, 2018.
- [44] SILICON LABS. *I*<sup>2</sup>*C* HUMIDITY AND TEMPERATURE SENSOR. 2016.