

Aufbau und Test einer vollautomatischen Luftsammelanlage

Bachelorarbeit

Friderike Göring

Universität Hamburg

Carl Friedrich von Weizsäcker-Zentrum für Naturwissenschaft
und Friedensforschung (ZNF)

1. Dezember 2014

Gutachter

Prof. Dr. Gerald Kirchner
Carl Friedrich von Weizsäcker-Zentrum
für Naturwissenschaft und Friedensforschung
Universität Hamburg

Dr. Markus Kohler
Carl Friedrich von Weizsäcker-Zentrum
für Naturwissenschaft und Friedensforschung
Universität Hamburg

Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben.

Mit einer Veröffentlichung dieser Arbeit erkläre ich mich einverstanden.

Friderike Göring
1. Dezember 2014

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit war, eine mobile, vollautomatische Luftsammelanlage zu konzipieren, zu bauen und zu charakterisieren. Diese soll innerhalb einer Woche 56 dreistündige Luftproben in der Größe von 1 bis 2 Litern sammeln. Aus den Luftproben soll anschließend das Krypton extrahiert werden und daraus mit Hilfe des Hamburger ATTA („Atom Trap Trace Analysis“)-Aufbaus die ^{85}Kr -Konzentration bestimmt werden.

Um die Luftproben zu sammeln, wurde ein Verfahren gewählt, bei dem über einen Unterdruck ein Volumenfluss erzeugt und dieser über eine Flussbegrenzung reduziert wird. Der reduzierte, konstante Volumenfluss soll über drei Stunden eine Luftprobe in der gewünschten Größe erzeugen. Für die Flussbegrenzung wurde eine Kapillare ausgewählt. Es wurde überprüft, ob das Gesetz der Hagen-Poiseuille-Strömung für Kapillaren anwendbar ist. Zudem wurde der Zusammenhang zwischen Kapillarlänge und -durchmesser, erzeugtem Unterdruck und dem resultierenden Volumenfluss untersucht.

Für die Luftsammelanlage wurde ein Anforderungsprofil erarbeitet. Auf dessen Grundlage wurden das Sammelsystem, welches aus einer Pumpe und einer Kapillare besteht, das Verteilungssystem, welches aus einer Ventilinsel und Luftsammelbehältern besteht, und das Steuerungs- und Kontrollsystem konzipiert, konfiguriert und getestet.

Abstract

In this bachelor thesis a transportable, automatic air collecting system was designed, built and tested. The collecting station is laid out to take 56 three-hour aerial samples over one week. Every sample should have a size between 1 and 2 litres. Afterwards the Krypton should be extracted from the samples and the concentration of ^{85}Kr should be analysed by the ATTA („Atom Trap Trace Analysis“-construction).

The following process was selected for collecting the samples: A volume flow was caused by a negative pressure and was reduced through a limitation of flow. The reduced volume flow should create an aerial sample in the wished size over three hours. For the limitation of flow a capillary was chosen. It was tested whether the law of Hagen-Poiseuille is applicable to capillaries.

A product profile was developed for the air collecting station. On that foundation the collecting system, composed of a pump and a capillary, the distribution system, composed of a valve island and collection bins, and the control- and regulatory system was designed and tested.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Aufbau der Luftsammelanlage	6
2.1	Prinzipien	6
2.2	Grundaufbau der Luftsammelanlage	7
2.3	Detaillierter Aufbau der Luftsammelanlage	8
3	Theoretische Grundlagen	10
3.1	Strömung des Gases	10
3.2	Laminare Rohrströmung (Hagen-Poiseuille-Strömung)	12
3.3	Einlaufstrecke (laminare Strömung)	14
4	Charakterisierung der Pumpe	16
4.1	Experimentelle Bestimmung der Druckdifferenz der Pumpe	16
4.2	Langzeitverhalten der Pumpe	18
5	Auswahl der Kapillare	24
5.1	Theoretische Längenbestimmung	24
5.2	Überprüfung der Gesetzmäßigkeit	25
5.3	Flussbestimmung durch Metallkapillare	30
6	Das Sammelsystem	33
6.1	Die Luftsammelbehälter	33
6.1.1	Auswahl der Beutel	33
6.1.2	QMS - Quadrupolmassenspektrometer	34
6.1.3	Gasdiffusion durch die Außenhülle der Beutel	36
6.2	Die Ventilinsel	38
6.3	Totvolumen	39

7	Weitere Komponenten	42
7.1	Weitere Bauteile und Fehlerabschätzung	42
7.2	Spannungsversorgung	46
7.3	Aufbau der Transportbox	49
7.4	Steuerung	50
8	Test des Gesamt-Systems	52
8.1	Gleichmäßiger Fluss in den Beutel	52
8.2	Test der Gesamtanlage	55
9	Zusammenfassung und Ausblick	64
A	Tabellen	68
B	Abbildungen	70
	Literaturverzeichnis	81

Kapitel 1

Einleitung

In der vorliegenden Arbeit wird eine mobile, vollautomatische Luftsammelanlage konzipiert, aufgebaut und charakterisiert. Diese soll im Rahmen der Forschung des Carl Friedrich von Weizsäcker-Zentrums für Naturwissenschaft und Friedensforschung (ZNF) in Hamburg dazu verwendet werden, kontinuierlich Luftproben zu nehmen, aus denen anschließend die Konzentration von radioaktivem ^{85}Kr ermittelt werden soll.

Die ATTA („Atom Trap Trace Analysis“)-Gruppe des ZNF erforscht die Möglichkeit, ^{85}Kr als Tracer für die Verifizierung der Einhaltung des Nichtverbreitungsvertrages (NVV) einzusetzen. Der NVV ist ein internationaler Vertrag über die Abrüstung und Nichtverbreitung von Kernwaffen und wird über die Internationale Atomenergieorganisation (IAEO) verifiziert. Um die Einhaltung des NVVs zu überwachen, kann die IAEO mit den Vertragsstaaten vereinbarte Sicherheitsmaßnahmen durchführen. Da bei den daraus resultierenden Kontrollen nur Anlagen kontrolliert werden dürfen, die als kerntechnische Anlagen ausgewiesen sind, ist es von großer Bedeutung, Indikatoren für geheime Wiederaufbereitungsanlagen, in denen atomwaffenfähiges Plutonium gewonnen wird, zu besitzen. ^{85}Kr könnte als Indikator für geheime Wiederaufbereitungsanlagen verwendet werden, weil ^{85}Kr als Spaltprodukt bei der Erbrütung von Plutonium entsteht und bei der Wiederaufbereitung in die Luft frei gesetzt wird. Durch seine relativ lange Halbwertszeit von 10,76 Jahren und seiner Eigenschaft als Edelgas ist es schwierig, dieses Spaltprodukt zurückzuhalten. Seine relativ lange Halbwertszeit hat zur Folge, dass ^{85}Kr auch in Brennstäben noch enthalten ist, die lange gelagert wurden. Seine Eigenschaft als Edelgas führt dazu, dass ^{85}Kr nicht ausgewaschen werden kann und nicht chemisch reagiert. Aus diesem Grund sind die bisher angewandten Filterkreisläufe technisch sehr aufwendig und fehleranfällig. Seine Eigenschaft als Edelgas führt zusätzlich dazu, dass ^{85}Kr mit der Abluftfahne der Wiederaufbereitungsanlage weiter transportiert wird.

Damit ^{85}Kr für die Kontrollen genutzt werden kann, ist es erforderlich, Luftproben in so kurzen Zyklen zu sammeln und zu analysieren, dass die Befunde bei wechselnden Luftströmen den Verursachern zugerechnet werden können. Gegenwärtig kommt ^{85}Kr als Tracer nur bedingt zum Einsatz, weil es bisher keine ausreichende Messkapazität gibt, um die Kryptonkonzentration aus vielen und gleichzeitig kleinen Luftproben zu bestimmen. Das etablierte ATTA-Experiment des Argonne National Laboratory (ANL) zur Feststellung der ^{85}Kr Konzentration braucht beispielsweise sehr lange, weil nach jeder Messung die

Vakuumkammer 36 Stunden lang gereinigt werden muss, um „cross contamination“, (Verfälschen der laufenden Messung durch Krypton aus der vorausgegangenen Messung), zu verhindern. Zusätzlich werden dort bevorzugt Probengrößen von mehr als 10 Litern Luft zur Analyse verwendet, um den Fehler durch dieses ausgasende Krypton gering zu halten [Lu and Mueller (2010)].

Bei einem anderen gängigen Verfahren, dem Low Level Counting (LLC), wird die ^{85}Kr Konzentration über die β -Strahlung bei dem radioaktiven Zerfall des ^{85}Kr ermittelt. Dieses Verfahren wird beispielsweise vom Bundesamt für Strahlenschutz in Freiburg angewendet. Um eine hohe Aktivitätskonzentration zu erreichen, werden dabei über eine Woche $> 10 \text{ m}^3$ Luft durch Aktivkohle, die als Adsorber fungiert, gepumpt. Anschließend werden das adsorbierte Krypton und Xenon aus dem Adsorber ausgeheizt. Das dabei entstehende Gas wird in zwei Minicans mit einem Volumen von jeweils einem Liter aufgefangen. Aus diesem Gasgemisch werden in Freiburg ungefähr 7 bis 8 ml Krypton gewonnen¹. In einem Proportionalzählrohr werden dann die radioaktiven Zerfälle der ^{85}Kr Atome detektiert und daraus die ^{85}Kr Konzentration bestimmt. Da das Krypton über eine ganze Woche gesammelt wurde, flachen die gemessenen Krypton-Peaks ab, weil man einen gemittelten Wert von ^{85}Kr über den gesamten Sammelzeitraum erhält. Außerdem können in dem Zeitraum einer Woche mehrere Abluftfahnen über die Sammelstation hinweg ziehen, damit wird eine Rückrechnung des Ursprungsortes nahezu unmöglich. [Peters (2008)]

Die ATTA-Gruppe aus Hamburg hat einen Aufbau entwickelt, bei dem in einer 2D-MOT („magneto-optical trap“) auf rein optische Weise ein Atomstrahl mit metastabilen ^{81}Kr und ^{85}Kr Atomen erzeugt wird. Dieser wird dann in eine 3D-MOT geführt, in der über Laser der Wellenlänge 811 nm abwechselnd mit einer Frequenz von einigen kHz ^{81}Kr - und ^{85}Kr -Atome gekühlt, gefangen und detektiert werden. Die ^{85}Kr -Konzentration wird über das Verhältnis von ^{85}Kr zu ^{81}Kr errechnet, da die relative Häufigkeit von $^{85}\text{Kr}/\text{Kr}$ nur $(5,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-13}$ beträgt. Über das Verhältnis von ^{85}Kr zu ^{81}Kr kann darüber eine Aussage getroffen werden, da die ^{81}Kr Konzentration auf der Erde nahezu konstant bleibt. Der Grund dafür ist, dass das ^{81}Kr Isotop über Höhenstrahlung entsteht (also durch keine menschengemachten Prozesse) und eine sehr lange Halbwertszeit von 230.000 Jahren hat. Der Aufbau der ATTA-Gruppe in Hamburg erlaubt zum einen die Analyse von kleinen Kryptonproben der Größe 1-2 μl , das entspricht einer Luftprobe von 1-2 Litern, und zum anderen macht er es möglich, eine große Anzahl an Proben zu verarbeiten, weil mit einer Messzeit zwischen drei und sechs Stunden pro Probe gerechnet wird. [Kohler (2011); Daerr (2011)]

Aus den Luftproben, die mit der in dieser Arbeit entwickelten Luftsammelanlage genommen werden, soll mit Hilfe des Aufbaus der ATTA-Gruppe in Hamburg die ^{85}Kr Konzentration ermittelt werden. Die Luftsammelanlage soll in einem Zeitraum von einer Woche 56 dreistündige Luftproben in der Größe von 1-2 Litern nehmen. Die dreistündigen Intervalle orientieren sich an der Auflösung der Wetterdaten für das ATM-Modell, welche ebenfalls dreistündig ist. Die Probengröße ergibt sich aus den Anforderungen des Aufbaus der Hamburger ATTA-Gruppe. Damit die Proben von dem ATTA-Aufbau analy-

¹ Auskunft des Bundesamtes für Strahlenschutz, Freiburg

siert werden können, muss das Krypton aus ihnen separiert werden. Im Zuge einer laufenden Promotionsarbeit entsteht eine Anlage, die das Krypton chromatographisch aus den Luftproben extrahieren soll (vgl. [Hebel (2013)]).

Die durch die Analyse der Luftproben erhaltenen Ergebnisse können durch die kurzen Sammelperioden viel genauer Windtrajektorien zugeordnet werden. Indem man diese zurückrechnet, kann der Herkunftsort und damit der Verursacher präziser bestimmt werden. Ein weiterer Vorteil bei diesem Konzept einer Sammelanlage ist, dass die Krypton-Peaks deutlicher auftreten. Dadurch ist es beispielsweise möglich, die zeitliche Struktur einer Abluftfahne genauer zu analysieren.

In Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde eine Luftsammelanlage entwickelt, aufgebaut und charakterisiert, die nach den Anforderungen der Hamburger ATTA-Gruppe Luftproben nehmen soll. Zunächst wurden unterschiedliche Prinzipien für Luftsammelanlagen auf ihre Anwendbarkeit geprüft. Aus diesen wurde methodisch begründet ein Verfahren ausgewählt, bei dem durch einen Unterdruck ein Volumenfluss erzeugt und durch eine Kapillare verringert wird (vgl. Kapitel 2). Anschließend wurden die physikalischen Grundlagen für das ausgewählte Verfahren hergeleitet und das Gesetz der Hagen-Poiseuille-Strömung auf die Nutzbarkeit überprüft (vgl. Kapitel 3). Für die einzelnen Komponenten wurden Anforderungsprofile entwickelt. Auf diesen Grundlagen wurden das Sammelsystem, das aus einer Pumpe (vgl. Kapitel 4) und einer Kapillare (vgl. Kapitel 5) besteht, das Verteilungssystem, welches aus einer Ventilinsel (vgl. Kapitel 6.2) und Luftsammelbehältern (vgl. Kapitel 6.1) besteht, und das Steuerungs- und Kontrollsystem (vgl. Kapitel 7) ausgewählt. Am Schluss wurde die gesamte Anlage auf ihre Funktionalität überprüft (vgl. Kapitel 8).

Kapitel 2

Aufbau der Luftsammelanlage

In diesem Kapitel soll untersucht werden, welcher Aufbau der Luftsammelanlage sinnvoll ist, um kleine Luftproben durch einen konstanten, geringen Volumenfluss zu erhalten. Der Schwerpunkt liegt auf den verschiedenen Sammelprinzipien, mit denen es möglich wäre, in drei Stunden ein Volumen von 1 bis 1,5 Litern zu sammeln.

2.1 Prinzipien

Für die Probeentnahme können grundsätzlich verschiedene Sammelprinzipien angewendet werden. So könnte beispielsweise

- eine Pumpe verwendet werden, die einen Volumenfluss von $333 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ - $500 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ erzeugen kann, oder
- es könnte ein Volumenfluss durch einen Unterdrucks erzeugt werden, der durch eine Flussbegrenzung auf das benötigte Maß verringert wird.

Einer Pumpe, die konstant einen sehr geringen Fluss erzeugen kann, ist in der Anschaffung teuer ($\sim 1000 \text{ €}$ ¹). Alternativ einen Volumenfluss zu erzeugen, der durch eine Flussbegrenzung verringert wird, kann mit günstigeren Bauteilen bewerkstelligt werden.

Der Unterdruck könnte beispielsweise mit einem vakuumierten Metallbehälter (vgl. [Rossner et al. (2002)]) oder durch eine preisgünstige Pumpe (z.B. von Schego eine Aquariumpumpe für $31,31 \text{ €}$ ²) erzeugt werden. Gegen die erstgenannte Variante spricht, dass zur Vorbereitung der Probenentnahme die Behälter vakuumieren werden müssten. Dies ist unvorteilhaft, da zum einen ein gewisser Zeitaufwand mit der Vakuumierung verbunden ist und es zum anderen fast unmöglich ist, diese Arbeit während einer Feldstudie draußen und nicht im Labor durchzuführen. Dazu kommt, dass der Volumenfluss mit der Zeit abnehmen würde, abhängig davon, wie weit der Metallbehälter gefüllt ist. Dies liegt daran,

¹Xavitech AB.; Härnösand; Schweden: V200-GAS-5V (Pumpe): 405 €, Flowcalibrationunit: 395 € (Stand: 14.12.2012)

²Schego; Offenbach am Main; Deutschland: Modell: Basis-Modell SG O electronic (83 ...), vgl. [Schego (2014)]

dass der Unterdruck in dem Metallbehälter abnimmt umso voller der Behälter wird. Aus einem kleineren Unterdruck ergibt sich ein ebenfalls kleinerer Volumenfluss. Dem gegenüber hat die Verwendung einer Pumpe den Vorteil, dass einfache Sammelbeutel verwendet werden können, die vor der Probenentnahme nicht erst vakuumiert werden müssen, sondern einfach leer gepumpt werden können. Außerdem kann der Unterdruck, der durch die Pumpe erzeugt wird, als nahezu konstant eingeschätzt werden.

Zur Flussbegrenzung bietet sich eine Kapillare an, weil diese direkt im Labor auf die gewünschte Länge zugeschnitten werden kann. Außerdem gibt es Kapillaren mit vielen unterschiedlichen Innendurchmessern und Gesetze, die den Zusammenhang zwischen der Druckdifferenz, dem Innendurchmesser und der Länge der Kapillare und dem Volumenfluss vorhersagen (siehe Kapitel 3.2, 5.1 und 5.2). Die Kapillare soll den Fluss so begrenzen, dass nach drei Stunden zwischen 1 und 1,5 Litern Luft gesammelt werden. Nach Einschätzung der Hamburger ATTA-Gruppe ist dieses Volumen für ihr Untersuchungsverfahren ausreichend.

2.2 Grundaufbau der Luftsammelanlage

Aufgrund der Überlegungen in Kapitel 2.1 ist folgender Aufbau der Luftsammelanlage vorgesehen. Eine Pumpe soll an einer Kapillare saugen, die den Volumenfluss so verringert, dass nur $333 \frac{\text{ml}}{\text{h}} - 500 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ Luft unter Standardbedingungen ($T = 20 \text{ °C} = 298,15 \text{ K}$; $p = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) in einen Beutel gelangen, der am Ausgang der Pumpe befestigt ist. Da die Luftsammelanlage auch in Feldstudien verwendet werden soll, ergeben sich weitere Anforderungen. Die Luftsammelanlage soll automatisiert und autonom betrieben werden können, damit sie über einen Zeitraum von einer Woche ohne Beaufsichtigung arbeiten kann. Hinzu kommt, dass die Anlage transportabel sein muss. Dies bedeutet zum einen, dass der gesamte Aufbau in einen transportablen Behälter passen muss, und zum anderen, dass das Gesamtgewicht der Luftsammelanlage nur so groß sein darf, dass sie von einer Person noch problemlos bewegt werden kann.

2.3 Detaillierter Aufbau der Luftsammelanlage

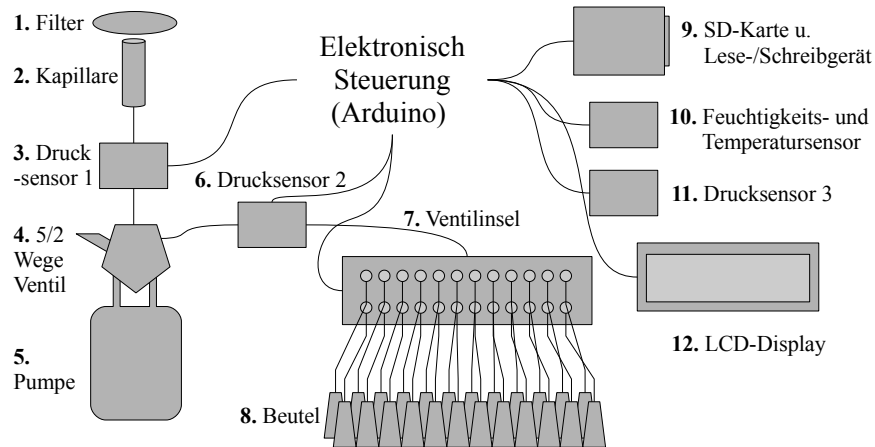


Abbildung 2.1: Skizzen-artiger Aufbau der Luftsammelanlage mit den einzelnen Bauelementen

Zum besseren Verständnis des Gesamtaufbaus der Anlage wird im folgenden eine Skizze der geplanten Anlage vorgestellt. Die einzelnen Komponenten werden im Verlauf der Arbeit genauer erläutert.

Der Aufbau der Luftsammelanlage wurde wie folgt umgesetzt:

1. Filter, um Kapillare/System vor Verschmutzungen zu schützen (vgl. Kapitel 7.3);
2. Kapillare zur Flussverringern auf $333 \frac{\text{ml}}{\text{h}} - 500 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ Luft unter Standardbedingungen ($T = 20 \text{ °C} = 298,15 \text{ K}$; $p = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) (vgl. Kapitel 5);
3. Drucksensor 1 zur Messung der Druckdifferenz, die die Pumpe erzeugt (Daten werden über Arduino auf SD-Karte gespeichert) (vgl. Kapitel 4.2 und 7.1);
4. 5/2 Wege Ventil, damit Beutel gefüllt und geleert werden können, ohne dass die Anschlüsse der Pumpe vertauscht werden müssen (vgl. Kapitel 4);
5. Pumpe:
 - saugt an der Kapillare und schiebt Luft in die Beutel;
 - pumpt die Beutel vor jeder neuen Messreihe leer;
6. Drucksensor 2 zur Kontrolle des Drucks in dem Beutel, der befüllt wird (Daten werden ebenfalls über Arduino auf SD-Karte gespeichert) (vgl. Kapitel 7.1);
7. Pneumatische Ventilinsel, um Ventile, die zu einzelnen Beuteln führen, zu öffnen und zu schließen (wird über Arduino angesteuert) (vgl. Kapitel 6.4 und 6.5);

8. Sammelbeutel, in die über je drei Stunden Luft gepumpt wird (vgl. Kapitel 5.1 und 5.2);
9. SD-Karte:
 - wird über Arduino angesteuert;
 - Kontrolldaten werden auf ihr abgespeichert (vgl. Kapitel 7.1);
10. Feuchtigkeits- und Temperatursensor dokumentiert Temperatur- und Feuchtigkeitschwankungen über die Messdauer für die Auswertung (Daten werden über Arduino auf SD-Karte gespeichert) (vgl. Kapitel 7.1 und 8.2);
11. Drucksensor 3 zur Messung des Außendrucks (vgl. Kapitel 7.1 und 8.2);
12. LCD-Display zeigt an:
 - ob Sammelvorgang noch läuft;
 - ob Fehler aufgetreten sind;
 - welches Ventil wie lange geöffnet ist;
 - welche Temperatur, Luftfeuchtigkeit und welcher Außendruck gemessen wird (vgl. Kapitel 7.1).

Die elektronische Steuerung wird von einem Arduino Mega, einem Mikrocontrollerboard, übernommen (vgl. Kapitel 7.1).

Kapitel 3

Theoretische Grundlagen

Es gibt verschiedene Strömungsarten, wie Gas durch ein Rohr (Kapillare) strömt. Um einschätzen zu können, welche Gesetzmäßigkeiten für den Fluss durch die Kapillare, die in der Luftsammelanlage verwendet werden soll, gelten, sollen an dieser Stelle die theoretischen Grundlagen für die Strömung durch eine Kapillare vorgestellt werden.

Die folgenden Unterkapitel wurden auf Grundlage von [Zierrep and Bühler (2013); Wutz (2006)] erarbeitet.

3.1 Strömung des Gases

Die Strömungen von Gasen innerhalb von Rohren hängen von der thermischen Bewegung der Gasteilchen, dem Druck, der Trägheit der Gasteilchen und den Reibungskräften ab. Die Knudsenzahl Kn beschreibt das Verhältnis zwischen Druck und Innendurchmesser des Rohrs.

$$Kn = \frac{\pi \cdot \bar{c} \cdot \eta}{4 \cdot p \cdot d} \quad (3.1)$$

mit $\bar{c}$ = mittlere Teilchengeschwindigkeit, η = dynamische Viskosität, p = Druck und d = Durchmesser des Rohrs.

Die Knudsenzahl ist auch über die freie mittlere Weglänge definiert: $Kn = \frac{\bar{l}}{d}$. Bei einem geringen Druck ergibt sich eine große mittlere freie Weglänge $\bar{l}$. In diesem Fall stoßen die Gasteilchen hauptsächlich mit der Rohrwand und durchqueren das Rohr in einem Zickzackmuster (siehe Abbildung 3.1, a.)). Bei einer Knudsenzahl $Kn > 0,5$ spricht man von einer molekularen Strömung.

Bei einem genügend großen absoluten Druck verringert sich die mittlere freie Weglänge soweit, dass sie sehr viel kleiner als der Innendurchmesser des Rohrs ist. In diesem Fall stoßen die Gasteilchen sehr häufig miteinander und tauschen Impuls und Energie aus. Bei einer Knudsenzahl $Kn < 0,01$ spricht man von einer viskosen Strömung (siehe Abbildung 3.1, b.) - d.)).

Zur Beschreibung einer viskosen Strömung verwendet man das Schichtmodell, bei dem die Strömung eines Fluids durch die Bewegung einzelner Schichten dargestellt wird. Die Teilchen in einer Schicht haben alle die gleiche Strömungsgeschwindigkeit, und zwei übereinander liegende Schichten übertragen Energie über Reibung. Die viskose Strömung kann in zwei verschiedene Arten unterteilt werden abhängig davon, wie groß die Strömungsgeschwindigkeit ist.

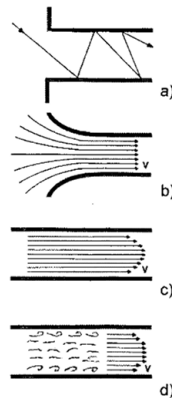


Abbildung 3.1: Verschiedene Formen der Gasströmung. Oben molekulare Strömung (a). Darunter von oben nach unten verschiedene Formen der viskosen Strömung: gasdynamisch (Einlaufströmung) (b), laminar (c) und turbulent (d); Abbildung aus [Wutz (2006), S. 67].

Wenn ein Gas durch ein Rohr strömt, wirken Reibungskräfte zwischen der Leiterwand und den äußeren Schichten des Gases. Diese Reibung führt zur Abbremsung der äußeren Schichten. Die Dicke der abgebremsten Schicht wächst, umso weiter sich das Gas im Leiter befindet.

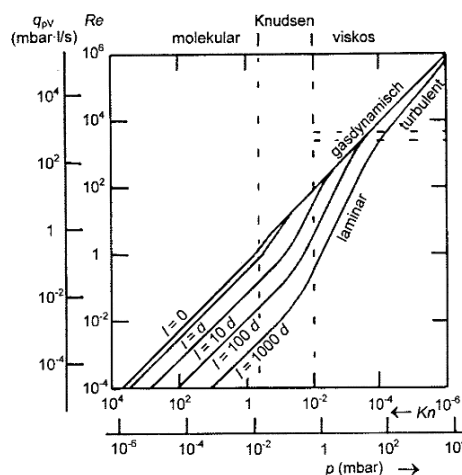


Abbildung 3.2: Strömungsformen am Beispiel von Kreisrohren des Durchmessers $d = 1$ cm und unterschiedlichen Längen l wie angegeben. Als Gas wurde Luft bei 20°C angenommen; Abbildung aus [Wutz (2006), S. 66].

Bis zu einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit bewegen sich noch alle Gasteilchen in die Fließrichtung und die Strömung erfolgt in parallelen Schichten (siehe Abbildung 3.1, c.) laminare Strömung).

Bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten entstehen Wirbel, da die Reibungskraft zwischen den Schichten, die geschwindigkeitsabhängig ist, im Gegensatz zu der richtungsbehaltenden Trägheit der Teilchen in der jeweiligen Schicht mit der Erhöhung der Fließgeschwindigkeit zunimmt. Ein strömendes Volumenelement wird dabei durch die Reibung an einem abgebremsten Volumenelement in Richtung Rohrwand abgelenkt (siehe Abbildung 3.1, d. turbulente Strömung).

Die Reynoldszahl gibt das Verhältnis zwischen der Reibungskraft und der Trägheitskraft an. Mit ihrer Hilfe unterscheidet man zwischen den beiden Strömungsarten.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} \quad (3.2)$$

mit ρ = Dichte des strömenden Gases, v = Strömungsgeschwindigkeit des Gases, d = Innendurchmesser des Rohres und η = dynamische Viskosität.

Bei einer Reynoldszahl $Re < 2300$ handelt es sich um eine laminare Strömung. Bei einer Reynoldszahl $Re > 4000$ spricht man von einer turbulenten Strömung.

[Zierep and Bühler (2013); Wutz (2006)]

3.2 Laminare Rohrströmung (Hagen-Poiseuille-Strömung)

Aus dem geringen Volumenfluss, der für die Luftsammelanlage gefordert wurde, ergibt sich eine geringe Strömungsgeschwindigkeit. Eine geringe Strömungsgeschwindigkeit führt zu einer laminaren Strömung. Aus diesem Grund wird das laminare Strömungsverhalten in einem Rohr bzw. einer Kapillare in dieser Arbeit betrachtet.

Bei der Behandlung der Rohrströmung soll angenommen werden, dass sich die Strömung bereits ausgebildet hat. Das heißt, dass sich das Geschwindigkeitsprofil in x-Richtung, d. h. entlang des Rohres, nicht mehr ändert. Dies ist der Fall, wenn das Strömungsverhalten in genügend großer Entfernung zum Eingang betrachtet wird. Dieser Abstand wird Einlaufstrecke $l_{Einlauf}$ genannt. In Kapitel 3.3 wird diese näher erläutert.

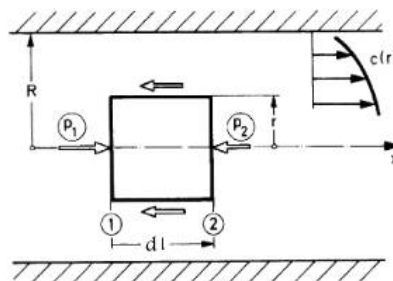


Abbildung 3.3: Anwendung des Impulssatzes auf die laminare Strömung in x-Richtung im Rohr; [Abbildung aus Zierep and Bühler (2013), S. 134].

Die Druckdifferenz zwischen dem Eingang und dem Ausgang des Rohres hält den Fluss aufrecht. Dabei strömt das Gas vom Ort mit höherem Druck zum Ort mit niedrigerem Druck. Den Volumenstrom $\dot{V}$ durch das Rohr berechnet man wie folgt:

Im Rohr herrscht laut dem Impulssatz ein Gleichgewicht zwischen der Kraft, die durch die Druckdifferenz verursacht wird, und der Reibungskraft, wie in Abbildung 3.3 zu sehen

$$\pi \cdot r^2 \cdot (p_1 - p_2) = |\tau| \cdot 2\pi \cdot r \cdot dl \quad (3.3)$$

mit p_1 = Druck am Anfang des Fluidelements, p_2 = Druck am Ende des Fluidelements, r = Radius des Rohres, $|\tau|$ = Schubspannung und dl = Länge des Fluidelements.

Umgestellt nach der Schubspannung $|\tau|$ ergibt sich:

$$|\tau| = \frac{r \cdot (p_1 - p_2)}{2 \cdot dl} \quad (3.4)$$

Setzt man nun

$$|\tau| = -\eta \cdot \frac{dc}{dr} \quad (3.5)$$

in Formel 3.4 ein, erhält man die Änderung der Geschwindigkeit abhängig davon, in welchem Radius r von der Rohrmitte sich ein Teilchen befindet

$$\frac{dc}{dr} = -\frac{r \cdot (p_1 - p_2)}{\eta \cdot 2 \cdot dl} = -\frac{r \cdot dp}{\eta \cdot 2 \cdot dl} \quad (3.6)$$

mit c = Geschwindigkeit und η = dynamische Viskosität.

Durch Integration über die Haftbedingungen (an der Leiterwand $r = R$ ist die Geschwindigkeit $c = 0$) erhält man den Geschwindigkeitsverlauf

$$c(r) = \int_r^R \frac{dc}{dr} dr = \frac{dp \cdot R^2}{\eta \cdot 4 \cdot dl} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (3.7)$$

mit $c_{max} = \frac{dp \cdot R^2}{\eta \cdot 4 \cdot dl}$ = Maximalgeschwindigkeit, welche in der Mitte des Rohres ($r = 0$) erreicht wird.

Durch Integration über die Fläche wird aus dem Geschwindigkeitsverlauf der Volumenstrom $\dot{V} = c(r) \cdot A$

$$\dot{V} = c(r) \cdot A = \int_A c(r) dA = \int_{r=0}^R c(r) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r dr = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{dp \cdot R^4}{\eta \cdot dl} = \frac{\pi}{128} \cdot \frac{dp \cdot d^4}{\eta \cdot dl} \quad (3.8)$$

Nach [Wutz (2006), S. 96] gilt die „[...] Formel [3.9] [...] unter der Annahme, dass sich das Volumen eines Fluidelements nicht ändert. Bei der Strömung von Gasen nimmt der Druck entlang der Leitung ab und dementsprechend nimmt das Volumen einer Gasmenge zu. Unter der Annahme, dass die Temperatur entlang des Weges durch Wärmeaustausch mit

der Rohrwand konstant bleibt, ist allerdings der pV-Durchfluss p_{pV} konstant. In diesem Fall kann Gleichung [3.8], die für ein kurzes Leitungsstück gilt, über die Länge l der Leitung von der Stelle 1 bis zur Stelle 2 integriert werden und man erhält für den pV-Durchfluss:“

$$q_{pV} = \frac{\pi}{256} \cdot \frac{d^4 \cdot (p_1^2 - p_2^2)}{\eta \cdot l} \quad (3.9)$$

Um den Volumenstrom am Ausgang zu erhalten, wird q_{pV} durch den Druck p_2 am Ausgang geteilt

$$\frac{q_{pV}}{p_2} = \frac{\pi}{256} \cdot \frac{d^4 \cdot (p_1^2 - p_2^2)}{\eta \cdot l \cdot p_2} \quad (3.10)$$

Diese Formel für den Volumenstrom am Ausgang wird in Kapitel 5.1 angewendet.

3.3 Einlaufstrecke (laminare Strömung)

In Abbildung 3.4 ist zu erkennen, wie ein Fluid in Ruhe (Position 0) durch ein Rohr angesaugt wird. In Position 2 hat sich eine Strömung ausgebildet, das heißt, dass sich das Geschwindigkeitsprofil in x-Richtung nicht mehr verändert. Zwischen Position 1 und 2 bildet sich die Strömung aus, indem sich die Grenzfläche, die durch Reibungskräfte zwischen der Rohrwand und dem Fluid entsteht, bis zur Mitte des Rohrs ausdehnt. Mit der Einlaufstrecke l_{Einlauf} ist die Strecke gemeint, die zwischen Position 1 und Position 2 liegt. Die Länge der Einlaufstrecke kann wie folgt über eine Näherung des Impuls- und Energiesatzes ermittelt werden:

$$l_{\text{Einlauf}} \approx 0,03 \cdot Re \cdot d \quad (3.11)$$

mit $Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} = \frac{v \cdot d}{\vartheta}$, d = Rohrdurchmesser und $\vartheta = \frac{\eta}{\rho}$ = kinematische Viskosität.

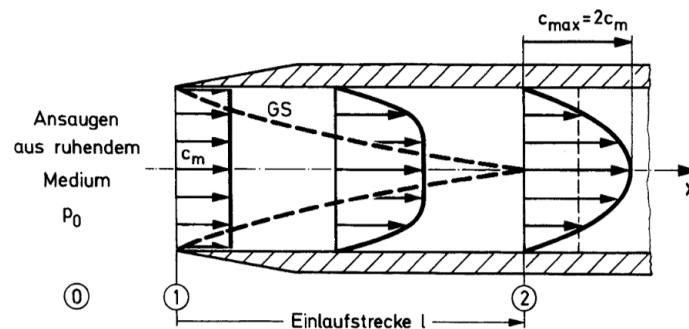


Abbildung 3.4: Strömung in der Einlaufstrecke eines Kreisrohrs, Abbildung aus [Zierep and Bühler (2013), S. 141]

Beim Einlauf ist die Fließgeschwindigkeit $c_m = v =$ konstant. Zwischen der Geschwindigkeit am Einlauf bzw. der Strömungsgeschwindigkeit des Gases $c_m = v$ und der maximalen Geschwindigkeit c_{max} im ausgebildeten Geschwindigkeitsprofil gilt der Zusammenhang: $2 \cdot c_m = 2 \cdot v = c_{max}$.

Der Druckabfall über die Einlaufstrecke $l_{Einlauf}$ kann über die Bernoulli-Gleichung berechnet werden:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 3 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c_m^2 \quad (3.12)$$

mit p_1 = Druck an Position 1, p_2 = Druck an Position 2 und $c_m = v$ = Geschwindigkeit am Einlauf = Strömungsgeschwindigkeit des Gases.

Der Reibungsdruckabfall für die **ausgebildete** Strömung über die gleiche Strecke $l = l_{Einlauf}$ kann über die Formel von c_{max} berechnet werden:

$$\Delta p = \frac{c_{max} \cdot l \cdot 4 \cdot \eta}{R^2} = \frac{2 \cdot c_m \cdot l \cdot 4 \cdot \rho \cdot \vartheta}{(\frac{1}{2} \cdot d)^2} = \frac{\rho}{2} \cdot c_m^2 \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{64}{\frac{c_m \cdot d}{\vartheta}} = \frac{\rho}{2} \cdot c_m^2 \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{64}{Re} \quad (3.13)$$

.

$$\Delta p = 0,03 \cdot 64 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c_m^2 = 1,92 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c_m^2 \quad (3.14)$$

mit $\eta = \rho \cdot \vartheta$ = dynamische Viskosität und ρ = Dichte des Fluids.

Der Druckabfall in der Einlaufstrecke $l_{Einlauf}$ ist damit um $1,08 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c_m$ größer als der über die gleiche Strecke für die ausgebildete Strömung. Dieses Ergebnis war aus zwei Gründen zu erwarten. Zum einen ist die Wandschubspannung in der Einlaufstrecke größer und zum anderen ist zur Abänderung des Geschwindigkeitsprofils von Position 1 zu Position 2 eine Druckdifferenz erforderlich. [Zierep and Bühler (2013)]

Kapitel 4

Charakterisierung der Pumpe

Die Pumpe für den Versuchsaufbau wurde nach den in Kapitel 2 erläuterten Kriterien ausgewählt. In der Formel zur Berechnung des Volumenstroms (3.10) ist die Druckdifferenz neben der Länge und dem Durchmesser der Kapillare eine unbekannte Variable. Bevor die Charakteristik der Kapillare, die in Kombination mit der Pumpe einen Volumenfluss von $333 \frac{\text{ml}}{\text{h}} - 500 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ erzeugt, näher bestimmt werden kann, muss die Druckdifferenz, welche die Pumpe im Vergleich zum Außendruck erzeugt, bestimmt werden. Dies soll im folgenden Kapitel erfolgen. Außerdem soll eine Aussage über das Verhalten der Pumpe während einer langen Laufzeit getroffen werden.

4.1 Experimentelle Bestimmung der Druckdifferenz der Pumpe

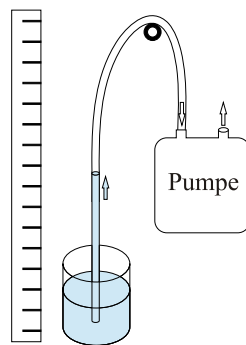


Abbildung 4.1: Skizzen-artiger Versuchsaufbau.

Um den Unterdruck, den die Pumpe erzeugen kann¹, zu bestimmen, wurde an den Ansaugstutzen der Pumpe ein Schlauch angeschlossen. Der Schlauch wurde in ungefähr

¹ Schego, Offenbach am Main; Deutschland: Modell: Basis-Modell SG O electronic (83 ...), vgl. [Schego (2014)]

zweieinhalb Metern Höhe befestigt und das untere Ende des Schlauchs wurde in ein mit Wasser gefülltes Gefäß gehängt (siehe Abbildung 4.1). Die Idee dahinter war, dass die Pumpe, wenn sie in Betrieb ist, durch die erzeugte Druckdifferenz das Wasser aus dem Gefäß in den Schlauch hochsaugt. Über die Formel des Hydrostatischen Drucks (siehe Formel 4.1) kann die anliegende Druckdifferenz aus der Steighöhe bestimmt werden.

$$\Delta p = \rho \cdot h \cdot g \quad (4.1)$$

mit Δp = Hydrostatischen Druck, ρ = Dichte von Wasser, h = Steighöhe des Wassers und g = Erdbeschleunigung.

Um zu klären, wie sich die Pumpe bei unterschiedlichen Spannungen verhält, wurde die an der Pumpe anliegende Spannung in Schritten von 1 V von 5 V auf 15 V erhöht. Von den Herstellern wird eine Betriebsspannung von 12 V angegeben, deshalb wurde eine Spannung von 15 V nicht überschritten, weil zu befürchten war, dass die Pumpe in einem noch höheren Spannungsbereich Schaden nimmt. Zu der jeweils angelegten Spannung wurde in drei Messläufen die Steighöhe des Wassers im Schlauch bestimmt (siehe Tabelle A.1 im Anhang). Aus den Messwerten wurden anschließend die Mittelwerte gebildet, um aus diesen mit der Formel 4.1 die dazu gehörende Druckdifferenz zu bestimmen. Die Ergebnisse für den Hydrostatischen Druck sind in Abbildung 4.2 eingetragen. Die eingezeichneten Fehlerbalken ergeben sich aus der Standardabweichung der drei Messreihen.

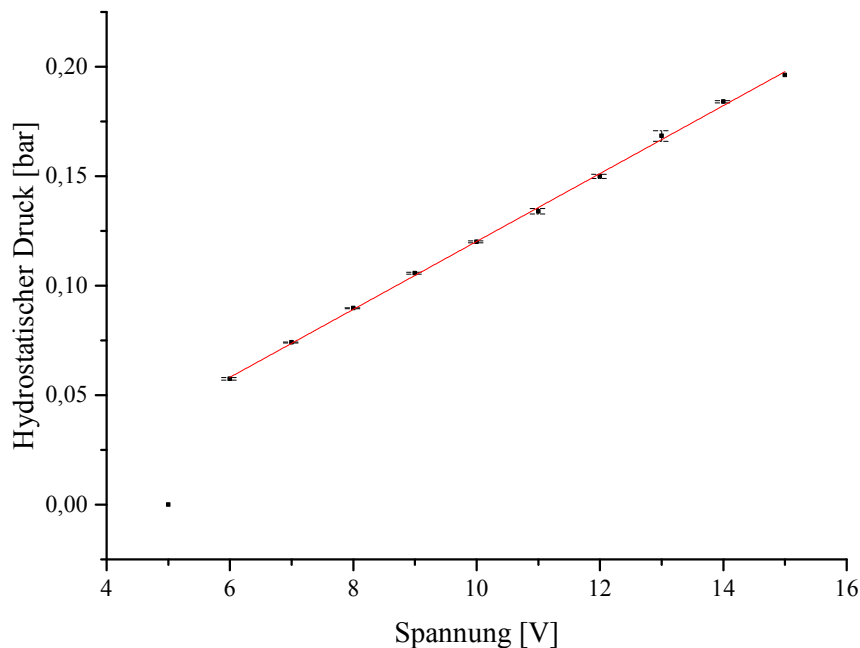


Abbildung 4.2: Hydrostatischer Druck in Abhängigkeit der Pumpspannung; Messwerte, dazugehöriger linearer Fit (rot): $f(x) = -0,0349 \text{ bar} + 0,0155 \frac{\text{bar}}{\text{V}} \cdot x$ und Fehlerbalken ergeben sich aus dem Standardfehler.

Es ist anzunehmen, dass die Messwerte durch den Versuchsaufbau mit einem systematischen Fehler belastet sind. Zum einen war es schwierig, die Verbindung zwischen der

Pumpe und dem Schlauch, die aus zwei ineinander gesteckten Schläuchen, die mit einer Schlauchschelle zusammengepresst wurden, bestand, abzudichten. Zum anderen könnte die Leistung der Pumpe über die Messzeit abgenommen haben. Wenn dies der Fall sein sollte, müsste zu erkennen sein, dass die Steighöhen der zweiten und dritten Messreihe generell geringer sind als die der ersten Messreihe. In Abbildung B.1 im Anhang ist zu erkennen, dass die Messwerte der zweiten und dritten Messreihe ein wenig niedriger liegen. Die Abweichung ist jedoch minimal und kann deshalb vernachlässigt werden.

Die Messergebnisse in Abbildung 4.2 zeigen, dass die Pumpe erst ab einer Spannung von sechs Volt einen Unterdruck aufbauen kann, der ausreicht, um Wasser im Schlauch hochzusaugen. Da das System nicht zu hundert Prozent abzudichten war, ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse nicht den absoluten Werten entsprechen. Wenn die Pumpe unter Idealbedingungen betrieben worden wäre, hätte demnach der Wasserpegel im Schlauch höher ansteigen sollen, als es in diesem Experiment der Fall war. Aus diesem Grund wurden mit Hilfe eines anderen Versuchsaufbaus genauere Werte für die von der Pumpe erzeugte Druckdifferenz ermittelt (siehe Kapitel 4.2). Auch wenn es sich bei den Messergebnissen wahrscheinlich nicht um die jeweils exakten, absoluten Werte handelt, ist es möglich, mit Hilfe des linearen Fits $\Delta p(U) = -0,0349 \text{ bar} + 0,0155 \frac{\text{bar}}{\text{V}} \cdot U$ Aussagen über die relative Änderung der Druckdifferenz in Abhängigkeit von der Spannung zu treffen.

4.2 Langzeitverhalten der Pumpe

In diesem Abschnitt soll mit Hilfe eines geänderten Versuchsaufbaus ein genauerer Wert für die von der Pumpe bei einer Betriebsspannung von 12 V ² erzeugten Druckdifferenz ermittelt werden und eine Aussage über den Verlauf der Druckdifferenz getroffen werden, wenn die Pumpe über einen langen Zeitraum betrieben wird.

Um den Unter- bzw. Überdruck, den die Pumpe erzeugt, zu messen, wurde der Ansaugstutzen bzw. der Ausgang der Pumpe in diesem Versuch an einen Differenzdrucksensor³ angeschlossen. Damit die Pumpe eine Druckdifferenz erzeugen konnte, wurde die zweite Öffnung des Drucksensors mit Hilfe einer Swagelok-Dichtung verschlossen. Die Messwerte des Drucksensors wurden mit Hilfe des Arduinos, einem Mikrocontrollerboards (siehe Kapitel 7.1), alle 60 Sekunden ausgelesen und auf eine SD-Speicherkarte gespeichert.

Die Druckdifferenz, die von dem Drucksensor gemessen wird, wird von diesem in ein Spannungssignal umgewandelt. Der Drucksensor kann in einem Bereich von Druckdifferenzen zwischen -1 bar und +1 bar verwendet werden. Dabei entspricht eine ausgegebene Spannung von 0 V der Druckdifferenz von -1 bar und eine Spannung von 5 V der Druckdifferenz von +1 bar. Da ein linearer Zusammenhang zwischen den gemessenen

²Vor der Durchführung der Langzeitmessungen wurde bei Betriebstemperatur, nachdem sich die Spannung eingependelt hatte, die Ausgangsspannung des „12 V-Reglers“ mit Hilfe des Drehpotentiometers auf 12 V eingestellt. Die Langzeitmessungen wurden dann im kalten Zustand gestartet.

³GE Measurement & Control; Billerica; MA; USA; Modell: Unik 5000 (A5074-TB-A1-CA-HO-PN) mit einer Betriebsspannung zwischen 7 und 32 V; vgl. [Company (2011)]

Druckdifferenzen und den ausgegebenen Spannungen angenommen werden kann, wurde bei der Auswertung 2,5 V mit einer Druckdifferenz von 0 bar gleichgesetzt.

Die ausgegebene Spannung wurde über einen Analog-Eingang des Arduinos eingelesen. Dabei wurde sie von einem 10-Bit-ADC („Analog-Digital-Converter“) umgewandelt und die Spannungen wurden in $2^{10} = 1024$ Schritten aufgelöst. Die digitalen Werte 0 bis 1023 entsprechen einem Spannungsmessbereich von 0 bis $\frac{1023 \cdot 5}{1024}$ V.

Um diese Werte wieder in Spannungen bzw. Druckdifferenzen umzurechnen, wurden die Zahlenwerte, die der Arduino den Spannungen zugeordnet hatte, mit dem Faktor $\frac{5}{1024}$ multipliziert. Das Ergebnis entsprach der bestmöglichen Näherung der Spannung, die die Drucksonde ausgegeben hatte. Unter der Annahme, dass 2,5 V einer Druckdifferenz von 0 bar entsprechen, wurde über die Formel $\frac{(2,5 \text{ V} - U_{\text{Druck}})}{0,0025 \frac{\text{V}}{\text{mbar}}}$ die Druckdifferenz in mbar berechnet, die die Pumpe erzeugt hatte.

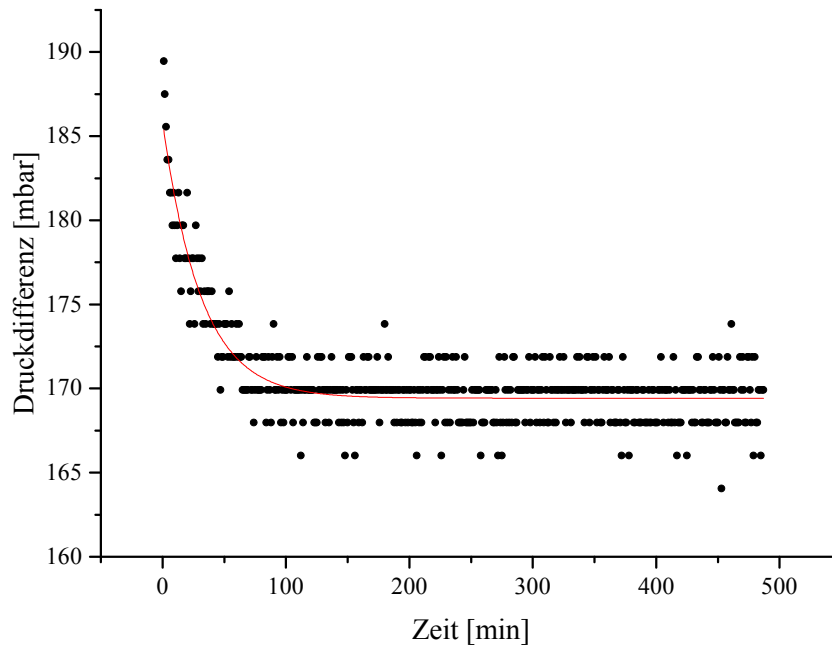


Abbildung 4.3: Langzeitmessung des Unterdrucks, der von der Pumpe erzeugt wurde, über 8 Stunden und 7 Minuten; Messwerte und der dazugehörige exponentielle Fit (rot) zur Bestimmung des Drucks, den die Pumpe nach dem Leistungsabfall erzeugt hat: $f(x) = 16,5 \text{ mbar} \cdot e^{\frac{-x}{31,1 \text{ min}}} + 169,4 \text{ mbar}$.

Durch den Versuchsaufbau sind die Messwerte mit einem systematischen Fehler behaftet. Aus dem Messfehler der Drucksonde, der mit $\pm 0,002 \text{ V}$ angegeben ist (vgl. [Solutions (2014)]), und dem Messfehler des ATmega2560, der mit 10 mV angegeben ist (vgl. [ATMEL (2014)]), resultiert ein Fehler von $\pm 4,8 \text{ mbar}$ für die aus den Messwerten des Arduinos errechneten Druckdifferenzen. Dieser wurde über die Fehlerfortpflanzung berechnet. Die Schwierigkeiten das System komplett abzudichten, die in Abschnitt 4.1 beschrieben wurden, gab es bei diesem Versuchsaufbau nicht. Das System ist in dem Bereich der Druckdifferenz von ungefähr -200 mbar bis $+200 \text{ mbar}$, bei dem die Pumpe arbeitet, als

nicht anzusehen, weil in diesem Versuchsaufbau keine Schlauchverbindung wie in Kapitel 4.1 verwendet wurde.

Die errechneten Werte für den Unterdruck, den die Pumpe über einen Zeitraum von 8 Stunden und 7 Minuten erzeugt hatte, sind in Abbildung 4.3 und die Messwerte des Überdrucks, der über einen Zeitraum von 14 Stunden und 20 Minuten gemessen wurde, sind in Abbildung 4.4 über die Zeit aufgetragen.

In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass nur bestimmte Messwerte der Druckdifferenz gemessen wurden („Streifenmuster“). Diese Beobachtung ist mit der Auflösung des Arduinos zu erklären (vgl. Kapitel 7.1). Die geringste Auflösung des Arduinos beträgt 0,005 V.

In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass die erzeugte Druckdifferenz in den ersten 100 bis 150 Minuten um ungefähr 12 % abfällt. Dies ist zunächst damit zu erklären, dass für die 12 V-Spannungsversorgung der Pumpe ein 5 V-Spannungsregler verwendet wurde. Um eine Ausgangsspannung von 12 V zu erhalten, wurden das interne Rückkopplungsnetzwerk des Spannungsreglers, das die Ausgangsspannung bestimmt, um zwei externe Widerstände (unter anderem ein Drehpotentiometer) ergänzt (siehe Schaltskizze B.3 im Anhang). Der thermische Effekt, der daraus entsteht, dass sich die Widerstände in dem 5 V-Spannungsregler stärker erhitzen als die Widerstände, die außerhalb des Reglers liegen, führte dazu, dass die Spannung in der Anfangszeit absank⁴, bis die Temperaturzunahme des 5 V-Spannungsreglers ihr Maximum erreicht hatte.

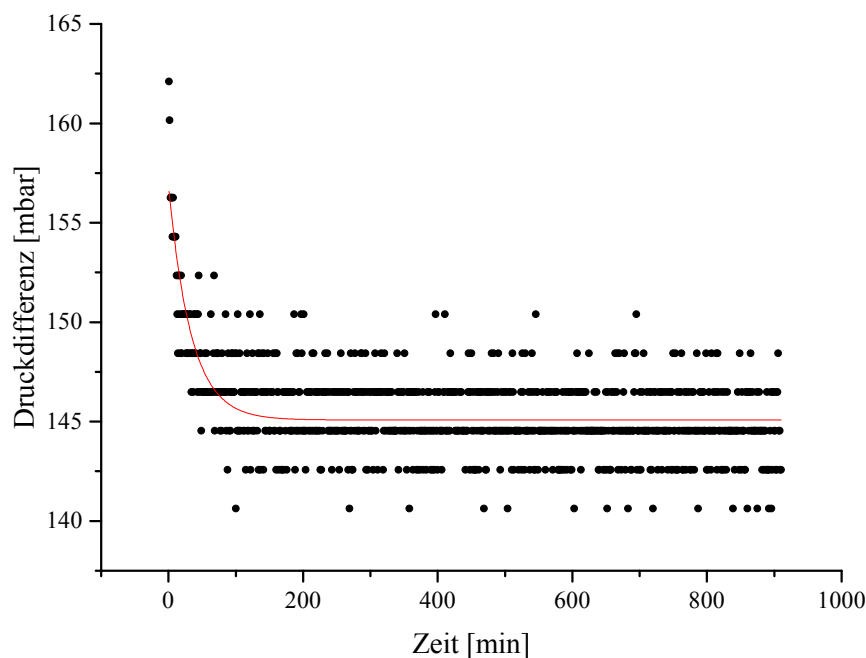


Abbildung 4.4: Langzeitmessung des Überdrucks, den die Pumpe erzeugt hat, über 14 Stunden und 20 Minuten; Messwerte und dazugehöriger exponentieller Fit (rot) zur Bestimmung des Drucks, den die Pumpe nach dem Leistungsabfall erzeugt hat: $f(x) = 11,8 \text{ mbar} \cdot e^{\frac{-x}{33,3 \text{ min}}} + 145,1 \text{ mbar}$.

⁴weil die beschriebenen Widerstände einen positiven Temperaturkoeffizienten haben

Um einzuschätzen, wie lange es dauert, bis das thermische Gleichgewicht eintritt, wurde die Spannung, die der „12 V-Regler“ ausgibt, von dem Arduino über einen Zeitraum von etwa 50 Minuten jede Sekunde gemessen. Dazu wurde die Ausgangsspannung des Reglers von einem Spannungsteiler um den Faktor 10 reduziert⁵ und anschließend an einen Analog-Eingang des Arduinos angelegt (siehe Abbildung B.4 im Anhang). In Abbildung B.2 im Anhang ist zu erkennen, dass sich das thermische Gleichgewicht nach ungefähr 500 Sekunden eingestellt hatte. Dies bedeutet, dass die Druckabnahme in den restlichen 100 bis 150 Minuten durch einen anderen Effekt verursacht wurde. Als Erklärung kommt eine thermisch bedingte Leistungsabnahme der Pumpe in Frage.

Der Druckabfall, der durch den Spannungsabfall erzeugt wurde, ist zu vermeiden, indem bei dem Aufbau der Luftsammelanlage ein „richtiger“ 12 V-Spannungsregler, bei dem dieser thermische Effekt nicht auftritt, verwendet wird. Der Druckabfall, der durch die Leistungsabnahme der Pumpe erzeugt wird, könnte mit Hilfe eines Regelkreises behoben werden, der die von der Pumpe erzeugte Druckdifferenz über die Regelung der Pumpleistung konstant hält.

In Abbildung B.2 im Anhang konnte ein weiterer Effekt beobachtet werden, der eine weitere Messungenauigkeit zur Folge hat. Denn obwohl am Ende des Versuchs mit Hilfe eines Multimeters⁶ die Ausgangsspannung des Spannungsreglers auf 12 V ermittelt wurde, ist in Abbildung B.2 zu erkennen, dass die Spannung auf 11,77 V abfällt. Zu der Abweichung zwischen den Messwerten des Arduinos und des Multimeters kommt es aufgrund der Ungenauigkeit der verwendeten Referenzspannung, die von dem Arduino für die A-D-Wandlung verwendet wird. Der 5 V-Spannungsregler, der die Referenzspannung erzeugt, kann laut Datenblatt [Semiconductor (2014)] mit einem konstanten Fehler von bis zu $\pm 2\%$ behaftet sein. Aus dem Zusammenhang, dass der Arduino bei einer 12 V-Spannung eine Spannung von 11,77 V ausgibt, kann dieser Fehler für den im Arduino eingebauten Spannungsregler bestimmt werden. Aus dem Spannungsabfall von 0,23 V ergibt sich, dass der Spannungsregler mit einem Fehler von -1,94 % behaftet ist. Zusätzlich ist der Spannungsregler mit einem Fehler der Langzeit-Stabilität von $\pm 0,3\%$ behaftet. Dies ist daran zu erkennen, dass bei dreimaliger Messung der 12 V-Spannungsversorgung die Ausgangsspannung, auf die sich der Spannungsregler laut Arduino eingependelt hat, zwischen 11,74 V und 11,77 V variiert hat.

Über den errechneten Fehler von -1,94 % war es möglich, die Messwerte der Differenzdruckmessung zu korrigieren. Dabei wurden die aus den Messwerten des Arduinos ermittelten Spannungen mit dem Faktor $\frac{1}{(1-0,0194)}$ multipliziert. Aus diesen korrigierten Spannungswerten wurde dann, genauso wie oben beschrieben, die von dem Drucksensor gemessenen Differenzdrücke ausgerechnet. Die korrigierten Messwerte für die Differenzdrücke sind in Abbildung 4.5 und Abbildung 4.6 eingetragen. Da die Korrektur eine Erhöhung der gemessenen Spannungen zur Folge hatte, ist zu erkennen, dass der von der Pumpe erzeugte Unterdruck in Wirklichkeit kleiner und der Überdruck in Wirklichkeit größer war.

Um zu ermitteln, wie sich die von der Pumpe erzeugte Druckdifferenz nach dem starken

⁵damit sie im Messbereich des Arduinos liegt (siehe Kapitel 7.1)

⁶Anzeigenauigkeit: 2 Nachkommastellen → Genauigkeit $\pm 0,005$ V

Abfall am Anfang verhält bzw. auf welche Druckdifferenz die Pumpe bei einer Dauerbelastung abfällt, wurde ein exponentieller Fit durch die Messwerte in Abbildung 4.3 und in Abbildung 4.4 gelegt. Für die Messung des Unterdrucks ergab sich, dass die Pumpe über eine lange Laufzeit mit einer Spannungsversorgung von 12V eine Druckdifferenz von $\Delta p = (153,2 \pm 4,8) \text{ mbar}$ erzeugt.

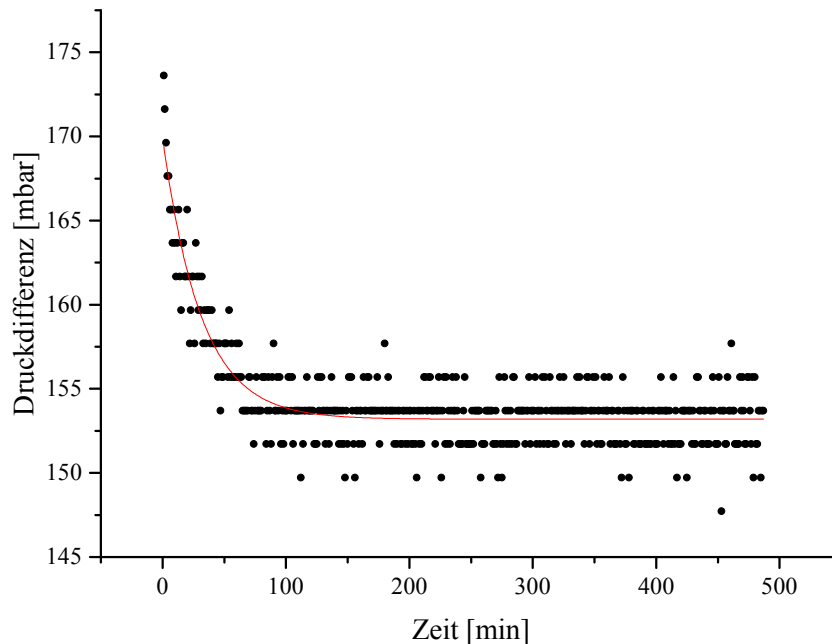


Abbildung 4.5: Korrigierte Messwerte des Unterdrucks aus Abbildung 4.3; Messwerte und dazugehöriger exponentieller Fit (rot): $f(x) = 16,8 \text{ mbar} \cdot e^{\frac{-x}{31,1 \text{ min}}} + 153,2 \text{ mbar}$; über exponentiellen Fit ergibt sich, dass sich die Pumpe langfristig auf eine Druckdifferenz von 153,2 mbar einpendelt.

Der exponentielle Fit durch die Messwerte des Überdrucks in Abbildung 4.4 ergibt, dass sich die Pumpe bei einer Langzeitmessung bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = (167,5 \pm 4,8) \text{ mbar}$ einpendelt hat. Ein Vergleich der Werte des Unter- und Überdrucks, der von der Pumpe erzeugt wurde, zeigt, dass die Pumpe bei einer angelegten 12 V-Spannung den Druck nicht um die selbe Druckdifferenz erhöht und absenkt.

In diesem Kapitel wurde der Unterdruck, den die Pumpe erzeugt, auf $\Delta p = 153,2 \text{ mbar}$ bestimmt. In Abschnitt 4.1 wurde ein Unterdruck von $\Delta p = 151,2 \text{ mbar}$ ermittelt. Wie zu erwarten ist dieser Wert ein wenig kleiner als der, der in diesem Kapitel ermittelt wurde. Über die ermittelte Druckdifferenz kann nun mit Hilfe der Formel 3.10 die Kapillare, die in Kombination mit der Pumpe den gewünschten Fluss von $333 \frac{\text{ml}}{\text{h}} - 500 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ erzeugt, näher charakterisiert werden.

Über die Langzeittests der Pumpe hat sich ergeben, dass die erzeugte Druckdifferenz bis auf die anfängliche Erhöhung konstant ist. Wie stark der Leistungsabfall der Pumpe ausgeprägt ist, wenn die Stromversorgung von einem „richtigen“ 12 V-Spannungsregler erzeugt wird, muss in einem weiteren Testlauf ermittelt werden. Der Leistungsabfall der Pumpe kann jedoch prinzipiell über einen Regelkreis ausgeglichen werden.

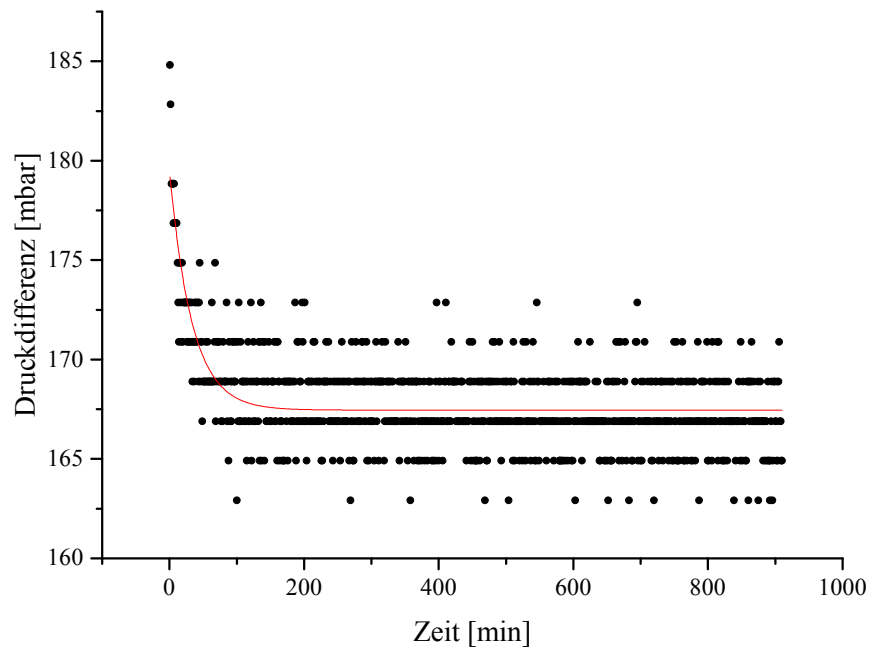


Abbildung 4.6: Korrigierte Messwerte des Überdrucks aus Abbildung 4.4; Messwerte und dazugehöriger exponentieller Fit (rot): $f(x) = 12,1 \text{ mbar} \cdot e^{\frac{-x}{33,3 \text{ min}}} + 167,5 \text{ mbar}$; über den exponentiellen Fit ergibt sich, dass sich die Pumpe auf einen Druck von 167,5 mbar einpendelt.

Kapitel 5

Auswahl der Kapillare

Dieses Kapitel behandelt die Auswahl der Kapillare, die in der Sammelanlage verwendet werden soll. Dazu wurde zunächst für verschieden Kapillardurchmesser die Kapillarlänge ermittelt, mit der sie in Kombination mit der Pumpe einen Fluss von $333 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ erzeugen würden und diese Vorhersage anschließend experimentell überprüft.

5.1 Theoretische Längenbestimmung

Wie in [Hands (2013)] vermutet und in dieser Arbeit bestätigt (siehe Kapitel 5.2), gilt das Gesetz der laminaren Rohrströmung auch für Kapillaren. In diesem Unterkapitel wird zunächst überprüft, ob sich in drei Kapillaren mit unterschiedlichem Durchmesser eine laminare Strömung ausbildet. Anschließend wird mit der in Kapitel 3.2 hergeleiteten Formel für den Volumenstrom am Kapillarausgang und dem Messergebnis für den Unterdruck, der von der Pumpe erzeugt wird (siehe Kapitel 4.2), die jeweilige Kapillarlänge bestimmt, mit der ein Fluss von $333 \frac{\text{ml}}{\text{h}} - 500 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ erzeugt wird. Da der Fluss auf jeden Fall $>333 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ liegen muss, wurde mit ihm die maximale Länge der Kapillaren bestimmt.

Die Kapillaren haben einen Innendurchmesser von $d_1 = (50 \pm 3) \mu\text{m}$, $d_2 = (100 \pm 4) \mu\text{m}$ und $d_3 = 500 \mu\text{m}$ (vgl. [molex (2011)]). Zunächst wurde abgeschätzt, ob es sich bei den Strömungen durch die Kapillaren um eine viskose Strömung handelt. Dazu wurde die Knudsenzahl Kn (siehe Formel 3.1) unter Standardbedingungen ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 298,15 \text{ K}$; $p = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) berechnet. Unter Standardbedingungen gilt für die freie mittlere Weglänge $\bar{l}$ eines Gasmoleküls in Luft $\bar{l} = 66,15 \text{ nm}$ (vgl. [Wutz (2006)], S.45). Für alle drei Kapillare ist die Knudsenzahl $Kn < 0,1$ ($Kn_1 = (132,29 \pm 7,94) \cdot 10^{-5}$; $Kn_2 = (66,15 \pm 2,65) \cdot 10^{-5}$; $Kn_3 = 13,23 \cdot 10^{-5}$). Das bedeutet, dass die freie mittlere Weglänge unter Standardbedingungen sehr viel kleiner als der Innendurchmesser der drei Kapillaren ist und dass sich somit eine viskose Strömung ausbildet.

Um einschätzen zu können, ob sich in den drei Kapillaren auch eine laminare Strömung ausbildet, wurde die Reynoldszahl Re (siehe Formel 3.2) berechnet. Aus dem gewünschten Volumenfluss $\dot{V} = 333 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ wurde im folgenden die Fließgeschwindigkeit v berechnet. Aus

$$v = \frac{1}{A} \cdot \dot{V} = \frac{4}{d^2 \cdot \pi} \cdot \dot{V} \quad (5.1)$$

ergibt sich $v_1 = (47,11 \pm 5,65) \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $v_2 = (11,79 \pm 9,4 \cdot 10^{-1}) \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $v_3 = 0,47 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Mit den Bedingungen $\rho_{\text{Luft}}[20^\circ] = 1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und $\eta_{\text{Luft}} = 18,19 \cdot 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ergeben sich die Reynoldszahlen $Re_1 = 155,91 \pm 20,92$, $Re_2 = 77,96 \pm 6,97$ und $Re_3 = 15,59$. Da die Reynoldszahlen für alle drei Kapillaren < 2300 liegen, darf die in Kapitel 3.2 hergeleitete Formel für den Volumenfluss (siehe Formel 3.10) verwendet werden.

Aus der in Kapitel 4.2 berechneten Druckdifferenz $\Delta p = 153,2 \text{ mbar}$, dem Durchmesser der jeweiligen Kapillare und dem gewünschten Fluss von $\dot{V} = 333 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ wurden anschließend die dazugehörige Kapillarlänge $l = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot (p_1^2 - p_2^2)}{\dot{V} \cdot p_2 \cdot \eta \cdot 256}$ berechnet.

Für die Kapillare mit dem Innendurchmesser $d_1 = (50 \pm 3) \mu\text{m}$ wurde die Länge $l_1 = 1,52 \text{ mm}$ ermittelt. Da dies kürzer als die Ferrule (5 mm) ist, mit der die Kapillare später in die Fitting-Verbindung¹ eingefügt werden soll, wurde diese Kapillare für die Verwendung ausgeschlossen. Es war zu befürchten, dass die Ferrule beim Anziehen der Verbindung die Öffnung der Kapillare verschließen würde. Die Kapillare mit einem Innendurchmesser $d_2 = (100 \pm 4) \mu\text{m}$ müsste $l_2 = 24,34 \text{ mm}$ lang sein, um den gewünschten Fluss zu erzeugen. Kapillaren des Durchmessers $d_2 = (100 \pm 4) \mu\text{m}$ könnten demnach im späteren Aufbau der Luftsammelanlage verwendet werden. Bei der dritten Kapillare mit einem Durchmesser von $d_3 = 500 \mu\text{m}$, hat sich eine Länge $l_3 = 15,21 \text{ m}$ ergeben. Die Verwendung erschien aus folgenden Gründen nicht sinnvoll. Zum einen würde eine so lange Kapillare einiges an Platz benötigen und zum anderen war nur eine Kapillare mit der Länge von 5m, die einen Durchmesser von 500 μm besitzt, im Labor vorhanden.

5.2 Überprüfung der Gesetzmäßigkeit

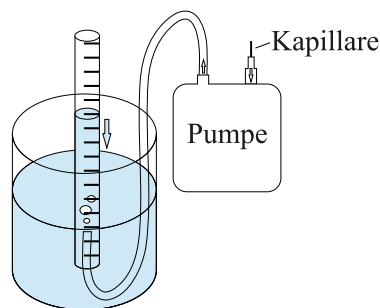


Abbildung 5.1: Skizzen-artiger Versuchsaufbau.

¹Swagelok; Solon; OH; USA: Reduzierschraubung: SS-6MO-6-1

In diesem Abschnitt soll überprüft werden, inwieweit die Grundannahmen des Gesetzes der laminaren Rohrströmung experimentell mit Kapillaren reproduziert werden können. Dazu wurden sechs unterschiedlich lange Kapillaren nacheinander mit Hilfe einer Fitting-Verbindung² an den Ansaugstutzen der Pumpe angeschlossen. An den Ausgang der Pumpe wurde ein Schlauch befestigt, der in einen umgedrehten, mit Wasser gefüllten 100 ml Messbecher führte (siehe Abbildung 5.1).

Um zu ermitteln, wie viel Luft durch die jeweilige Kapillare strömte, wurde die Zeit gemessen, die benötigt wird, bis 5 ml Wasser durch die einströmende Luft aus dem Messbecher verdrängt worden sind. Die Pumpe wurde mit einer Betriebsspannung von 12 V versorgt, sodass die Pumpe einen Unterdruck von $\Delta p = 153,2 \text{ mbar}$ erzeugte. Diese Messreihe wurde für jede Kapillare zweimal durchgeführt. Die Mittelwerte der Messwerte wurden in Abbildung B.5 bis B.10 im Anhang eingetragen.

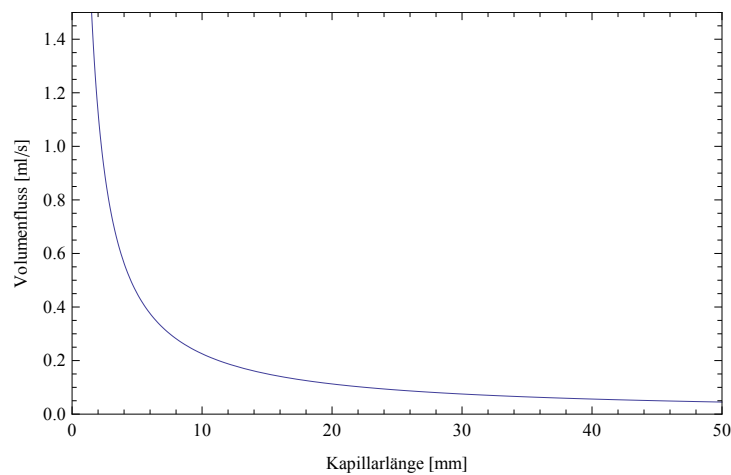


Abbildung 5.2: Theoretische Voraussage in Abhängigkeit der Kapillarlänge nach der Formel 5.2.

Nach dem Gesetz für die laminare Rohrströmung wäre ein Abfall des Flusses mit dem Zusammenhang $f(x) \sim \frac{1}{x}$ in Abhängigkeit der Kapillarlänge zu erwarten (siehe Abbildung 5.2). Da ein stärkerer Abfall des Flusses bei kurzer Kapillarlängen anzunehmen war, wurde für fünf der sechs Kapillaren eine Länge zwischen 5 mm und 30 mm gewählt. Die Länge der kürzesten Kapillare, die zugeschnitten werden konnte, wurde dadurch begrenzt, dass die Graphitferrule selbst eine Länge von 5 mm hat. Um sicherzustellen, dass die Öffnung der Kapillare nicht durch das Graphit der Ferrule verstopft, wurden zwei Prinzipien bei dem Zuschneiden der Kapillaren beachtet. Zum einen musste die Kapillare länger als die Ferrule sein, da sonst beim Anziehen der Fitting-Verbindung die Gefahr bestand, dass sich die dünne Bohrung in der Ferrule verschließt. Zum anderen wurde die Ferrule auf die Kapillare gezogen, bevor diese zugeschnitten wurde. Indem die Seite der Kapillare, über die die Ferrule aufgezogen wurde, großzügig entfernt wurde, konnte verhindert werden, dass Graphit die kleine Öffnung der Kapillare zusetzt. Erst anschließend wurde

²Swagelok; Solon; OH; USA: Reduzierverschraubung: SS-6MO-6-1

die Kapillare auf die gewünschte Länge zugeschnitten. Die kürzeste Kapillare, die zugeschnitten werden konnte, hatte eine Länge von $l_1 = 7,75 \text{ mm}$. Die anderen fünf Kapillaren hatten die Länge von $l_2 = 10,75 \text{ mm}$, $l_3 = 15,2 \text{ mm}$, $l_4 = 20,75 \text{ mm}$, $l_5 = 27,24 \text{ mm}$ und $l_6 = 40,25 \text{ mm}$.

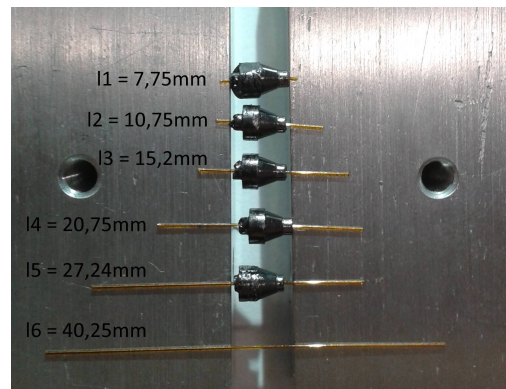


Abbildung 5.3: Photographie der sechs verschieden langen Kapillaren.

In das Ergebnis des Versuchs gehen zwei verschiedene Fehler ein. Zum einen war die Längenbestimmung der Kapillaren mit Hilfe einer Schieblehre auf $0,05 \text{ mm}$ genau. Zum anderen war die Genauigkeit der Messung durch die Messmethoden beschränkt. Der aus der Ungenauigkeit der Messmethode resultierende Fehler ist nicht genau bestimmbar, weil sowohl die Ablesehöhe des Wasserstandes im Messbecher durch den Blickwinkel auf das Messbecher als auch die Zeitmessung durch die verzögerte Reaktionszeit fehlerbehaftet sind. Dadurch, dass in jeder Messreihe in 5 ml Intervallen zwischen 5 ml und mindestens 35 ml die Zeit gemessen wurde, kann über den linearen Zusammenhang der Messwerte eine größere Genauigkeit erreicht werden. Als Güte der Messung kann der Standardfehler der Steigung verwendet werden.

Durch die Messwerte in Abbildung B.5 bis Abbildung B.10 wurde ein linearer Fit gelegt, um die Steigung der Geraden und damit den Fluss pro Sekunde zu bestimmen. Die Ergebnisse für den Volumenfluss und den Standardfehler der Steigung sind in Tabelle 5.1 eingetragen.

Tabelle 5.1: Volumenfluss bestimmt über die linearen Fits in Abbildung B.5 bis B.10 für die unterschiedlichen Kapillarlängen; Standardabweichung der Steigung der linearen Fits.

Abbildung	Kapillarlänge [mm]	Volumenfluss [$\frac{\text{ml}}{\text{s}}$]	Standardfehler d. Steigung [%]
B.5	7,75	0,21	0,31
B.6	10,75	0,17	0,28
B.7	15,2	0,12	0,22
B.8	20,75	0,09	0,49
B.9	27,4	0,07	0,74
B.10	40,25	0,04	0,42

Der Standardfehler der Steigung liegt bei jedem Fit unter 1 %, was dafür spricht, dass es keine große Abweichung der Messwerte von dem linearen Fit gibt. Die Schwankungen der einzelnen Standardfehler sind minimal und es ist keine Tendenz zu erkennen, deshalb wird auf diese Schwankungen nicht weiter eingegangen.

Die Ergebnisse für den Volumenfluss durch die unterschiedlich langen Kapillaren wurden in Abbildung 5.4 über die Kapillarlänge aufgetragen. In die Graphik wurde außerdem der theoretische Verlauf, der nach dem Gesetz der laminaren Rohrströmung zu erwarten wäre, eingezeichnet.

$$f(x) = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot (p_1^2 - p_2^2)}{256 \cdot \eta \cdot p_2} \cdot x^{-1} \quad (5.2)$$

mit $d = 100 \mu\text{m}$, $p_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, $p_2 = (1 - 0,15319) \cdot 10^5 \text{ Pa}$, $\eta_{Luft} = 18,19 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $f(x)$ = Volumenfluss und x = Kapillarlänge.

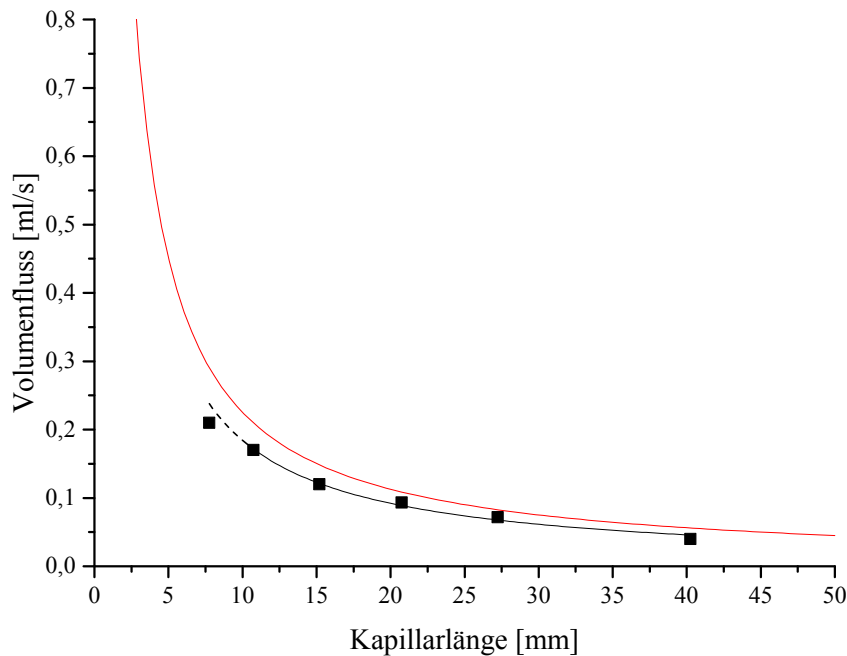


Abbildung 5.4: Messwerte: Experimentell ermittelter Volumenfluss in Abhängigkeit der Kapillarelänge; theoretischer Verlauf über das Gesetz der laminaren Rohrströmung nach Formel 5.2 (rot); Fit über Zusammenhang $f(x) = \frac{1,8424 \frac{\text{m}^4}{\text{s}}}{x}$; gestrichelte Linie: Weiterführung des Fits.

Um einschätzen zu können, ob es zwischen den experimentell erhobenen Daten den gleichen Zusammenhang wie für die laminare Rohrströmung gibt, wurde ein Fit der Form $\sim \frac{1}{x}$ durch die Messwerte gelegt. Zunächst wurden für den Fit alle sechs Messwerte verwendet. Da es aber bei dem daraus resultierende Fit zu einer großen Abweichung vor allem bei den mittleren Werten zwischen 15,2 mm und 27,4 mm gekommen war, wurde der zweite Fit nur durch die Messwerte der Kapillaren mit der Länge zwischen 15,2 mm

und 40,25 mm gelegt. Die ersten beiden Messwerte wurden aus zwei Gründen nicht für den „zweiten“ Fit verwendet.

Zum einen führt der Zusammenhang $\sim \frac{1}{x}$ dazu, dass bei kurzen Kapillaren der Fehler in der Kapillarlänge einen größeren Einfluss auf das Ergebnis hat. Zum anderen wird in dem Gesetz der laminaren Rohrströmung eine Strömung betrachtet, die sich in hinreichend großer Entfernung zum Rohreingang befindet, wo sich schon eine Strömung ausgebildet hat und das endgültige Geschwindigkeitsprofil vorliegt (siehe Kapitel 3.2). Je kürzer die Kapillare ist, desto größer ist der Anteil der Wegstrecke, in der sich noch keine Strömung ausgebildet hat, und somit ist bei diesen auch der Fehler größer, der durch die nicht einbezogene Einlaufstrecke l_{Einlauf} erzeugt wird. Aus diesen Gründen ist anzunehmen, dass die kürzeren Kapillaren zu der Abweichung des Fits geführt hatten.

Nachdem der „zweite“ Fit bis zu den ersten zwei Messwerten weiter geführt wurde, war zu erkennen, dass der experimentell ermittelte Volumenfluss für die 10,75 mm lange Kapillare gut auf der Kurve lag. Aus diesem Grund wurde ein „dritter“ Fit durch die Messwerte der Kapillaren mit der Länge zwischen 10,75 mm und 40,25 mm gelegt. In Abbildung 5.4 ist der „dritte“ Fit eingezeichnet. Die gestrichelte Linie zeigt an, wie die Kurve, die über den Fit ermittelt wurde, weiter verlaufen würde. Bei dem Wert für die 7,75 mm lange Kapillare ist, wie es zu erwarten war, eine Abweichung nach unten zu erkennen. Der Verlauf des Fits, der auf Grundlage der Messwerte ($l_3 = 10,75$ mm bis $l_6 = 40,25$ mm) bestimmt worden ist, passt ebenfalls gut zu dem theoretischen Verlauf, der über die Gesetzmäßigkeit der Hagen-Poiseuille-Strömung ermittelt wurde. Jedoch ist ersichtlich, dass der ermittelte Fit generell etwas unter dem theoretischen Verlauf liegt.

Dies bestätigt die Annahme, dass die nicht einbezogene Einlaufstrecke zu der Abweichung führt. Dadurch, dass bei einem realen Volumenfluss durch die Kapillaren die abbremsende Einlaufstrecke l_{Einlauf} überwunden werden muss, ist zu erwarten, dass der tatsächliche Fluss geringer ist als der, der durch das Gesetz der laminaren Rohrströmung vorhergesagt wird. Dazu kommt, dass bei kürzeren Kapillaren die Einlaufstrecke l_{Einlauf} einen größeren Anteil an der gesamten Länge der Kapillare hat. Die Einlaufstrecke l_{Einlauf} für die verwendeten Kapillaren beträgt 2,3 mm. Bei der kürzesten Kapillare mit einer Kapillarlänge von $l_1 = 7,75$ mm macht die Einlauflänge l_{Einlauf} ungefähr 30 % der Gesamtlänge der Kapillare aus. Dementsprechend sollte der experimentell ermittelte Fluss durch die kürzeren Kapillaren stärker von dem theoretischen Verlauf des Gesetzes für laminare Rohrströmungen abweichen, als der Fluss der längeren Kapillaren. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.4 zu erkennen. Dass der experimentell ermittelte Fluss der 40,25 mm langen Kapillare etwas stärker von dem theoretischen Verlauf abweicht, ist damit zu erklären, dass der Fluss durch diese Kapillare so gering war, dass sich der Wasserstand in dem umgekehrten Messbecher nur wenig veränderte und somit die Änderung des Wasserstandes so gering war, dass der Zeitpunkt, an dem die Wasseroberfläche eine 5ml Marke unterschritten hatte, ungenau zu bestimmen war.

Aus den Ergebnissen in diesem Kapitel kann der Schluss gezogen werden, dass das Gesetz der Hagen-Poiseuille-Strömung genutzt werden kann, um die Länge der Kapillare für einen bestimmten Volumenfluss zu ermitteln. Allerdings kommt es in der praktischen Anwendung wegen der Einlauflänge zu einem geringfügig niedrigeren Volumenfluss. Weiter ist zu beachten, dass diese Abweichung umso größer ist, je kürzer die Kapillare ist.

Aus den Daten des Fits $f(x) = \frac{1,8424 \frac{\text{ml}}{\text{s}}}{x}$ ergibt sich, dass eine Glaskapillare mit einem Durchmesser $d = (100 \pm 4) \mu\text{m}$ 19,9mm lang sein muss, damit sie den Volumenfluss auf $333,33 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ verringert.

5.3 Flussbestimmung durch Metallkapillare

In den bisherigen Versuchen wurden gläserne Kapillaren verwendet. Da diese aber sehr empfindlich sind, soll in der Luftsammelanlage eine Metallkapillare verwendet werden. In diesem Kapitel soll ermittelt werden, wie lang eine Metallkapillare sein müsste, um den benötigten Fluss von $333 \frac{\text{ml}}{\text{h}} - 500 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ bei Betriebsbedingungen ($\Delta p = 153,2 \text{ mbar}$ bei einer angelegten Spannung von 12 V) zu erzeugen.

Die Metallkapillare, die für den Aufbau verwendet werden soll, hat einen Innendurchmesser von $(d = 100 \pm 25) \mu\text{m}$ laut dem Hersteller³. Da der Kapillardurchmesser mit einem großen Fehler von $\pm 25 \mu\text{m}$ behaftet ist, kann mit Hilfe des Gesetzes für laminare Rohrströmung keine genaue Vorhersage getroffen werden. Über die Fehlerfortpflanzung würde sich bei einer 24mm langen Kapillare, die bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = 153,2 \text{ mbar}$ verwendet wird, ein Fehler von $\pm 254 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ bei einem vorhergesagten Fluss von $338 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ ergeben. Aus diesem Grund kann die richtige Kapillarlänge nur über Versuche ermittelt werden.

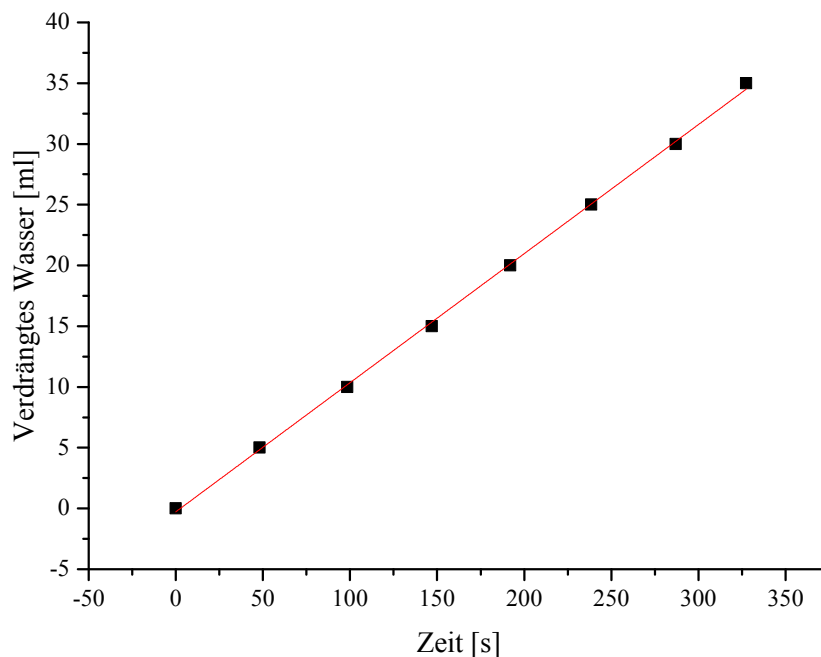


Abbildung 5.5: Volumenfluss durch Kapillare der Länge $l_1 = 25,2 \text{ mm}$; Messwerte und dazugehöriger linearer Fit (rot): $f(x) = -0,27 \text{ ml} + 0,11 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \cdot x$.

³VICI; Valco Instruments Co. Inc.; Vici AG International; Baton Rouge; LA; USA; persönliche Kommunikation mit dem Servicepersonal des Herstellers

Wie bei der in Kapitel 5.2 beschriebenen Versuchsanordnung wurden die Kapillaren, die getestet werden sollten, mit Hilfe einer Fitting-Verbindung an dem Ansaugstutzen der Pumpe befestigt, und die durchströmende Luft wurde von dem Ausgang der Pumpe über einen Schlauch in einen umgedrehten, mit Wasser gefüllten Messbecher geführt. Die Pumpe wurde bei einer angelegten Spannung von 12 V betrieben.

Für die Messung wurden Kapillaren der Länge $l_1 = 25,2 \text{ mm}$ und $l_2 = 27,65 \text{ mm}$ verwendet. Für jede Kapillare wurde die Messung zweimal durchgeführt. Die Mittelwerte der Messergebnisse sind in Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 eingetragen. Ebenso wie in dem in Abschnitt 5.2 beschriebenen Experiment sind hier aufgrund der Messmethode keine sehr genauen Ergebnisse zu erwarten. Dadurch, dass in jeder Messreihe in 5 ml Intervallen zwischen 5 ml und 40 ml die Zeit bestimmt wurde, bis jeweils 5 ml Wasser verdrängt wurden, kann über den linearen Zusammenhang der Messwerte eine größere Genauigkeit erzielt werden. Ein kleiner Standardfehler der Steigung zeigt, dass der Fit die Messwerte gut abdeckt.

Entsprechend der Gesetzmäßigkeit der laminaren Rohrströmung sollte durch die Kapillare der Länge $l_1 = 25,2 \text{ mm}$ ein Volumenstrom $(322 \pm 241,5) \frac{\text{ml}}{\text{h}} = (0,089 \pm 0,067) \frac{\text{ml}}{\text{s}}$ und durch die Kapillare der Länge $l_2 = 27,65 \text{ mm}$ einen Volumenstrom von $(293,5 \pm 220,1) \frac{\text{ml}}{\text{h}} = (0,082 \pm 0,061) \frac{\text{ml}}{\text{s}}$ fließen. Indem ein linearer Fit durch die Messwerte gelegt wurde, wurde die Steigung und damit der Volumenfluss pro Sekunde ermittelt.

In Abbildung 5.5 wurde für die Kapillare der Länge $l_1 = 25,2 \text{ mm}$ ein Volumenfluss von $0,11 \frac{\text{ml}}{\text{s}}$ gemessen. Bei einer Messzeit von einer Stunde würde ein Volumen von $381,6 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ durch die Kapillare strömen. Der Standardfehler der Steigung beträgt $9,86 \cdot 10^{-4}$ und liegt damit unter 1%.

Wie in Kapitel 5.2 festgestellt und begründet wurde, ist der tatsächliche Volumenfluss geringer als der, welcher über das Gesetz der laminaren Rohrströmung vorhergesagt wurde. Es wäre somit zu erwarten, dass der experimentell ermittelte Volumenfluss durch die Metallkapillare mit $d = 100 \mu\text{m}$ auch geringer ist, als der, welcher vorhergesagt wurde. Die Tatsache, dass ein größerer Volumenstrom ermittelt wurde, macht deutlich, dass der tatsächliche Kapillardurchmesser größer als $100 \mu\text{m}$ sein muss.

Über den ermittelten Fluss kann der tatsächliche Innendurchmesser d über folgende Formel abgeschätzt werden:

$$d = \sqrt[4]{\frac{\dot{V} \cdot 256 \cdot \eta \cdot l \cdot p_2}{\pi \cdot (p_1^2 - p_2^2)}}. \quad (5.3)$$

Für die Kapillare der Länge $l_1 = 22,2 \text{ mm}$ ergibt sich ein Durchmesser $d = 104 \mu\text{m}$. Unter der Annahme, dass der Fluss eigentlich unter dem theoretisch ermittelten liegen müsste, kann davon ausgegangen werden, dass der Durchmesser $> 104 \mu\text{m}$ ist.

Für die Kapillare der Länge $l_2 = 27,65 \text{ mm}$ wurde in Abbildung 5.6 über die Steigung des linearen Fits ein Fluss von $0,12 \frac{\text{ml}}{\text{s}}$ bzw. $432 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ ermittelt. Der Standardfehler der Steigung liegt mit $8,53 \cdot 10^{-4}$ ebenfalls unter 1%. Erstaunlich an dem Ergebnis ist, dass der Volumenstrom der längeren Kapillare größer als der Volumenstrom der kürzeren Kapillare

ist. Nach dem Gesetz der laminieren Rohrströmung wäre ein gegenteiliges Ergebnis zu erwarten gewesen. Über die Formel 5.3 wurde aus dem ermittelten Fluss der Durchmesser $d = 110\mu\text{m}$ bestimmt. Wie oben ergibt sich für den Innendurchmesser der Kapillare $d > 110\mu\text{m}$.

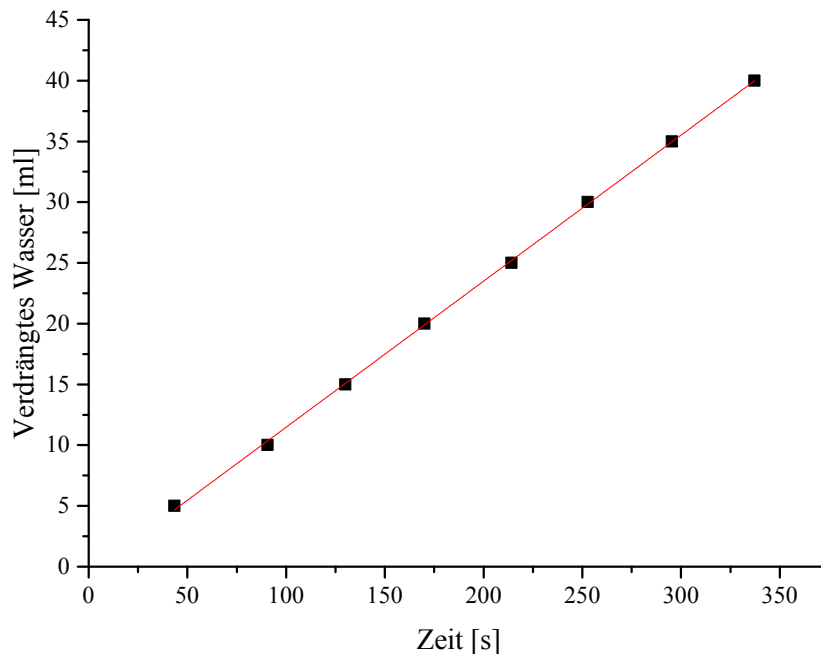


Abbildung 5.6: Volumenfluss durch Kapillare mit Länge $l_2 = 27,65\text{ mm}$; Messwerte und dazugehöriger linearer Fit (rot): $f(x) = -0,54\text{ ml} + 0,12 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \cdot x$.

Der Volumenfluss beider Kapillaren ist größer als der, der nötig wäre, um $333 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ Luft zu sammeln. Wie in Kapitel 2.2 erläutert, ist ein Endvolumen zwischen 1 und 1,5 Liter jedoch wünschenswert.

Wenn die Kapillare der Länge $l_1 = 25,2\text{ mm}$ in der Sammelanlage verwendet würde, würden $48,6\text{ ml}$ mehr pro Stunde durch die Kapillare fließen als benötigt. Das heißt, über drei Stunden würde sich das gesammelte Volumen auf $1144,8\text{ ml}$ erhöhen. Mit der Kapillare mit der Länge $l_2 = 27,65\text{ mm}$ würde das Endvolumen im Sammelbehälter nach einer Sammeldauer von drei Stunden 1296 ml betragen.

Die Metallkapillare mit der Länge $l_2 = 27,65\text{ mm}$ liefert ein größeren zusätzliche Volumenfluss und entspricht damit besser den Anforderungen der Luftsammelanlage. Aus diesem Grund soll diese Kapillare verwendet werden.

Kapitel 6

Das Sammelsystem

In diesem Kapitel wird das Sammelsystem, durch das die aus der Kapillare angesaugte Luft aufgefangen wird, charakterisiert. Hauptkomponenten des Systems sind Beutel, in denen die Luftproben gesammelt werden, und eine Ventilinsel, über deren Ventile die einzelnen Beutel angesteuert werden.

6.1 Die Luftsammelbehälter

6.1.1 Auswahl der Beutel

Da es viele unterschiedliche Varianten von Luftsammelbehältern gibt, sollen zunächst einige Kriterien für die Auswahl der Beutel aufgestellt werden. Die Beutel sollten sehr dicht und nicht zu teuer sein. Ihr Volumen sollte zwischen 1,5 und 2 Litern liegen, damit beim Befüllen noch ein Restvolumen von etwa einem halben Liter leer bleibt, um sicherzustellen, dass der Fluss über den gesamten Zeitraum von drei Stunden konstant bleibt. Es wird angenommen, dass sich der Volumenfluss in den Beutel verringert, wenn dieser nahe an seiner Kapazitätsgrenze gefüllt ist, da für das Dehnen der Beutelwand bzw. für das Komprimieren der Luft zusätzliche Energie benötigt wird. Außerdem sollte an dem Luftsammelbehälter ein Ventil sein, damit der Probenbeutel für den Transport der Luftprobe verschließbar ist. Ebenfalls wäre es sinnvoll, wenn die Sammelbehälter über eine feste Ausgangsschlauchgröße verfügen würden, um das direkte Anschließen an die Ventilinsel zu vereinfachen. Unter diesen Gesichtspunkten kommen verschiedene Sammelbeutel in Frage. Man könnte a) Gas-Sampling-Beutel, b) selbstgebaute Sammelbeutel aus Gefrierbeuteln oder c) Urinbeutel verwenden.

Vorteilhaft an den Gas-Sampling-Beuteln ist, dass sie dicht sind und dass aus diesen keine Gase herausdiffundieren. Außerdem ist ein Ventil direkt an dem Beutel vorhanden. In der Anschaffung sind die Sampling-Beutel jedoch teuer. Das günstigste Angebot, das von einem Hersteller in Europa gemacht wurde, betrug ungefähr 30 € pro Beutel. Von einem Hersteller aus den USA wurde ein Angebot gemacht, bei dem ungefähr 12 \$ pro Beutel gezahlt werden müssten¹.

¹CEL Scientific Corporation; Cerritos; CA; USA: 60 x 3l Gas Sampling Tedlar Bag with Polypropylene

Dafür, den Sammelbehälter manuell im Labor aus Gefrierbeuteln herzustellen, spricht, dass die Bauteile günstig zu beschaffen sind. Es wurde jedoch keine Möglichkeit gefunden, die Bauteile so zusammenzufügen, dass der entstandene Sammelbehälter dicht war. Der Vorteil an Möglichkeit c) ist, dass alle Beutel mit einem Ausgangsschlauch von 6mm versehen sind. Dieser kann direkt an die Ventilinsel angeschlossen werden. Außerdem ist es möglich hochwertige Urinbeutel für ungefähr 0,50 € pro Stück zu erwerben². Tests haben ergeben, dass der Beutel in dem Druckbereich, den die Pumpe erzeugen kann, als dicht angesehen werden kann. Über die Durchlässigkeit von Gasmolekülen kann zunächst keine Aussage getroffen werden (vgl. Kapitel 6.1.3). Der einzige Nachteil der Urinbeutel ist, dass sie kein eingebautes Ventil besitzen.

Aufgrund des niedrigen Preises und der guten Verfügbarkeit wurden für den Versuchsaufbau Urinbeutel mit 2 l Volumen als Sammelbehälter ausgewählt. Das fehlende Ventil kann durch die Verwendung von günstigen Schlauchklemmen ersetzt werden. Bei einer dauerhaften Nutzung der Luftsammelanlage sollte unter den Gesichtspunkten von Lebensdauer und Gasdichtigkeit eine erneute Kosten-Nutzen-Abschätzung vorgenommen werden.

6.1.2 QMS - Quadrupolmassenspektrometer

Mit Hilfe eines Quadrupolmassenspektrometers soll überprüft werden, ob bei den Urinbeuteln bestimmte Stoffe während der Lagerung durch die Beutelhaut eindringen bzw. austreten.



Abbildung 6.1: Schematischer Aufbau des QMS, Abbildung aus [Oehme (1996), S.20].

Ein Quadrupolmassenspektrometer (QMS) ist wie folgt aufgebaut (siehe Abbildung 6.1). Die Moleküle bzw. Atome des Probengases werden im Hoch- bzw. Ultrahochvakuum von der Ionenquelle elektronisch oder chemisch ionisiert. Dabei kann es zu einfacher oder mehrfacher Ionisation kommen. Die entstandenen Ionen werden über ein statisches elektrisches Feld in Richtung eines Quadrupols beschleunigt. Das Hochvakuum wird benötigt, damit die entstandenen Ionen eine genügend große freie Weglänge haben.

Die Trennung nach der Masse wird mit Hilfe eines Quadrupolfeldes durchgeführt. Ein Quadrupol besteht aus vier hyperbelförmigen- oder zylindrischen, stabförmigen Elektroden, an denen ein elektromagnetisches Feld anliegt. Die gegenüberliegenden Elektroden

fitting: 621,00 \$; mit Versand: 702,30 \$ → ~12 \$/Stück

²Diaprx GmbH; Wesel; Deutschland: DCT Urinbeutel, 2,0l -steril, ohne T-Tab-Abflusshahn; Preis: 30,82 € für 70 Stück → 0,44 €

werden über ein Potential, das aus einer Gleichspannung U und einer Wechselspannung mit der Amplitude V_0 besteht, miteinander gekoppelt (siehe Abbildung 6.2). Die Gleichspannung U ist für jedes Stabpaar umgekehrt gepolt, die Wechselspannung V ist um 180° phasenverschoben. Durch das elektromagnetische Feld durchfliegen die eintreffenden Ionen folgendes Potential in z-Richtung:

$$\varphi(x, y, z, t) = (U + V \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \frac{x^2 - y^2}{r_0^2} \quad (6.1)$$

mit U = Gleichspannung, V = Wechselspannung, $f = \frac{\omega}{2\pi}$ = Frequenz der Wechselspannung und r_0 = Radius des Resonanzfrequenz-Feldes.

Daraus ergeben sich diese Bewegungsgleichungen für die Ionen im Quadrupol-Feld in x-, y- und z-Richtung:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{\omega^2}{4} \cdot (a + 2 \cdot q \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot x = 0 \quad (6.2)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} - \frac{\omega^2}{4} \cdot (a + 2 \cdot q \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot y = 0 \quad (6.3)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = 0 \quad (6.4)$$

mit $a = \frac{4 \cdot Z \cdot U}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2}$, $q = \frac{2 \cdot Z \cdot V}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2}$, Z = Ladung des Ions und m = Masse des Ions.

Abhängig von der Massen-Ladungsverteilung $\frac{m}{q}$ durchfliegen die Ionen das Quadrupol-feld in einer endlichen Oszillation, wenn sie sich in Resonanz mit dem Quadrupolfeld befinden, oder fliegen wegen einer exponentiell anwachsenden Amplitude in x- oder y-Richtung aus dem Feld heraus bzw. gegen eine Elektrode. Durch die Faktoren a und q in der Mathieu-Gleichung (siehe Formel 6.2 und 6.3) lässt sich bestimmen, welche Ionen das Feld durchfliegen und welche aus dem Feld herausfliegen.

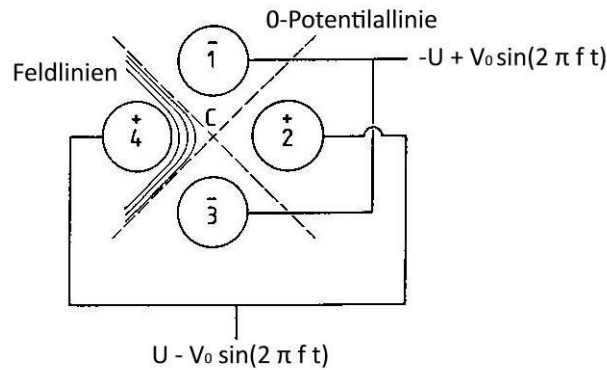


Abbildung 6.2: Schema zur Anordnung des elektromagnetischen Feldes des Quadrupol, Abbildung aus [Oehme (1996), S. 27].

In Abbildung 6.3 sind die a -Werte über die q -Werte aufgetragen. Alle Wertepaare $\frac{a}{q}$, für die sich eine stabile Flugbahn durch das Quadrupolfeld ergibt, liegen in der schraffierten Fläche. Die Stabilitätsfelder von Ionen unterschiedlicher Masse überlappen sich teilweise und sind nur im Bereich ihrer Maxima deutlich getrennt (siehe Abbildung 6.3, 2.). Wenn man ein bestimmtes $\frac{U}{V}$ bzw. $\frac{a}{q}$ Verhältnis wählt, werden nur die Ionen durchgelassen, für die das $\frac{a}{q}$ Verhältnis im oberen Bereich der Stabilitätsfeldern liegt. Indem man die Gleichspannung U und die Wechselspannung V über dieses Verhältnis variiert, kommen Ionen jeder Masse in den Bereich stabiler Oszillation und es kann ein Massenspektrum (siehe Abbildung B.11 im Anhang) mit getrennten Peaks aufgenommen werden. Die Peaks können Elementen der Masse u zugeordnet werden. Mehrfach ionisierte Elemente erzeugen außerdem einen Peak bei $\frac{1}{n}$ tel ihrer Masse.

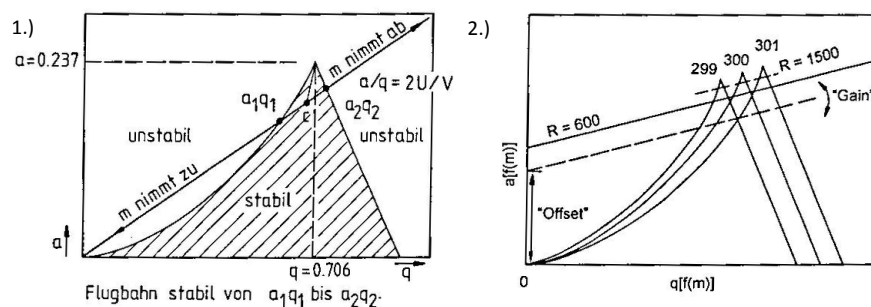


Abbildung 6.3: 1.) Skizze des Stabilitätsfeldes in Abhängigkeit der Parameter a und q ; eingezeichnete Linie entspricht einem a/q -Verhältnis von $\frac{2U}{V}$ 2.) Wertepaare $\frac{a}{q}$ für die sich stabile bzw. instabile Flugbahnen für die Ionen der Masse 299, 300 und 301u ergeben, Abbildung 1.) aus [Oehme (1996), S.31]; Abbildung 2.) aus [Oehme (1996), S. 33].

6.1.3 Gasdiffusion durch die Außenhülle der Beutel

Um zu überprüfen, ob bestimmte Stoffe durch die Außenwände des Urinbeutels aus- bzw. eintreten, wurde zunächst ein Beutel über drei Stunden mit Luft gefüllt, und dann nach 40 Stunden mit einem QMS untersucht. Theoretisch ist die Luft in Bodennähe wie folgt zusammengesetzt: Den größten Anteil macht Stickstoff (N_2) mit 78,08 % aus. Zu einem ebenfalls großen Anteil besteht Luft zu 20,95 % aus Sauerstoff (O_2). Argon (Ar) ergibt einen Anteil von 0,93 % und Kohlendioxid (CO_2) einen Anteil von 0,034 %. Weiterhin sind Wasserstoff (H_2) und verschiedene Edelgase in der Luft enthalten (vgl. [HLUG (2014)]). Ihr Anteil ist allerdings so gering, dass sie nicht bei der Bestimmung der Luftzusammensetzung über das QMS betrachtet wurden.

Da das QMS zum Zeitpunkt des Versuches nicht kalibriert war, wurde als Vergleichsmessung die Zusammensetzung einer Umgebungsluftprobe mit Hilfe des QMS ermittelt. Die Zusammensetzung der Umgebungsluft und der Luft aus dem Urinbeutel sind in Tabelle 6.1 eingetragen. Die Messergebnisse unterschieden sich in einem so geringen Maß, dass es als kein Hinweis darauf gesehen werden kann, dass ein Luftaustausch stattgefunden hat. Da die Konzentration der Elemente in dem Beutel und in der Außenluft ungefähr gleich groß sind und der Druck in dem Beutel nur als minimal erhöht eingeschätzt wer-

den kann, wäre nach dem Prinzip der Osmose durch eine Membran auch kein Bestreben nach Austausch/Ausgleich zu erwarten. Aus diesem Grund könnte mit diesem Versuch nur ermittelt werden, wenn die Hülle nur für einzelne Elemente durchgängig wäre.

Tabelle 6.1: Bestimmung der prozentuale Zusammensetzung der Umgebungsluft und der Luft in dem Urinbeutel, der für 40 Stunden gelagert wurde, bevor dessen Inhalt mit Hilfe des QMS analysiert wurde.

Elemente	Umgebungsluft [%]	Luft aus Urinbeutel [%]
N ₂	73,23	72,83
O ₂	24,98	25,32
Ar	1,76	1,78
CO ₂	$986 \cdot 10^{-4}$	$796,5 \cdot 10^{-4}$

Aus diesem Grund wurde ein weiterer Test durchgeführt, bei dem künstlich ein Konzentrationsgefälle zwischen dem Beutelinhalt und der Außenluft erzeugt wurde, indem 99,9 %iges Argon in vier leergepumpte Urinbeutel gefüllt wurde. Da es sich sowohl bei Argon als auch bei Krypton um Edelgase handelt, kann Argon stellvertretend für Krypton verwendet werden. Zwei der befüllten Urinbeutel wurden über 11 Tage und die anderen beiden über 21 Tage gelagert, bevor sie mit dem QMS vermessen wurden. In Tabelle 6.2, 6.3, 6.4 und 6.5 sind die Ergebnisse der Analyse des Beutelinhalts eingetragen.

Tabelle 6.2: Bestimmung der prozentualen Zusammensetzung der Umgebungsluft und des Inhalts des einen Urinbeutels, in den 11 Tage vor der Analyse mit einem QMS (zweimal vermessen) reines Argon gefüllt wurde.

Elemente	Luft aus Urinbeutel [%]	Luft aus Urinbeutel [%]
N ₂	24,32	24,14
O ₂	14,99	13,23
Ar	60,64	60,09
CO ₂	$5,27 \cdot 10^{-5}$ ppm	$4,92 \cdot 10^{-5}$

Bevor der Urinbeutelinhalt vermessen wurde, war schon zu erkennen, dass alle Beutel etwas an Volumen verloren hatten, wobei das Volumen der Beutel, die 21 Tage gelagert wurden, stärker abgenommen hatte. Die Analyse mit dem QMS ergab schließlich, dass die Argonkonzentration nur noch zwischen 60 % und 66 % in den beiden Urinbeuteln, die nach 11 Tagen vermessen wurden, betrug und dass die Luft aus den beiden Urinbeuteln, die nach einer Lagerzeit von 21 Tagen mit Hilfe des QMS analysiert wurde, eine Argonkonzentration von 46,89 % bzw. 43,82 % enthielten. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Argonkonzentration in den ersten 11 Tagen um ungefähr 35 % und in den weiteren 10 Tagen noch mal um etwa 20 % abgenommen hat. Aus der gleichmäßigen Abnahme der Argonkonzentration in den gleich lang gelagerten Beuteln kann nur der Schluss gezogen werden, dass die Außenwand des Urinbeutels Gase durchlässt.

Aus diesem Grund können die Urinbeutel nicht als Sammelbehälter für den regulären Betrieb der Luftsammelanlage verwendet werden.

Für die folgenden Test wurde weiter Urinbeutel verwendet, weil entweder die Zusammensetzung der Luftprobe keine Bedeutung für den Versuch hatte oder weil der Beutelinhalt sofort nach dem Experiment ausgewertet und nicht gelagert wurde.

Tabelle 6.3: Bestimmung der prozentualen Zusammensetzung der Umgebungsluft und des Inhalts des anderen Urinbeutels, in den 11 Tage vor der Analyse mit einem QMS (zweimal vermessen) reines Argon gefüllt wurde.

Elemente	Luft aus Urinbeutel [%]	Luft aus Urinbeutel [%]
N ₂	19,89	19,58
O ₂	13,23	13,14
Ar	66,86	67,22
CO ₂	$4,94 \cdot 10^{-5}$	$4,89 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 6.4: Bestimmung der prozentualen Zusammensetzung der Umgebungsluft und des Inhalts des einen Urinbeutels, in den 21 Tage vor der Analyse mit einem QMS reines Argon gefüllt wurde.

Elemente	Luft aus Urinbeutel [%]
N ₂	35,56
O ₂	19,51
Ar	46,89
CO ₂	$5,52 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 6.5: Bestimmung der prozentualen Zusammensetzung der Umgebungsluft und des Inhalts des anderen Urinbeutels, in den 21 Tage vor der Analyse mit einem QMS reines Argon gefüllt wurde.

Elemente	Luft aus Urinbeutel [%]
N ₂	35,88
O ₂	20,67
Ar	43,82
CO ₂	$5,38 \cdot 10^{-5}$

6.2 Die Ventilinsel

Die Ventilinsel soll die durch die Kapillare gesaugte Luft auf die verschiedenen Beutel verteilen. Damit sie in der Luftsammelanlage eingesetzt werden kann, muss sie bestimmte Anforderungen erfüllen. Sie sollte platzsparend, nicht sehr schwer und für den Außeneinsatz geeignet sein. Außerdem soll die Ventilinsel automatisch steuerbar sein und einen

geringen Stromverbrauch haben. Ideal wäre zudem, wenn der Aufbau der Ventilinsel spezifisch zu gestalten wäre, damit sie direkt auf die Anforderungen der Luftsammelanlage zugeschnitten werden kann.

Die Ventilinsel von Festo ³, die für den Einsatz in der Luftsammelanlage ausgewählt wurde, steuert ihre Ventile mit Hilfe von Magnetspulen, welche auch manuell über „Schrauben“ an der Oberseite der Ventilinsel geöffnet und geschlossen werden können. Indem diese von einem Strom durchflossen werden, öffnen sich die Ventile. Für die Anwendung in der Luftsammelanlage wurde eine Variante gewählt, bei der die Steuerung der Ventile pneumatisch unterstützt wird. Bei diesem Aufbau löst sich durch den Nennanzugsstrom, der benötigt wird, um das Ventil zu öffnen, ein Anker. Durch die Steuerhilfsluft ($\Delta p = 5 \text{ bar}$) werden die Ventile dann offen gehalten. Das hat den Vorteil eines niedrigeren Stromverbrauchs, da sich der Nennanzugsstrom mit $I = 50 \text{ mA}$ 20 ms, nachdem das Ventil geöffnet und der Anker gelöst wurde, auf den Haltestrom mit $I = 10 \text{ mA}$ absenkt. Über eine Sammelperiode von 3 Stunden ergibt sich daraus gegenüber der Verwendung von Ventilen, die nicht pneumatisch unterstützt werden, eine Stromersparnis von etwa 120 mAh. Dies entspricht einer Leistungersparnis von $\frac{4}{5}$ der Leistung, die ohne pneumatische Unterstützung verbraucht wird.

Die Ventilinsel ist zudem flexibel planbar. Jedoch kann eine Ventilinsel maximal mit 24 Ventilen bestückt werden. Damit eine einwöchige Probennahme durchgeführt werden kann, wurden zwei Ventilinseln mit 24 Ventilen und eine Ventilinsel mit 8 Ventilen angefertigt. Die Steuerung kann bis zu 72 Ventile ansteuern und könnte bei Bedarf problemlos erweitert werden.

Damit die Urinbeutel an der Ventilinsel befestigt werden konnten, wurden 6mm Anschlussstecker an die Ventilausgänge angeschraubt.

6.3 Totvolumen

Mit dem Begriff Totvolumen ist das Volumen gemeint, welches zwischen dem Kapillareingang und dem Ventil der Ventilinsel liegt, durch welches der Beutel gerade befüllt wird (siehe Abbildung 6.4). Dieses Totvolumen soll in seiner Auswirkung auf die Probennahme eingeschätzt werden. Das Totvolumen führt dazu, dass zunächst nur Luft, die schon in der Sammelanlage gestanden hat, in den Beutel gelangt. Der Beutel wird erst dann mit Außenluft gefüllt, wenn durch die Kapillare die Luftmenge, die dem Totvolumen entspricht, eingesaugt wurde. Um abzuschätzen, ob dieser Effekt einen Einfluss auf Ergebnis der Probenahme hat, muss das Totvolumen bestimmt werden.

In das Totvolumen gehen das Innenvolumen der Verbindungsschläuche, der Kapillare, der benutzen Wege des 5/2 Wegeventils, der Pumpe und der Ventilinsel ein. Die Verbindungsschläuche haben einen Innendurchmesser $d = 0,4 \text{ cm}$ und die Längen $l_1 = 38,5 \text{ cm}$, $l_2 = 19,5 \text{ cm}$, $l_3 = 18 \text{ cm}$ und $l_4 = 13,5 \text{ cm}$. Das Innenvolumen aller Verbindungsschläuche beträgt damit $11,25 \text{ cm}^3$. Die Kapillare, die in der Sammelanlage verwendet werden

³Festo; Esslingen; Deutschland: Produktnummer: 34P-MS1-SGEJCG-U12A-12DS 24 V, vgl. [Festo (0904)]

soll, hat einen Innendurchmesser $d = 100 \mu\text{m}$ und eine Länge $l = 2,765 \text{ cm}$. Daraus ergibt sich ein Volumen von $0,00022 \text{ cm}^3$, das so klein ist, dass es vernachlässigt werden kann. Das Innenvolumen der Ventilinsel beträgt ⁴ $20,16 \text{ cm}^3$. Um das Totvolumen des 5/2 Wege Ventils zu ermitteln, wurde die Länge der benutzen Wege abgeschätzt und der Durchmesser des Einlasses bestimmt. Mit diesen Angaben ergibt sich für das 5/2 Wege Ventil ein Totvolumen von ungefähr $1,98 \text{ cm}^3$.

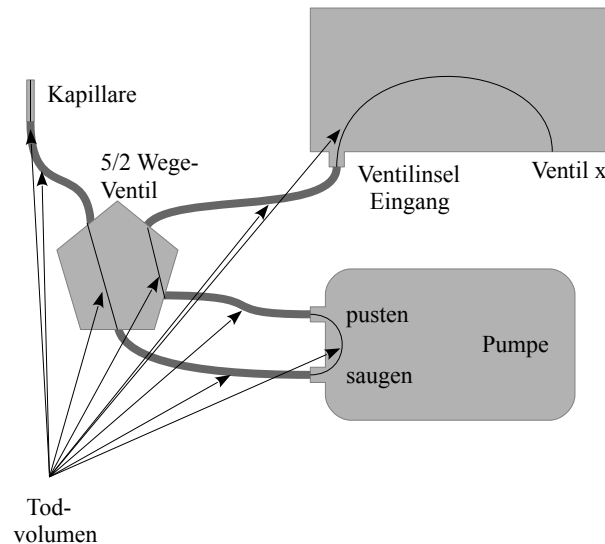


Abbildung 6.4: Skizze des Totvolumens zwischen dem Kapillareingang und dem Ventil x.

Über das Totvolumen der Pumpe liegt von Seiten des Herstellers keine Angabe vor. Deshalb wurde das Totvolumen experimentell bestimmt. Dazu wurde der Ansaugstutzen der Pumpe verschlossen und an dem Ausgang der Pumpe ein Schlauch angeschlossen, der in einen umgekehrten, mit Wasser gefüllten Messbecher führte. Der Luftdruck von 1015 mbar , der während dem Experiment von dem Drucksensor ASDX AC X 030PA 2 A 5 gemessen wurde, wurde von der Pumpe um $153,2 \text{ mbar}$ verringert (vgl. Kapitel 4.2). Nachdem die Spannungsversorgung eingeschaltet wurde, konnte keine Luftblase, die von dem Schlauch in das Reagenzglas aufstieg, beobachtet werden. Diese Beobachtung kann damit erklärt werden, dass es zum einen eine Mindestluftmenge benötigt, um eine Luftblase auszubilden, und dass zum anderen ein Hydrostatischer Druck von etwa 5 mbar , der von der über dem Schlauchende stehenden Wassersäule erzeugt wird, auf die ausströmende Luft wirkt. Über die Annahme, dass $p \cdot V = \text{konstant}$, kann über die folgende Formel das Totvolumen berechnet werden:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad (6.5)$$

⁴laut Gerhard Müller, Abteilung DE-TV; Projektierung Ventile und Ventilinseln; setzt sich das Totvolumen der Ventilinsel wie folgt zusammen: $12 \cdot \text{Volumen Kanal 1 der Anschlussplatte (1440 mm}^3) + 1 \cdot \text{Volumen Kanal 1 des Einspeisemoduls (2880 mm}^3)$

mit $p_1 = 1015 \text{ mbar}$, $V_1 = \text{unbekanntes Totvolumen}$, $p_2 = 1015 \text{ mbar} - 153,2 \text{ mbar}$ und $V_2 = V_1 + 0,13 \text{ ml}$. Das Volumen von 0,13 ml entspricht dem Volumen, das von der Pumpe aufgrund des Hydrostatischen Drucks zusätzlich in den Schlauch gepumpt werden muss, bevor sich eine Luftblase ausbildet. Das Totvolumen der Pumpe kann somit auf ungefähr 0,7 ml abgeschätzt werden, obwohl keine Luftblase aufgestiegen ist.

Für das gesamte Totvolumen ergibt sich somit ein Volumen von $34,09 \text{ cm}^3$. Das sind 2,6 % des Volumens, das am Ende des dreistündigen Sammelvorgangs über die 27,65 mm lange Kapillare gesammelt wurde. Das errechnete Totvolumen wird von der verwendeten Kapillare in ungefähr vier Minuten und 44 Sekunden gesammelt.

Um diese Verzögerung in den Sammelvorgang einzubeziehen, ist es sinnvoll die Messung um vier Minuten und 38 Sekunden verzögert zu starten. unter der Nebenbedingung, dass eine genaue Uhr für das Starten des Sammelvorgangs vorhanden ist, eine genaue Ortsbestimmung des Probenortes möglich ist und dass Informationen darüber vorliegen, wann die Daten für die Wetteraufzeichnung an dem Ort der Probennahme genommen werden. Mit den Nebenbedingungen könnte so erreicht werden, dass die Auswirkung des Totvolumen ausgeglichen wird und damit in allen Luftsammelbeuteln nur Luft aus der dreistündigen Sammelperiode wäre, die den Messzyklus der Wetteraufzeichnung entspricht. Jedoch kann der Effekt des Totvolumens auf den Beutelinhalt des ersten Beutels nicht ausgeglichen werden, sodass sich in dem ersten Beutel weiter 33,39 ml „abgestandene“ Luft befinden würde.

Kapitel 7

Weitere Komponenten

In diesem Kapitel sollen die restlichen Bauteile für die Spannungsversorgung, Prozesssteuerung und Dokumentation eingeführt werden, die in der Luftsammelanlage verwendet werden, und deren Fehler abgeschätzt werden. Außerdem soll der Aufbau des Transportbehälters vorgestellt werden.

7.1 Weitere Bauteile und Fehlerabschätzung

Die Steuerung der Luftsammelanlage übernimmt ein **Arduino Mega 2560**. Der Arduino besteht aus einer Leiterplatte, die mit einem Mikrocontroller ATmega2560 bestückt ist. Der Arduino Mega 2560 verfügt, wie in Abbildung 7.1 zu sehen, über 54 digitale Ein- und Ausgänge und 16 analoge Eingänge, über die er andere Bauteile, wie einen SD-Kartenleser oder ein LCD-Display, ansteuern oder Spannungen einlesen kann. Der Arduino wird über den V_{in} -Pin mit einer Spannung zwischen 7 V-12 V versorgt. Über einen 5 V Spannungsregler schwächt er den Input auf 5 V bzw. über einen anderen Baustein auf 3,3 V ab. Über diese Output-Pins kann der Arduino andere Bauteile der Luftsammelanlage mit Strom versorgen. Über einen USB-Anschluss können die Programme, die in C bzw. C⁺⁺ programmiert werden, überspielt werden und ein Computer kann mit dem Arduino kommunizieren.

Die analogen Eingänge des ATmega2560 haben laut Herstellerangaben einen Fehler von $\pm 2\text{LSB}$ (vgl. [ATMEL (2014)]). LSB steht für Last Significant Bit und entspricht dem geringwertigsten Bit. Da der Spannungsmessbereich von 5 V auf 1024 Stufen aufgeteilt wird, steht ein LSB für $\frac{5\text{V}}{1024} \approx 0,005\text{V}$. Der Fehler des ATmega2560 beträgt also $\pm 0,01\text{V}$.

Die 5 V-Spannung, die von dem Arduino als Betriebsspannung benötigt wird, wird von dem **Spannungsregler NCP1117ST50T3G** erzeugt. Der Arduino nutzt diese auch als Referenzspannung für den integrierten A-D-Wandler. Laut Datenblatt [Semiconductor (2014)] kann die Ausgangsspannung von Spannungsreglern dieses Typs zwischen 4,9 V und 5,1 V variieren. Dies entspricht einem konstanten Fehler von bis zu $\pm 2\%$. Dieser Fehler führt dazu, dass die von dem Arduino gemessenen Werte insgesamt um $\pm 2\%$ verschoben sein können. Diese Spannungsverschiebung kann, wie in Kapitel 5.2 beschrie-

ben, zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen. Aus diesem Grund muss der konstante Fehler bestimmt werden. Die gemessenen Werte müssen jeweils um den Fehler korrigiert werden.

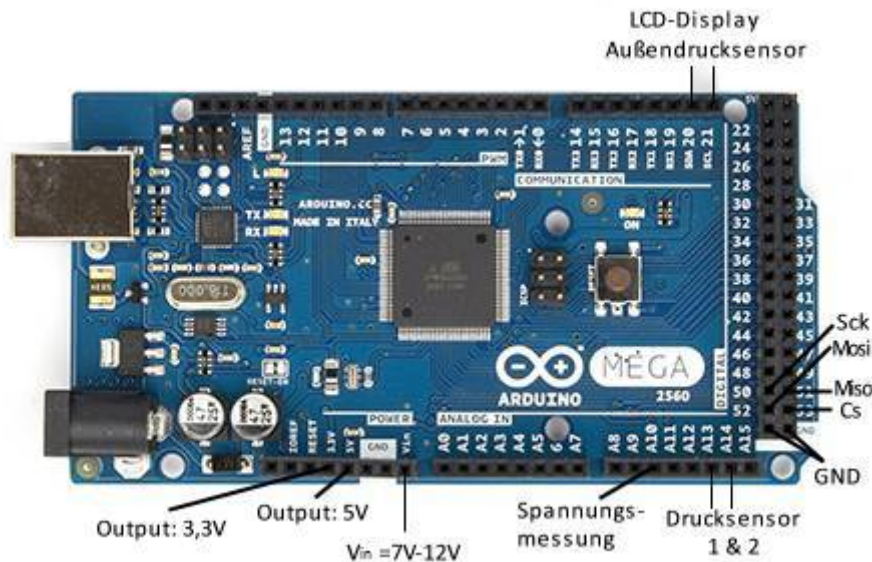


Abbildung 7.1: Pinbelegung des Arduinos.

Ebenfalls zur Steuerung wird das **Schieberegister** des Typs **74HC595N** verwendet. Es soll die Ventile der Ventilinsel ansteuern und damit das Öffnen und Schließen der Ventile übernehmen. Die Ausgänge des Schieberegisters sind jeweils über einen Widerstand mit einem Transistor verbunden. Wenn an einem Ausgang Strom fließt, lässt der dazugehörige Transistor Strom durch die Magnetspule des Ventils fließen. Somit öffnet sich das dazugehörige Ventil (vgl. [Hands (2013)]).

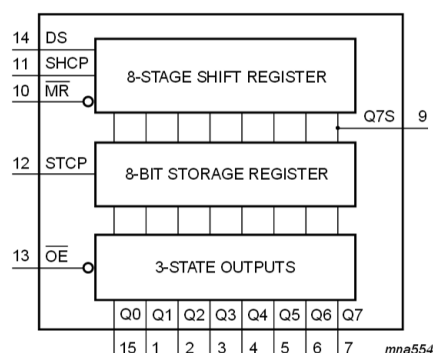


Abbildung 7.2: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Schieberegisters; Abbildung aus [NXP (2014)].

Diese Möglichkeit zur Steuerung der Ventilinsel wurde gewählt, weil nicht genügend

Ports am Arduino vorhanden sind, um die Steuerung der 56 Ventile direkt vorzunehmen. Ein Schieberegister funktioniert wie folgt (siehe Abbildung 7.2). Es kann 1 Byte, also 8 Stellen mit 1 oder 0 besetzt, speichern und setzt dementsprechend seine acht „parallel data output“ Ausgänge bei 1 auf „high“, das heißt, dass ein Strom fließt, oder bei 0 auf „low“, das heißt, dass kein Strom fließt. Die acht Bit des Byte werden dem Schieberegister übermittelt, indem für jedes Bit der SHCP-Pin (shift clock bzw. clock pin) von dem Arduino auf high gesetzt wird und gleichzeitig der Wert für dieses Bit über den DS-Pin (data input) von dem Arduino übermittelt wird. Nachdem die Werte für alle Bits übermittelt wurden, werden die Informationen auf die Ausgänge weiter geschoben, indem der STCP-Pin (storage clock pin) von dem Arduino auf high gesetzt wird.

Ein weiteres Element zu Steuerung der Luftsammelanlage ist die Steuerung der Pumpe (siehe Abbildung B.12 im Anhang). Diese Schaltung sorgt dafür, dass die Pumpe nur dann in Betrieb ist, wenn auch ein Sammelvorgang stattfindet. Dies soll bewerkstelligt werden, indem ein Ausgang des Arduinos auf „high“ gesetzt wird, bevor das erste Ventil geöffnet wird. Sobald eine Spannung am Eingang G (Gate) des Transistors anliegt, kann der Strom zwischen Drain (D) und Source (S) fließen, und der Stromkreislauf, über den die Pumpe versorgt wird, schließt sich. Wenn der Sammelvorgang zu Ende ist und das letzte Ventil geschlossen wurde, soll der Ausgang des Arduinos wieder auf „low“ gesetzt werden. Damit lässt der Transistor keinen Strom mehr zwischen Drain und Source durch und die Pumpe wird vom Strom abgeschaltet.

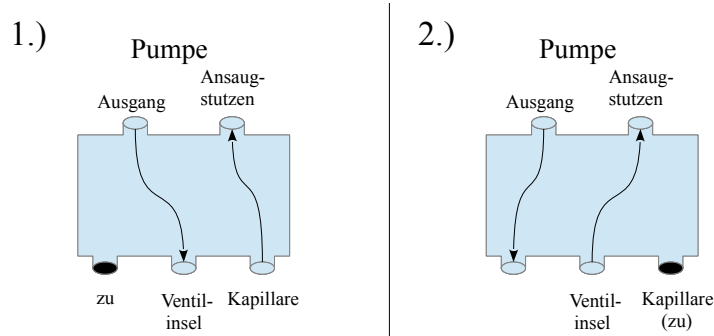


Abbildung 7.3: Schematische Skizze des 5/2 Wegeventils 1.) Befüllvorgang: Die Luft wird von der Kapillare über die Pumpe zu der Ventilinsel geleitet; 2.) Entleervorgang: Die Luft aus den Beuteln wird durch die Ventilinsel über die Pumpe in die Umgebung gepumpt.

Ein weiteres Steuerungselement wird über das 5/2 Wege Ventil und dem Schalter, der in Abbildung B.13 im Anhang zu sehen ist, gesteuert. Nachdem der Sammelvorgang durchgeführt wurde, soll es die Möglichkeit geben, Beutel zum Beispiel als Vorbereitung für die nächste Probennahme wieder leer zu pumpen. Dazu sollen der Hebel des 5/2 Wege Ventils und der Kippschalter umgelegt werden. Indem der Hebel des 5/2 Wege Ventils von „sample“ zu „reset“ geschaltet wird, wird der Ausgang des 5/2 Wege Ventils, der mit der Ausgang der Pumpe verbunden ist, an einen offenen Ausgang geschaltet und der Ansaugstutzen der Pumpe wird mit dem Eingang der Ventilinsel verbunden (siehe Abbildung 7.3). Der Kippschalter setzt einen Input Pin des Arduinos auf high. Dies bewirkt, dass die

Ventilöffnungszeit von 3 Stunden auf 1 Minute und 30 Sekunden abgesenkt wird. Diese Zeitspanne entspricht dem experimentell ermittelten Wert zur vollständigen Entleerung eines vollen Beutels.

Zur Dokumentation der Druckverhältnisse werden **Drucksensoren** des Typs **UNIK 5000** (Typ: A5074-TB-A1-CA-HO-PN) verwendet. Sie sollen zum einen den Unterdruck messen, der zwischen dem Ansaugstutzen der Pumpe und der Kapillare aufgebaut wird, und zum anderen die Druckdifferenz, die zwischen dem Ausgang der Pumpe und dem Eingang der Ventilinsel entsteht, dokumentieren. Der verwendete Typ kann mit einer Betriebsspannung zwischen 7 V und 32 V betrieben werden (vgl. [Solutions (2014)]) und kann für Druckdifferenzen zwischen -1 bar und +1 bar verwendet werden. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, wandeln die Drucksensoren die gemessene Druckdifferenz in eine Spannung um. Die ausgegebene Spannung kann von dem Arduino über einen Analog-Pin eingelesen werden. Die Präzision der Drucksensoren beträgt $\pm 0,04\%$ des Messbereichs. Bei dem verwendeten Typ entspricht dies einem Fehler von $\pm 0,04\% \cdot 5\text{ V} \approx \pm 0,002\text{ V}$. Dieser Fehler wird, wie in Kapitel 5.2 gezeigt, zu dem Fehler des Arduinos addiert.

Um Schwankungen des Außendrucks zu dokumentieren wird der **Drucksensor ASDX AC X 030PA 2 A 5** verwendet. Der Druck wird als digitaler 14-Bit-Wert an einem I²C Bus ausgegeben (vgl. [Semiconductors (2014)]). Um daraus den Druck in mbar zu berechnen, muss folgende Formel verwendet werden: $(\frac{x}{2^{14}} - 0,1) \cdot \frac{30}{0,8} \cdot 68,95$ (vgl. [Honeywell (2014)]). Bei dem Faktor 68,95 handelt es sich um den Umrechnungsfaktor zwischen SPI und Millibar. Dem Datenblatt ist zu entnehmen, dass der Drucksensor mit einem Fehler von maximal $\pm 2\% \cdot 16384 \approx 51,7\text{ mbar}$ behaftet ist.

Der **Feuchtigkeits- und Temperatursensor DHT11** soll Schwankungen der Temperatur und der Feuchtigkeit dokumentieren, damit bei der Auswertung der Daten beispielsweise Volumenschwankungen erklärt werden können. Der DHT11 hat laut Datenblatt [Aosong (2014)] bei der Messung der Feuchtigkeit bei einer Temperatur von 25 °C eine Genauigkeit von $\pm 5\%$ RH. Dabei steht RH für Relative Humidity, also für die relative Feuchtigkeit, die in Prozent angibt, in welchem Maße die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. Der Fehler bei der Messung der Temperatur beträgt 25 °C ± 2 °C .

Um zu dokumentieren, wie stark die Akkus während des Sammelvorgangs entladen werden, soll die Ausgangsspannung der Akkus über einen analogen Eingang des Arduino gemessen und zur Dokumentation auf die SD-Karte geschrieben werden. In Abbildung B.14 im Anhang ist der Spannungsteiler zu sehen, der die Spannung um den Faktor 10 reduziert, damit sie innerhalb des Messbereichs des Arduino liegt und von ihm ausgelesen werden kann.

Der **SD-Kartenleser** soll dazu verwendet werden den Ablauf des Luftsammelvorgangs zu dokumentieren. Über ihn sollen zum einen die Daten der verschiedenen Sensoren und zum anderen Informationen über den Ablauf des Programms auf einer SD-Karte gespeichert werden. Nach der Probenahme, die vollautomatisch abgelaufen ist, ist es so möglich, mit Hilfe der gespeicherten Daten den Inhalt der Sammelbeutel mit dem Ablauf der Probenahme in Verbindung zu setzen. Der Luftdruck, die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit haben einen Einfluss auf die Zusammensetzung des Beutelinhalts.

Um auch während des Probenahme-Vorgangs Informationen über den Zustand des Sys-

tems zu erhalten, sollen verschiedene Informationen auf dem **LCD-Display** angezeigt werden (siehe Abbildung 7.4). Es soll angezeigt werden, ob die Probennahme noch in Gang ist, welches Ventil wie lange offen ist und welche Luftfeuchtigkeit, Temperatur und welcher Luftdruck momentan vorliegen.



Abbildung 7.4: Photographie des LCD-Displays.

7.2 Spannungsversorgung

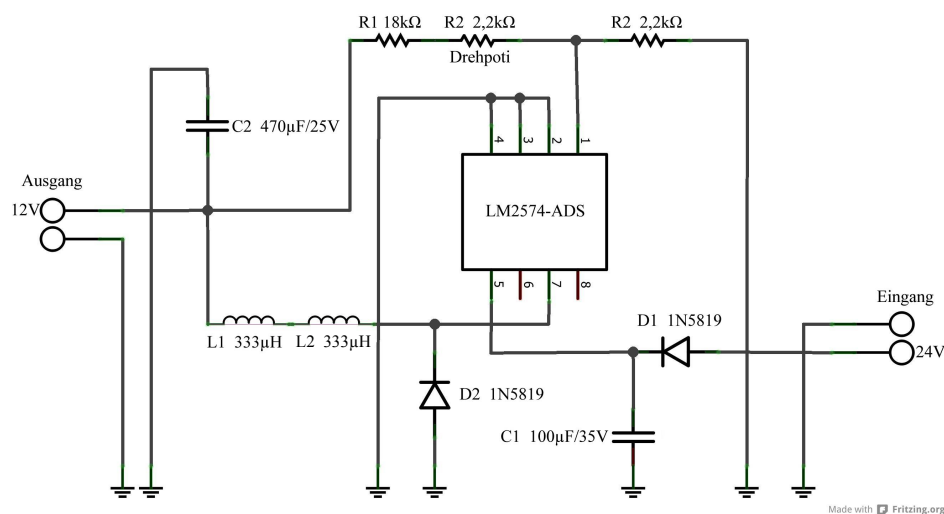


Abbildung 7.5: Schaltskizze der Spannungsversorgung der Pumpe

Die Stromversorgung der Luftsammelanlage erfolgt über zwei in Reihe geschaltete 12 V-Blei-Gel-Akkus mit einer Kapazität von je 80 Ah (vgl. [GEL (2014)]). Diese werden über ein USV-Modul (Ununterbrechbare-Stromversorgungs-Modul) überwacht und geladen, wenn eine 115 bis 230 V-Spannung vorhanden ist. Die Besonderheit eines USV-Moduls ist, dass es die Stromversorgung übernimmt, während es parallel die Akkus auflädt. Einer weiter Vorteil ist, dass es die Akkus vor Tiefentladung schützt. Zur Versorgung der verschiedenen Bauteile werden drei unterschiedliche Versorgungsspannungen benötigt. An

der Ventilinsel liegt eine Spannung von 24 V an. Die Pumpe benötigt eine Versorgungsspannung von 12 V, der Arduino kann mit einer Spannung zwischen 7 V und 12 V und die Drucksensoren des Typs UNIK 5000 mit einer Spannung zwischen 7 und 32 V betrieben werden und der SD-Kartenleser, das LCD-Display, der Drucksensor (ASDX AC X 030PA 2 A 5), der zur Vermessung der Luftdruckschwankungen verwendet wird, und der Feuchtigkeits- und Temperatursensor benötigen eine 5 V-Spannung. Die 5 V Spannung wird von dem Arduino über einem 5 V Spannungsregler (siehe 7.1) aus der 12 V-Spannung erzeugt.

Die Pumpe, der Arduino und die Drucksensoren des Typs UNIK 5000 sollen mit einer 12 V-Versorgungsspannung betrieben werden. Die 12 V-Spannungsversorgung kann auf verschiedene Wege geleistet werden. Die 12 V-Spannung könnte von einem der beiden in Reihe geschalteten Akkus abgegriffen werden oder sie könnte entweder mit Hilfe eines Schaltreglers oder mit Hilfe eines Linearreglers erzeugt werden. Für die Spannungsversorgung wurde ein Schaltregler wie in Abbildung B.3 ausgewählt, weil es bei der Alternative eines Linearreglers zu einem großen Leistungsverlust gekommen wäre und weil, wenn die 12 V-Spannung direkt von einem der 12 V-Akkus abgegriffen worden wäre, es dabei zu ungleichmäßigen Entladungen gekommen wäre und damit die Kapazität der Akkus ineffizient ausgenutzt würde. Bei einem Linearregler sind der Eingangsstrom und der Ausgangsstrom gleich groß. Der Verlust der über dieser Schaltung entstehen würde, ergibt sich aus der Spannungsdifferenz, in diesem Fall $\Delta U = 24 \text{ V} - 12 \text{ V} = 12 \text{ V}$, multipliziert mit dem Eingangsstrom. Bei einem Linearregler wäre damit die Verlustleistung genauso groß wie die verwendete Leistung. Die Effizienz¹ dieser Schaltung beträgt somit nur 0,5. Diese Möglichkeit ist deshalb nur rentabel, wenn ein kleiner Strom benötigt wird. Die Pumpe arbeitet mit einem Strom von 400 mA, und die restlichen Bauteile verbrauchen einen Strom von 120 mA. Den größten Anteil verbrauchen der Arduino (~80 mA) und das über den Arduino mit 5 V versorgte LCD-Display (~35 mA). Die restlichen Bauteile haben nur einen minimalen Stromverbrauch. Auch wenn die Pumpe über eine separate Spannungsversorgung betrieben würde, würden ca. 20 Ah während der Probennahme (in einer Woche) ungenutzt verbraucht. Bei einer Kapazität der Akkus von 80 Ah ist der Verlust bei der Verwendung eines Linearreglers zu groß.

Der Vorteil eines Schaltreglers ist, dass der Eingangsstrom unter idealen Bedingungen $\frac{1}{n}$ des Ausgangsstroms beträgt, abhängig davon um welches n-fache die Eingangsspannung durch den Baustein reduziert wird. In der verwendeten Schaltung wäre der theoretische Eingangsstrom eines idealen, verlustfreien Reglers $\frac{0,52}{2} \text{ A}$. Da für den Eingangsstrom 0,3 A gemessen wurden, ergibt sich für den Schaltregler eine Effizienz von 0,87. Für den Probennahmezeitraum von einer Woche ergibt sich daraus ein Stromverbrauch von 50,4 Ah.

Um einzuschätzen, wie sich der 12 V-Spannungsregler unter Last verhält und ob es ebenfalls zu einem starken Spannungsabfall wie bei der 12 V Versorgung, die in Abschnitt 4.2 verwendet wurde, kommt, wurde die Ausgangsspannung des 12 V-Spannungsreglers unter Last (Pumpe etc. war angeschlossen) über einen Spannungsteiler (siehe Abbildung B.4) von dem Arduino gemessen und auf der SD-Karte gespeichert. In Abbildung 7.6 ist

¹ $\frac{U_{\text{Ausgang}} \cdot I_{\text{Ausgang}}}{U_{\text{Eingang}} \cdot I_{\text{Eingang}}}$

die gemessenen Spannung über die Zeit aufgetragen. Die Messwerte wurden jede Sekunde über ungefähr 54 Minuten genommen. Durch die Messwerte wurde ein exponentieller Fit gelegt, weil angenommen wurde, dass sich das System auf einen stabilen Endwert einpendelt. Der exponentielle Fit zeigt, dass kein Abfall der Spannung stattgefunden hat, stattdessen ist die Spannung in den ersten 1000 Sekunden bzw. 16 Minuten leicht angestiegen. Dieser Effekt ist mit der Erwärmung des 5 V-Spannungsreglers des Arduinos, der die Referenzspannung für den A-D-Wandler erzeugt, zu erklären. Wenn sich der 5 V-Spannungsregler erhitzt, sinkt die ausgegebene Referenzspannung leicht ab. Aus diesem Grund sind die von dem Arduino gemessenen Werte zu hoch.

Wie in Kapitel 4.2 kann aus der Differenz der tatsächlich anliegenden Spannung und der, die von dem Arduino gemessen wird, der konstante Fehler des 5 V-Spannungsreglers berechnet werden. Über einen exponentiellen Fit wurde der Spannungswert, auf den sich der 12 V-Spannungsregler einpendelt, auf 11,83 V ermittelt. Die Abweichung von 0,17 V entspricht einem Fehler von -1,42 % (siehe Abbildung 7.6). Dieser Fehler ist etwas geringer als der, der in Kapitel 4.2 bestimmt wurde. Dieser Abweichung kann mit dem Fehler über die Langzeit-Stabilität über 1000 Stunden („longterm stability“), der im Datenblatt [Semiconductor (2014)] mit $\pm 0,3\%$ angegeben wird, erklärt werden. Außerdem ist die Ausgangsspannung des 5 V-Reglers lastabhängig. Damit die Ergebnisse aus den vorherigen Versuchen vergleichbar mit den folgenden bleiben, wird der in Kapitel 4.2 ermittelte Korrekturfaktor weiter verwendet.

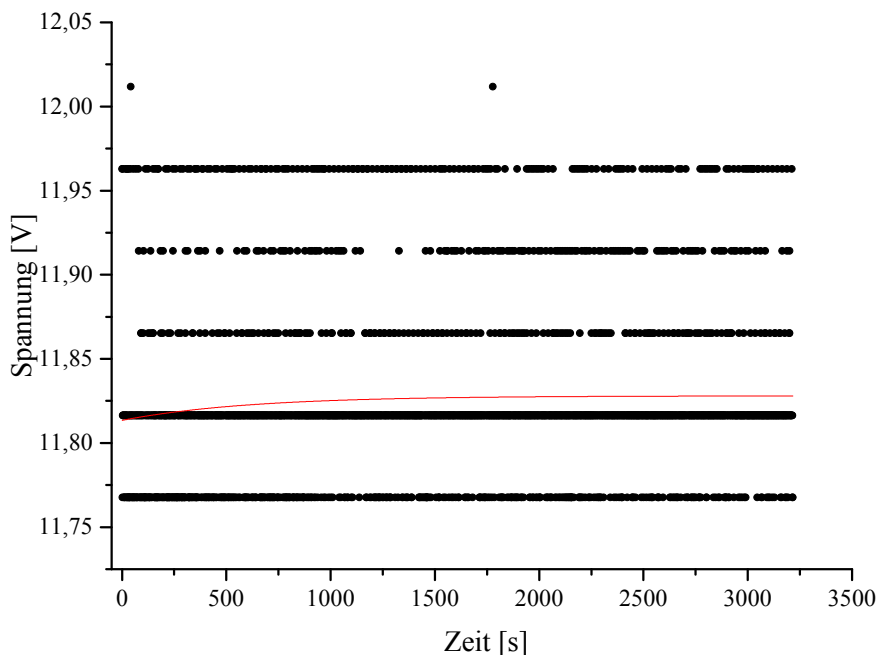


Abbildung 7.6: Spannungsmessung der 12 V-Versorgungsspannung über ungefähr 54 Minuten; Messwerte und dazugehöriger exponentieller Fit (rot): $f(x) = -0,01 \text{ V} \cdot e^{\frac{-x}{608,8 \text{ s}}} + 11,83 \text{ V}$; laut dem Fit pendelt sich die Spannung bei 11,83 V ein.

Die oben beschriebene Schaltung führt jedoch zu Spannungsspitzen in Kombination mit der Pumpe. Der Grund dafür ist, dass die Motorwicklungen des Motors der Pumpe wäh-

rend der Rotation periodisch umgeschaltet werden. Dies hat zur Folge, dass der Strom kurzfristig unterbrochen ist und damit der Laststrom des Schaltreglers schlagartig absinkt. Der Spulenstrom L_1/L_2 fließt jedoch weiter und lädt den Kondensator C2 auf (siehe B.3). Nachdem die Motorwicklungen der Pumpe umgeschaltet wurden und wieder Strom benötigt wird, entlädt sich der Kondensator C2 und es kommt zu einer Spannungsspitze von ~ 200 mV. Diese Spannungsschwankungen könne bei den anderen Bauteilen zu Störungen führen. Bei den Drucksensoren wurde beispielsweise mit Hilfe eines Oszilloskops gemessen, wie sie auf die von der Pumpe erzeugten Spannungsspitzen reagieren. Es wurde festgestellt, dass diese Spannungsspitzen ebenfalls in der Ausgangsspannung der Drucksensoren zu bemerken waren. Aus diesem Grund wird eine separate 12 V-Spannungsversorgung für die Pumpe verwendet (identisch mit B.3). Als Nebeneffekt dieser Maßnahme ist es möglich die restlichen Bauteile (der Arduino und die Drucksensoren UNIK 5000) mit einer 8 V- anstatt einer 12 V-Spannung zu versorgen. Dies hat den Vorteil, dass der 5 V-Spannungsregler des Arduinos eine geringere Verlustleistung hat und damit die gesamte Leistungsaufnahme der Luftsammelanlage reduziert wird.

7.3 Aufbau der Transportbox

Die Luftsammelanlage soll, damit sie transportabel ist, komplett in einer Transportbox untergebracht werden. Für die Befestigung der Elektronik, der Pumpe und der Ventilseln wird ein Mittelsteg in der Transportbox angebracht. Dabei wird die Elektronik von einem transparenten Klappdeckel vor Feuchtigkeit und Kondenswasser geschützt. Damit das LCD-Display und das SD-Kartenlesegerät leicht bedient werden können, wird die Elektronik vorne auf dem Mittelsteg befestigt. Die Akkus werden aus Stabilitätsgründen an den Rand der Box gestellt. Die Luftsammelbehälter werden links und rechts vom Mittelsteg auf dem Boden der Transportbox gelegt.

In eine Außenwand der Transportbox wird eine 230 V-Einspeisesteckdose für die Aufladung der Akkus über das USV-Modul eingefügt.

Für die Kapillare, den Feuchtigkeits-, Temperatur und Außendrucksensor wird eine Öffnung in die Vorderseite der Transportbox geschnitten, die mit einem feinen Gitter verschlossen wird. Um zu verhindern, dass Wasser durch die Öffnung in das Innere der Box gelangt, wird um diese von der Innenseite eine kleine, rechteckige Abdeckung befestigt, deren offene Seite in Richtung der Öffnung zeigt. Ein weiterer Vorteil ist, dass so sichergestellt werden kann, dass die Kapillare nicht Luft aus der Transportbox einsaugt, sondern Außenluft gesammelt wird.

Um die Belüftung des Batterieraums zu gewährleisten, muss laut DIN EN 50272-2 [2] der Mindestquerschnitt zur Belüftung des Batterieraums für die verwendeten Akkus $9,8 \text{ cm}^2$ (vgl. [EXIDE (2007)]) betragen². Aus diesem Grund werden in zwei Außenwände der Transportbox Öffnungen in der Größe von $9,8 \text{ cm}^2$ eingefügt.

²Lüftungsanforderung: $Q = 0,05 \cdot n \cdot I_{gas} \cdot C_N \cdot 10^{-3} [\text{m}^3/\text{h}]$ mit n =Anzahl der Zellen, $I_{gas} = I_{float}$ oder boost [mA/Ah] relevant für die Gasentwicklung und C_N =Kapazität C_{10} für Bleibatterien; $A \geq 28 \cdot Q [\text{cm}^2]$ mit A =Mindestquerschnitt für die Einlass und Auslassöffnung

Für die Druckluftversorgung der Ventilinsel wird ein 2,5 l großer Druckluftbehälter verwendet, der unter einem Druck von 11 bar steht. Über ein Druckregler wird der Druck auf die von der Ventilinsel benötigten 5 bar herunter geregelt. Zusätzlich verfügt der Druckluftbehälter noch über einen Anschluss zum Befüllen. Um Komplikationen mit Kondenswasser zu verhindern, soll für Druckluftversorgung idealer Weise Stickstoff verwendet werden.

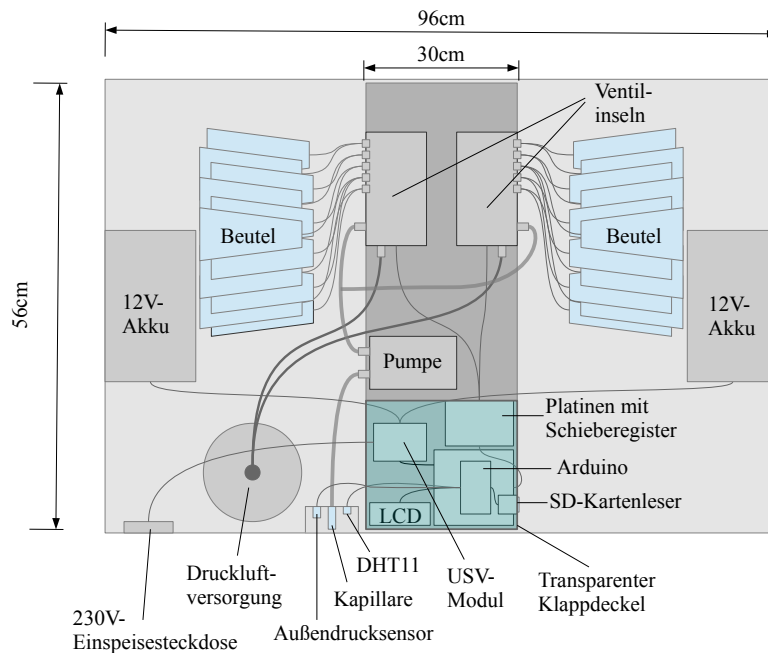


Abbildung 7.7: Schematische Skizze der Transport-Box

7.4 Steuerung

Das Programm (siehe Abbildung B.15 im Anhang), über das der Arduino die Luftsammelanlage steuert, ist dafür zuständig, die Ventile der Ventilinsel zu steuern, die Informationen der verschiedenen Sensoren auszulesen und zur Dokumentation auf die SD-Karte zu schreiben und über das LCD-Display die Visualisierung des Prozessverlaufs vorzunehmen. Zu Beginn des Programms wird die Pumpe über den in Abschnitt 7.1 beschriebene Aufbau eingeschaltet und am Ende, nachdem alle Ventile geöffnet wurden und damit alle Beutel gefüllt wurden, wieder ausgeschaltet. Dazwischen werden über Schleifen die Programmteile zur Steuerung, Dokumentation und Kommunikation aufgerufen. Alle drei Stunden wird das momentan offene Ventil geschlossen und das nächste Ventil für drei Stunden geöffnet. Alle fünf Minuten wird die Spannung des Akkus ausgelesen und dokumentiert. Jede Minute werden die Messwerte der Drucksensoren und des Feuchtigkeits- und Temperatursensors ausgelesen und gespeichert. Auf dem LCD-Display wird angezeigt, [SD-Karte gefunden] welches Ventil, wie lange (in Minuten) offen ist und welche Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Außendruck gerade gemessen werden. Diese Informa-

tionen werden ebenfalls jede Minute aktualisiert.

Die Bedingungen der If-Schleifen, die die einzelnen Programmteile aufrufen, wurden nach demselben Prinzip aufgebaut. Über die Bedingung „*millis()* – $n_X \cdot t_X > 0$ “ wird jede If-Schleife nur alle Zeit t_X ausgeführt. Der Befehl *millis()* zählt die Millisekunden, die vergangen sind, seitdem das Hauptprogramm gestartet wurde. Damit die Bedingung „*millis()* – $n_X \cdot t_X > 0$ “ nur alle t_X Millisekunden erfüllt ist, wird n_X zunächst auf 0 gesetzt und, nachdem das Programm in der If-Schleife durch gelaufen ist, über den Befehl n_X++ um eins auf $n_{X\text{neu}} = n_X + 1$ erhöht. Somit ist die If-Bedingung nur alle t_X Millisekunden erfüllt.

Die Programme, die in den If-Schleifen stehen, können auf drei verschiedene Strukturen reduziert werden. Zum einen gibt es die Programmstruktur, über die ein Pin/Port von dem Arduino ausgelesen und auf die SD-Karte gespeichert wird. Über den Befehl „*myFile = SD.open("X.txt", FILE_WRITE)*“ wird eine Textdatei auf der SD-Karte geöffnet und über den Befehl „*myFile.print(X)*“ wird X in die Datei geschrieben. Bei X handelt es sich meistens um einen Wert, der an einem Pin des Arduinos, ausgelesen wurde. Zum Beispiel über den Befehl „*analogRead(..)*“.

Eine andere Programmstruktur ist die, die zur Steuerung des LCD-Displays verwendet wird. Dabei wird über den Befehl „*lcd.setCursor(a,b)*“ bestimmt, in welcher Reihe b an welcher Position a der Cursor des LCD-Displays starten soll, und über den Befehl „*lcd.print(..)*“, was dort hingeschrieben werden soll. Dabei kann über diesen Befehl der Wert einer Variablen (z.B. n_X) oder ein vorgegebener Text geschrieben werden.

Die dritte Programmstruktur wird dazu verwendet, um die Ventile der Ventilinsel anzusteuern. Dazu wurde die Funktion „*ventilFunktion(int a, int b)*“ definiert, über die gesteuert werden kann, welches Ventil a geöffnet ($c = 1$) oder geschlossen ($c = 0$) werden soll. Die Funktion verwendet dazu den Befehl „*bitWrite(a, b, c)*“ über die bestimmt werden kann, in welchem Byte a das Bit b auf 0 oder 1 (c) gesetzt werden soll. Aufgrund der unterschiedlichen Steckerbelegung der Ventilinsel und der Platine entspricht die Reihenfolge der Ausgänge der Schieberegister, und damit auch die Bits in den verschiedenen Bytes, nicht der fortlaufenden Nummerierung der Ventile. Der erste Ausgang (Bit 0 von Byte 1) gehört beispielsweise zu Ventil 15. Um dieses Durcheinander zu ordnen wurde die Menge *int ven_beleg[X]* definiert. X steht dabei für das Ventil das geöffnet oder geschlossen werden soll und über die Menge wird ihm der entsprechende Ausgang zugeordnet. Über den Befehl „ $x = (\text{vent_beleg}[X] - 1) \% 8$ “ wird Ausgangszahl durch acht mit Rest geteilt und der Rest ist das Ergebnis x . Das Ergebnis x gibt damit das Bit b an das über den Befehl *bitWrite* verändert werden soll. Über den Befehl „ $a_1 = \frac{\text{vent_beleg}[X]}{8}$ “ wird ausgerechnet in welchem Byte a das Bit b liegt, das zu dem Ausgangswert des Ventils gehört.

Kapitel 8

Test des Gesamt-Systems

In diesem Kapitel werden zwei Tests durchgeführt mit deren Hilfe überprüft wird, ob zum einen über die dreistündige Probennahme konstant die gleiche Menge Luft in den Beutel, der gerade befüllt wird, gelangt und ob zum anderen die gesamte Anlage während eines mehrtägigen Testlaufs funktioniert.

8.1 Gleichmäßiger Fluss in den Beutel

Um abschätzen zu können, ob über den gesamten Zeitraum der Probennahme konstant die gleiche Menge Luft in den Beutel gelangt, wurde ein Beutel mit reinem Argon während verschiedener Phasen der Probennahme jeweils für eine Stunde mit der Mutter der Fitting-Verbindung, in der die Kapillare festgezogen war, verbunden (siehe Abbildung 8.1). So konnte erreicht werden, dass anstatt Luft nur das Edelgas in den Beutel gesaugt wurde. Mit Hilfe des Quadrupolmassenspektrometers wurde anschließend die prozentuale Konzentration von Argon in der Luftprobe ermittelt. Bei einem gleichmäßiger Fluss über die gesamte Zeit müsste sich in jedem Beutel die gleiche Menge Argon befinden.



Abbildung 8.1: Verbindung des Argonbeutel mit der Mutter der Fitting-Verbindung, in der die Metallkapillare eingezogen ist.

Während einer Luftsammelperiode von drei Stunden wurde während der ersten Stunde ein Beutel, der mit reinem Argon gefüllt war, über die Kapillare gestülpt. Nach der ersten Stunde wurde der Beutel wieder entfernt und der Sammelvorgang normal zu Ende geführt.

In der zweiten Sammelperiode wurde der Vorgang wiederholt, nur wurde diesmal der Beutel mit Argon während der zweiten Stunde an der Kapillare befestigt. Ebenso wurde in der dritten Sammelperiode während der dritten Stunde nur Argon angesaugt.

Bei einem gleichmäßigen Volumenfluss während des dreistündigen Sammelvorgangs sollte in jeder Luftprobe die Argonkonzentration ungefähr $\frac{2 \cdot 381,6 \text{ ml} \cdot 0,93\% + 330,1 \text{ ml} \cdot 100\%}{2 \cdot 381,6 \text{ ml} + 330,1 \text{ ml}}$ betragen. Der Faktor 381,6 ml entspricht dem Luftvolumen, das bei einer Kapillare mit einem Innendurchmesser von 104 μm und einer Länge von 25,2 mm innerhalb einer Stunde gesammelt wird (vgl. Kapitel 5.3). Der Faktor 330,1 ml berücksichtigt den aufgrund der größeren dynamischen Viskosität von Argon ($\eta_{\text{Argon}} = 21 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) verringerten Volumenfluss.

Zum Zeitpunkt des Versuches war das QMS noch nicht kalibriert. Deshalb können die prozentualen Konzentrationen nur als Tendenz angesehen werden. Es muss davon ausgegangen werden, dass die ermittelten Konzentrationen jeweils mit einem Fehler von mehreren Prozent behaftet sind. Bei der Analyse der Umgebungsluft hat sich herausgestellt, dass das QMS die Argonkonzentration etwas erhöht anzeigt im Vergleich zu der theoretisch erwarteten Wert (siehe Kapitel 6.1.3). Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass die Argonkonzentration bei den Analysen der Beutelinhalte ebenfalls etwas erhöht ist im Vergleich zu der Konzentration, die mit einem kalibrierten QMS aufgenommen worden wäre.

In den Tabellen 8.1 bis 8.5 sind die Messergebnisse von jeweils einem Messdurchgang eingetragen. Bei drei der sechs Messungen ergab die Analyse des Beutelinhalts eine Argonkonzentration, die im Bereich der Vorhersage lag.

In Tabelle 8.1 sind die Messergebnisse von einer Luftprobe, bei der in der ersten Stunde ein Argonbeutel angeschlossen wurde, eingetragen. Da der Argonbeutel für 1 Stunde und 17 Minuten angeschlossen war, ist eine Argonkonzentration von $\frac{381,6 \text{ ml} \cdot 0,93\% + (381,6 \text{ ml} - 17 \text{ min} \cdot 6,4 \frac{\text{ml}}{\text{min}}) \cdot 0,93\% + (330,1 \text{ ml} + 17 \text{ min} \cdot 5,5 \frac{\text{ml}}{\text{min}}) \cdot 100\%}{381,6 \text{ ml} + 273,5 \text{ ml} + 423,6 \text{ ml}} = 39,8\%$ zu erwarten.

Über das QMS wurde eine Konzentration von 42,6 % Argon ermittelt.

Tabelle 8.1: Bestimmung der prozentualen Zusammensetzung der Luft aus einem Messdurchgang, bei dem während der ersten Stunde der Beutel mit reinem Argon angeschlossen war.

Elemente	Luft aus dem Beutel (1h 17min am Anfang) [%]
N ₂	43,67
O ₂	13,69
Ar	42,62
CO ₂	$449 \cdot 10^{-4}$

Die Messwerte in Tabelle 8.2 gehören zu einer Luftprobe, bei der während der zweiten Stunde der Argonbeutel angeschlossen war, und es wäre eine Argonkonzentration $\frac{2 \cdot 381,6 \text{ ml} \cdot 0,93\% + 330,1 \text{ ml} \cdot 100\%}{2 \cdot 381,6 + 330,1} = 30,8\%$ in der Luftprobe zu erwarten. Die Argonkonzentration, die mit Hilfe des QMS ermittelt wurde, beträgt 35,8 %.

Tabelle 8.2: Bestimmung der prozentualen Zusammensetzung der Luft aus einem Messdurchgang, bei dem während der zweiten Stunde der Beutel mit reinem Argon angeschlossen war.

Elemente	Luft aus dem Beutel (1h in der Mitte) [%]
N ₂	48,8
O ₂	15,3
Ar	35,8
CO ₂	$473,8 \cdot 10^{-4}$

In Tabelle 8.3 sind die Messergebnisse für eine Luftprobe eingetragen, bei der während der ersten Stunde der dreistündigen Sammelperiode der Argonbeutel über die Kapillare gestülpt war. Die Luftprobe sollte eine Argonkonzentration von 30,8 % enthalten. Über das QMS wurde bei der ersten Messung eine Argonkonzentration von 34,8 % und bei der Vergleichsmessung eine Argonkonzentration von 36,2 % ermittelt. Der Durchschnitt der beiden Konzentrationen ist 35,5 %.

Tabelle 8.3: Bestimmung der prozentualen Zusammensetzung der Luft aus einem Messdurchgang, bei dem während der ersten Stunde der Beutel mit reinem Argon angeschlossen war.

Elemente	Luft aus dem Beutel [%]	Luft aus dem Beutel (Vergleichsmessung) [%]
N ₂	$48,9 \pm 0,2$	$47,9 \pm 0,14$
O ₂	$16,2 \pm 0,03$	$15,9 \pm 0,06$
Ar	$34,8 \pm 0,3$	$36,2 \pm 0,1$
CO ₂	$0,47 \pm 0,003$	$0,46 \pm 0,003$

Bei den Analysen der anderen zwei Beutel wurden Argonkonzentrationen gemessen, die nicht den Vorhersagen entsprachen. Jedoch konnten die Ergebnisse rechnerisch nachvollzogen werden.

Tabelle 8.4: Bestimmung der prozentualen Zusammensetzung der Luft aus einem Messdurchgang, bei dem während der zweiten Stunde der Beutel mit reinem Argon angeschlossen war.

Elemente	Luft aus Beutel (1h in der Mitte) [%]
N ₂	$46,37 \pm 1,2 \cdot 10^{-6}$
O ₂	$14,61 \pm 5,73 \cdot 10^{-7}$
Ar	$38,98 \pm 1,25 \cdot 10^{-6}$
CO ₂	$441,7 \cdot 10^{-4} \pm 1,16 \cdot 10^{-8}$

Die Analyseergebnisse der Luftprobe, bei der während der zweiten Stunde Argon angesaugt wurde, sind in Tabelle 8.4 eingetragen. Nach der Vorhersagen sollten sich in der Luftprobe 30,8 % Argon befinden. Die Analyse ergab, dass sich 38,98 % Argon in der

Probe befanden. Dass sich die Konzentration von Argon um ~8 % unterscheidet, kann damit erklärt werden, dass vor dieser Sammelperiode ein Urinbeutel in der letzten Stunde der Sammelperiode mit Argon befüllt wurde. Da die Anlage ein Totvolumen von 34,09 ml (siehe Kapitel 6.5) hat, war dort reines Argon im System vorhanden, als die nächste Messung begann. Aus diesem Grund ist eine Argonkonzentration von
$$\frac{381,6 \text{ ml} \cdot 0,93 \% + (381,6 - 34,09) \text{ ml} \cdot 0,93 \% + (330,1 + 34,09) \text{ ml} \cdot 100 \%}{2 \cdot 381,6 \text{ ml} + 330,1 \text{ ml}} = 33,9 \% \text{ nachvollziehbar.}$$

In Tabelle 8.5 sind die Messergebnisse einer Luftprobe, bei der während der dritten Stunde der Argonbeutel angeschlossen war, eingetragen. In der Luftprobe aus diesem Beutel sollte eine Argonkonzentration von 30,8 % gemessen werden. Die Analyse mit dem QMS ergab 29,41 %. Diese Abweichung kann damit erklärt werden, dass bei der ersten Messung 90 % Argon von dem QMS detektiert wurden. Da in den Beutel in der letzten Stunde nur Argon gelangte, wurde diese hohe Konzentration darauf zurückgeführt, dass sich im Schlauch des Urinbeutels nur Argon befand. Um an die durchmischte Probe im Beutel zu gelangen, wurde deshalb vor der nächsten Messung mit dem QMS der Schlauch leergepumpt. Das Volumen des Schlauchs, der einen Durchmesser von 4,4 mm und eine Länge von 80 cm hat, beträgt 12,2 ml. Mit dem fehlenden Volumen Argon wäre eine Konzentration von
$$\frac{2 \cdot 381,6 \text{ ml} \cdot 0,93 \% + (330,1 - 12,2) \text{ ml} \cdot 100 \%}{2 \cdot 381,6 \text{ ml} + 330,1 \text{ ml} - 12,2 \text{ ml}} = 30,1 \%$$

Tabelle 8.5: Bestimmung der prozentualen Zusammensetzung der Luft aus einem Messdurchgang, bei dem während der dritten Stunde der Beutel mit reinem Argon angeschlossen war.

Elemente	Luft aus Beutel (1h am Ende) [%]
N ₂	$53,36 \pm 5,9 \cdot 10^{-7}$
O ₂	$17,19 \pm 1,11 \cdot 10^{-6}$
Ar	$29,41 \pm 4,3 \cdot 10^{-7}$
CO ₂	$508 \cdot 10^{-4} \pm 3,79 \cdot 10^{-8}$

Ein Vergleich der fünf Messungen zeigt, dass die vom QMS bestimmten Argonkonzentrationen die vorhergesagten Werte jeweils um etwa 5 % übersteigen. Dies legt nahe, von einer systematischen Verzerrung auszugehen. Aus diesem Grund können die Messungen als Indiz dafür gesehen werden, dass über drei Stunden ein weitgehend konstanter Volumenfluss stattfindet.

Um diesen Aspekt genauer zu untersuchen, müssten die durchgeführten Messungen mit einem kalibrierten QMS wiederholt werden.

8.2 Test der Gesamtanlage

Um die Funktionsweise der gesamten Anlage zu überprüfen, wurde ein mehrtägiger Sammelvorgang durchgeführt. Dabei entsprach das Programm dem, das später während des Dauereinsatzes der Luftsammelanlage verwendet werden soll. Während des Sammelvorgangs, der ungefähr 69 Stunden dauerte, wurde der Druck zwischen der Pumpe und der

Kapillare, der Außendruck, die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur minütlich gemessen und auf der SD-Karte gespeichert. Nach der Probennahme wurden die Daten von der SD-Karte graphisch ausgewertet und das Luftvolumen in den Urinbeuteln gemessen.

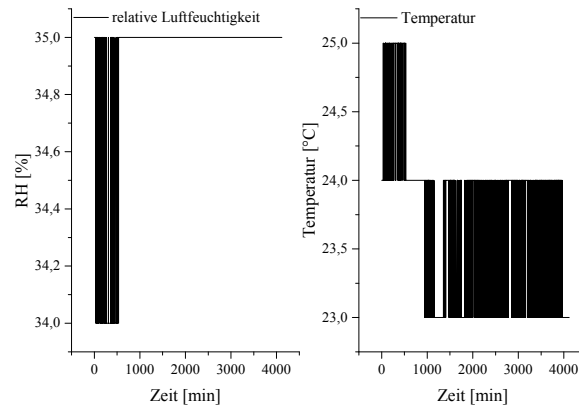


Abbildung 8.2: Messwerte des Feuchtigkeits- und Temperatursensors.

In Abbildung 8.2 sind die Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen eingetragen. Die Temperatur schwankt zwischen 23 und 25 °C und die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 34 und 35 % . Dass keine größeren Schwankungen aufgezeichnet wurden, liegt daran, dass der Testdurchlauf im Labor durchgeführt wurde. Das Labor wird über ein gebäudeinternes Belüftungssystem belüftet und beheizt. Aus der Abbildung kann man ebenfalls entnehmen, dass die Auflösung des Sensors 1% bei der relativen Luftfeuchtigkeit und 1°C bei der Temperatur beträgt.

In Abbildung 8.3 sind die Messwerte des Luftdrucks, die über den Drucksensor jede Minute gemessen wurden, eingetragen. Um die Aussagekraft der Messwerte einschätzen zu können, wurden die Druckwerte, die an der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Fuhlsbüttel über den selben Zeitraum jede Stunde aufgenommen wurden, in Abbildung 8.4 dargestellt

Der Verlauf des Luftdrucks in beiden Abbildungen ist nahezu identisch. Bei dem Vergleich der absoluten Werte fällt auf, dass die Druckwerte, die von dem Drucksensor im Labor genommen wurden, alle konstant um einige Millibar nach oben verschoben sind. Die Wetterstation des DWD in Fuhlsbüttel liegt 11 Meter über dem Nullniveau. Wenn sich der Drucksensor näher am Nullniveau befunden hat, könnte damit die leichte Erhöhung der Werte im Vergleich zu den Daten der Wetterstation in Fuhlsbüttel erklärt werden. Anderenfalls liegt diese Erhöhung auch in dem Bereich des Fehlers mit dem der Drucksensor behaftet sein kann.

In Abbildung 8.3 ist zu erkennen, dass die Messwerte während des Testlaufs minütlich genommen wurden. Die zusätzlichen Messungen im Vergleich zu den Messungen der Wetterstation scheinen jedoch nur kleine Druckschwankungen aufzuzeichnen und den Verlauf der Kurven nicht zu verändern bzw. keine neuen Erkenntnisse zu erzielen. Der Vorteil der häufigen Messungen ist jedoch, dass gleichzeitig Messfehler ausgeglichen werden.

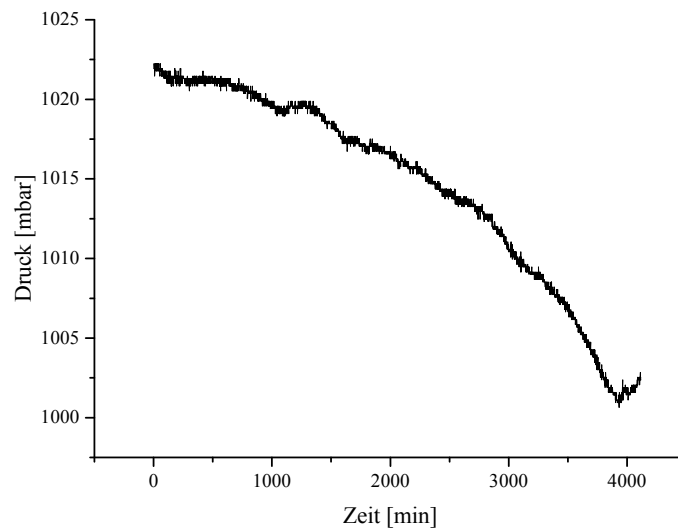


Abbildung 8.3: Messwerte des Luftdrucks; von 12.30 Uhr, am 31.10.14, bis um 8.30 Uhr, am 3.11.14.

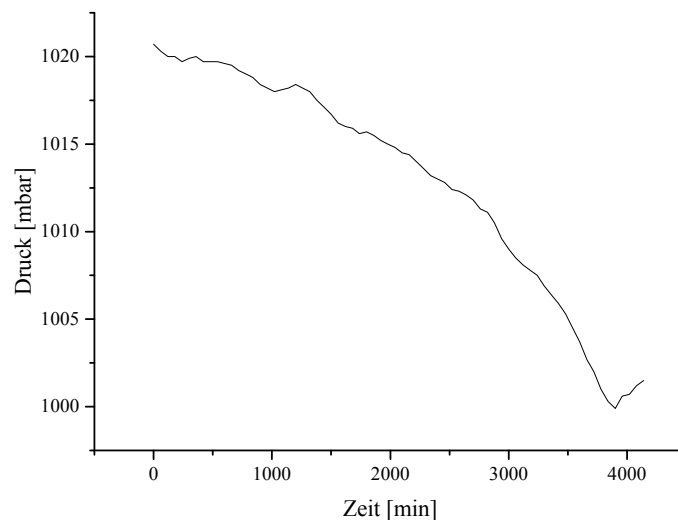


Abbildung 8.4: Messwerte des Luftdrucks von der Wetterstation des DWD in Fuhlsbüttel von 12 Uhr, am 31.10.14, bis um 9 Uhr, am 3.11.14 [Deutscher-Wetterdienst (2014a)].

In Abbildung 8.5 sind die Messwerte des Drucksensors, der die Druckdifferenz zwischen der Pumpe und der Kapillare misst, eingetragen. Die Messwerte des Unterdrucks wurden, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, aus den Messwerten des Arduinos berechnet. Wie in Kapitel 4.2 vorhergesagt, ist auch bei dem Testlauf ein Abfall des erzeugten Unterdrucks zu erkennen. Um abzuschätzen auf welchen Wert der Unterdruck abgefallen ist, wurde ein exponentieller Fit durch die Messwerte gelegt. Über den exponentiellen Fit ergibt sich, dass der Unterdruck auf 146,1 mbar abgefallen ist. In Kapitel 4.2 war der Unterdruck, den die Pumpe erzeugen kann, auf 153,2 mbar bestimmt worden. Die Abweichung zwischen dem Unterdruck, der während dem Testlauf gemessen wurde, und dem, der in Kapitel 4.2

bestimmt wurde, lässt sich damit erklären, dass bei dem Versuchsaufbau in Kapitel 4.2 gegen ein geschlossenes Ventil und während des Testlaufs gegen eine Kapillare gepumpt wurde.

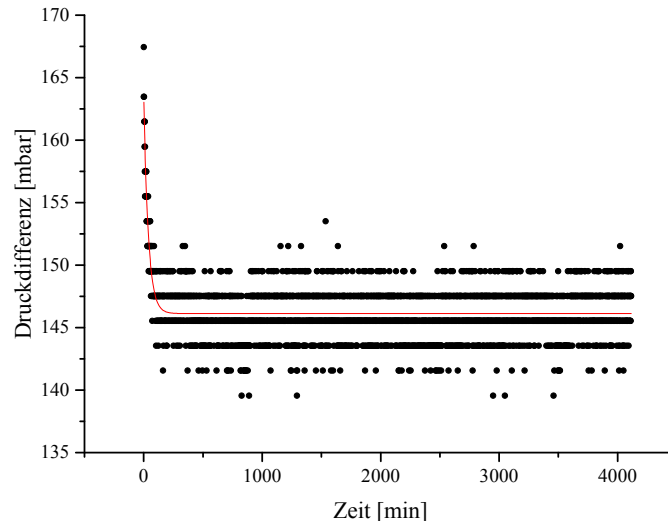


Abbildung 8.5: Messwerte des Unterdrucks zwischen der Kapillare und der Pumpe; dazugehöriger exponentieller Fit (rot): $f(x) = 17,4 \text{ mbar} \cdot e^{\frac{-x}{39,1 \text{ min}}} + 146,1 \text{ mbar}$.

Um die Luftmenge, die sich in den Beuteln befand, zu messen, wurde die Luft aus den Beuteln gepumpt und in einem umgedrehten, mit Wasser gefüllten Messbecher aufgefangen. Die Ergebnisse für die Volumenmessung sind in Tabelle 8.6 eingetragen. Da die Skala des Messbechers in 200 ml-Schritte unterteilt war, konnte der Beutelinhalt nur auf etwa 50 ml genau abgeschätzt werden. Diese grobe Schätzung war für die Auswertung genügen, da nur tendenziell überprüft werden soll, ob sich in allen Beuteln das gleiche Volumen befindet.

Nach den Messergebnissen aus Kapitel 5.3 wäre zu erwarten gewesen, dass durch die Kapillare der Länge $l = 25,2 \text{ mm}$ 1144,8 ml angesaugt werden. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass zum einen in allen Beuteln generell zu wenig Luft enthalten war und zum anderen das Volumen in den Beuteln, umso später diese während des Sammelvorgangs befüllt wurden, kontinuierlich nachlässt. Dieser Effekt kann nicht durch den Leistungsabfall der Pumpe erklärt werden, weil dieser nur in den ersten 250 Minuten auftritt (siehe Abbildung 8.5). Das heißt, dass der Effekt, der durch den Leistungsabfall der Pumpe verursacht wird, nach den ersten zwei Beuteln nicht mehr auftreten dürfte.

Dadurch, dass in einem früheren Dauertest mit dieser Kapillare die Beutel entsprechend der Erwartung gefüllt waren (siehe Tabelle A.2 im Anhang) und dass in der Druckaufzeichnung keine Besonderheit zu erkennen ist, die den kontinuierlichen Druckabfall erklären könnte, ist die wahrscheinlichste Erklärung für das generell zu geringe Volumen und die Volumenabnahme über die Zeit, dass sich die Kapillare mit einer Verschmutzung zugesetzt hat, weil sie zum Zeitpunkt des Testes noch nicht mit einem Filter vor Verschmutzung geschützt war.

Tabelle 8.6: Volumen in den einzelnen Beuteln nach dem Testlauf mit der 25,2 mm langen Kapillare.

Beutel	Volumen [ml]
1	1000
3	950
4	950
5	900
6	900
7	800
8	800
14	700
15	700
18	700
20	650-700

Um diese Annahme zu überprüfen, wurde ein weiterer Testlauf mit der 27,65 mm langen Kapillare über ungefähr 66 Stunden durchgeführt. Bei diesem wurde wieder der Druck zwischen der Kapillare und der Pumpe, der Luftdruck, die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur gemessen und auf der SD-Karte dokumentiert. Zusätzlich wurde auch die Spannung, die der Spannungsregler ausgab, von dem Arduino eingelesen und auf der SD-Karte gespeichert.

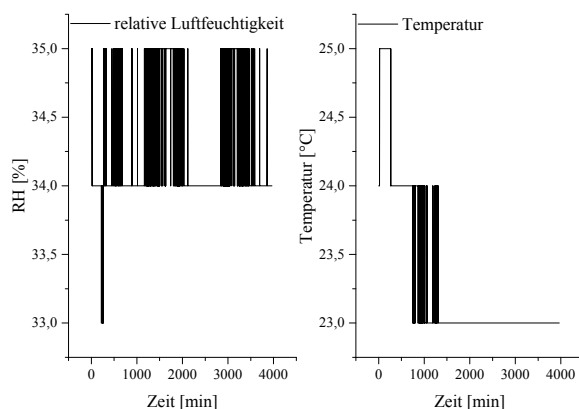


Abbildung 8.6: Die Messwerte des Temperatur- und Feuchtigkeitssensors.

In Abbildung 8.6 sind die Messwerte des Temperatur- und Feuchtigkeitssensors eingetragen. Die Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen liegen zwischen 33 und 35 % RH und zwischen 23 und 25 °C und damit im selben Bereich wie in dem vorherigen Testlauf (siehe Abbildung 8.2).

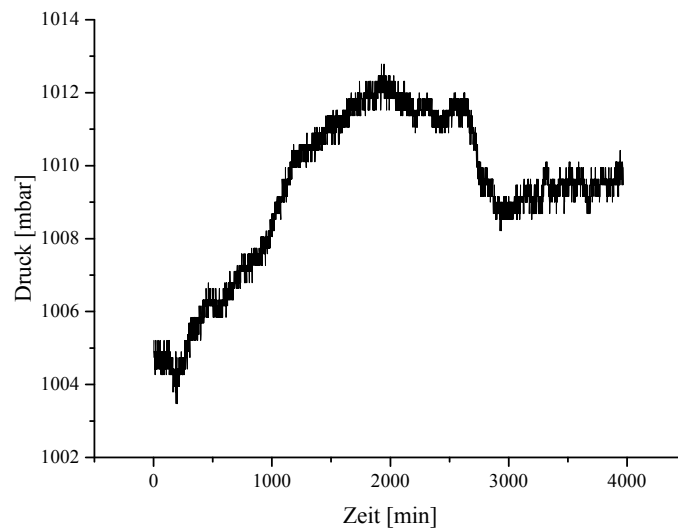


Abbildung 8.7: Messwerte des Luftdrucks über die Drucksonde von 14.30, am 7.11.14, bis um 8.27, am 10.11.14.

In Abbildung 8.7 sind die Messwerte für den Luftdruck, der von der Drucksensor gemessen wurde, eingetragen. Zum Vergleich wurden die Messwerte der Wetterstation in Hamburg in Fuhlsbüttel vom DWD über den selben Zeitraum in Abbildung 8.8 eingetragen. Der Vergleich der beiden Graphen ergibt einen nahezu identischen Verlauf. Wie im ersten Testlauf sind die absoluten Messwerte des Drucksensors geringfügig erhöht.

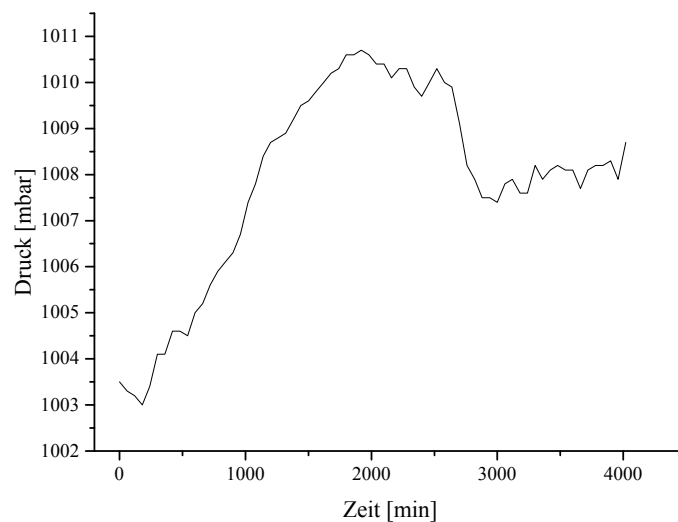


Abbildung 8.8: Messwerte des Luftdrucks von der Wetterstation in Fuhlsbüttel, Hamburg, von 14 Uhr, am 7.11.14, bis um 9 Uhr, am 10.11.14 [Deutscher-Wetterdienst (2014b)].

In Abbildung 8.9 ist der Verlauf des Unterdrucks, der zwischen der Pumpe und der Kapillare erzeugt wurde, zu sehen. Wie im ersten Testlauf (siehe Abbildung 8.5) fällt der

Unterdruck durch die Leistungsabnahme der Pumpe ungefähr in den ersten 250 Minuten ab und wurde über einen exponentiellen Fit auf 145,09 mbar bestimmt.

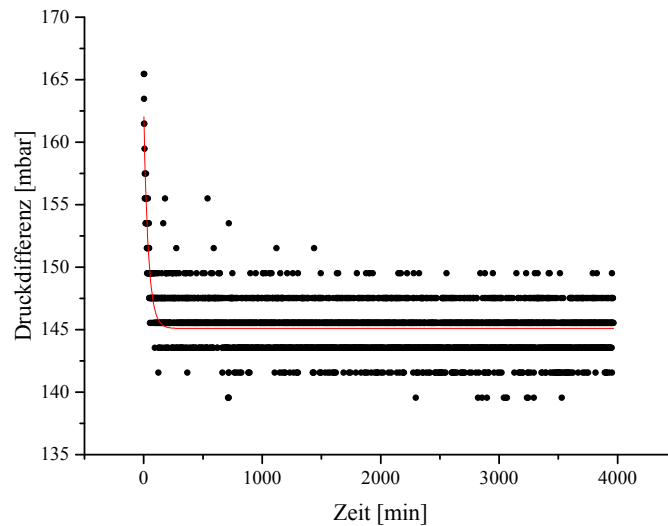


Abbildung 8.9: Messwerte des Unterdrucks zwischen der Kapillare und der Pumpe; dazugehöriger exponentieller Fit (rot): $f(x) = 17,4 \text{ mbar} \cdot e^{\frac{-x}{38,1 \text{ min}}} + 145,1 \text{ mbar}$.

In Tabelle 8.7 sind die Messergebnisse für das Beutelvolumen eingetragen. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass sich in jedem Beutel ungefähr 1200 ml Luft befanden. Nach der Vorhersage in Kapitel 5.3 wäre ein Volumen von 1296 ml in jedem Beutel zu erwarten gewesen. Dieses Ergebnis bestätigt die Annahmen, dass sich die generell zu kleinen Messwerte und die Volumenabnahme im ersten Testlauf damit erklären lassen, dass die 25,2 mm lange Kapillare mit einer Verschmutzung zugesetzt war.

Tabelle 8.7: Volumen in den einzelnen Beuteln nach dem Testlauf mit der 27,65mm langen Kapillare

Beutel	Volumen [ml]
3	1200
4	1200
5	1200
6	1200
7	1200
8	1200
9	1200
10	1200
11	1200
12	1200
13	1200
14	1200
15	1200
16	1200
17	1200
18	1200
19	1200
20	1200

Bei einer Druckdifferenz von 145,09 mbar würde bei der 27,65 mm langen Kapillare ein Volumenfluss von $1212 \frac{\text{ml}}{3\text{h}}$ vorher gesagt. Das in Kapitel 5.3 ein größerer Volumenfluss vorhergesagt wurde, kann damit erklärt werden, dass bei dem Experiment nicht vier Stunden gewartet wurde bis mit der Messung begonnen wurde. Der Abbildung 8.9 ist zu entnehmen, dass in den ersten 250 Minuten grob geschätzt ein durchschnittlicher Unterdruck zwischen 150 und 155 mbar erzeugt wurde. In diesem Druckbereich lag ebenfalls die Druckdifferenz von 153,2 mbar über die in Kapitel 5.3 der Durchmesser der Kapillare auf $>110 \mu\text{m}$ bestimmt wurde.

In Abbildung 8.10 sind die Messwerte der Spannung des 12 V-Spannungsreglers über den Testlauf von ungefähr 66 Stunden eingetragen. Es ist zu erkennen, dass es keine Spannungsabsenkung gegeben hat. Der 12 V-Spannungsregler gibt im Mittel eine Spannung von 12,016 V aus.

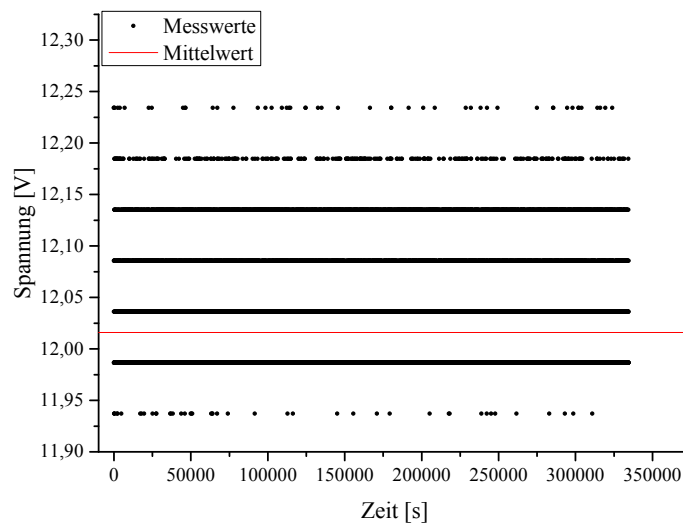


Abbildung 8.10: Messung der 12 V-Spannungsversorgung über den Testlauf; nur jeder 10ter Messwert aus Übersichtsgründen geplottet.

Die Langzeittests der Luftsammelanlage haben gezeigt, dass die Probennahme den Erwartungen entsprechend verlaufen ist. Die Konzeption, die Konfiguration und der Aufbau der Luftsammelanlage haben sich somit als tauglich erwiesen. Insbesondere hat sich gezeigt, dass über den gesamten jeweils dreistündigen Sammelvorgang ein konstanter Volumenfluss besteht. Bei der Verwendung einer 27,65 mm langen Kapillare bei einem Unterdruck von 145,1 mbar erhält man ein Endvolumen von 1200 ml. Dies entspricht den Anforderungen der Hamburger ATTA-Gruppe. In dem Langzeitversuch haben sich Kapillaren als verschmutzungsanfällig erwiesen, daher muss ein zusätzlicher Filter für diese verwendet werden.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine vollautomatische Luftsammelanlage aufgebaut und getestet. Die Anlage wurde so konzipiert, dass aus den genommenen Proben mit Hilfe des ATTA-Aufbaus der Hamburger ATTA-Gruppe die ^{85}Kr Konzentration bestimmt werden kann und dass die Sammelzyklen der Luftsammelanlage mit den Zyklen der Wetteraufzeichnung abgestimmt werden können, um die ermittelte ^{85}Kr Konzentration bestimmten Windtrajektorien zuordnen zu können.

Das grundlegende Prinzip, nach dem die Sammelanlage aufgebaut wurde, ist, dass mit Hilfe einer Pumpe ein Unterdruck erzeugt wird. Der daraus resultierende Volumenfluss wird durch eine Kapillare so verringert, dass innerhalb eines dreistündigen Zyklus über einen konstanten, geringen Volumenfluss ein Luftvolumen von 1 bis 1,5 Litern gesammelt wird. Von der Pumpe wird die gesammelte Luft über eine Ventilinsel, die über ein Mikrocontrollerboard angesteuert wird, für jeweils drei Stunden in jeweils einen Sammelbehälter geleitet.

Ein Sammelzyklus soll eine Woche umfassen, in der 56 Luftproben von je 3 Stunden genommen werden. Deshalb wurde die Anlage so aufgebaut, dass sie ohne externe Stromversorgung über mindestens 7 Tage betrieben werden kann.

Im Folgenden werden nun die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst:

Die ausgewählte Pumpe erzeugt bei einer Betriebsspannung von 12 V eine Druckdifferenz von 145,09 mbar zwischen der Kapillare (Länge: 27,65 mm, Innendurchmesser: 100 μm) und dem eigenen Ansaugstutzen. Es hat sich herausgestellt, dass diese über eine lange Laufzeit konstant ist bis auf eine Erhöhung in den ersten ungefähr 250 Minuten. Der Abfall der erzeugten Druckdifferenz in diesem Zeitraum wird durch eine thermisch bedingte Leistungsabnahme der Pumpe verursacht und führt dazu, dass in dem ersten und zweiten Beutel ein wenig mehr Luft ist als in den restlichen Beuteln. Dies ist jedoch unproblematisch, weil das leicht erhöhte Volumen in diesen Beuteln keine Auswirkung auf die Analyse hat. Der Abfall der Druckdifferenz kann über einen Regelkreis, der die Druckdifferenz über die Regelung der Pumpleistung konstant hält, ausgeglichen werden. Die Langzeittests der Pumpe haben ergeben, dass sie einer Dauerbelastung gewachsen ist.

Die Aquariumpumpe von Schego hat alle Anforderungen erfüllt und ist deutlich preisgünstiger als alle anderen Varianten.

Für die Flussverringerng durch die Kapillare hat sich ergeben, dass das Gesetz der Hagen-Poiseuille-Strömung angewendet werden kann. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass das Gesetz der laminaren Rohr-Strömung erst für eine ausgebildete Strömung gilt und die Einlaufänge nicht berücksichtigt. Dies führt dazu, dass der experimentell beobachtete Volumenfluss minimal niedriger ausfällt als der auf Grundlage des Gesetzes rechnerisch vorhergesagte. Das heißt, dass die Kapillare etwas kürzer sein muss als berechnet, um den Volumenfluss um das gewünschte Maß zu verringern. Diese Gesetzmäßigkeit wurde mit Glaskapillaren, die nur geringe Schwankungen des Innendurchmessers aufweisen, bestätigt. Für den praktischen Einsatz ist es vorteilhafter, Metallkapillaren zu verwenden, weil diese robuster sind. Die Schwankungen des Innendurchmessers der Metallkapillaren, die für den Aufbau der Luftsammelanlage verwendet werden, sind allerdings so groß, dass man die genaue Verringerung des Volumenstroms nur experimentell bestimmen kann. Die Vorteile Kapillaren zur Flussverringerng zu verwenden sind, dass sie einfach herzustellen, schnell auszutauschen und im Vergleich zu alternativen Verfahren sehr preiswert sind.

Wie sich während eines Testlaufs der Sammelanlage im Labor gezeigt hat, ist die verwendete Kapillare mit einem Innendurchmesser von 100 µm sehr verschmutzungsanfällig. Um die Verschmutzung bzw. die Verstopfung der Kapillare zu verhindern, reicht ein feines Metallgitter, wie es ursprünglich geplant war, nicht aus.

Die Ventilinsel, über die die verschiedenen Beutel angesteuert werden, arbeitet sehr präzise und spart durch die pneumatisch-unterstützte Schaltung der Ventile $\frac{4}{5}$ der Leistung, die eine Magnetspule ohne Unterstützung durch Druckluft benötigt, um das Ventil zu öffnen. Die Erweiterung der Anlage ist leicht möglich, da die Ventilinseln flexibel planbar sind und die Steuerung einfach ergänzt werden kann.

Für die Druckluftversorgung der Ventilinsel wurde ein Druckluftbehälter mit einem Volumen von 2,5 l ausgewählt, der unter einem Druck von 11 bar steht. Über einen Druckregler werden die 11 bar auf die von der Ventilinsel benötigten 5 bar herunter geregelt. Für einen einwöchigen Sammelvorgang benötigt die Ventilinsel 56 cm³ Druckluft. Somit können mit einer Füllung des Druckluftbehälters mindestens acht einwöchige Luftsammelvorgänge durchgeführt werden.

Das Totvolumen, das sich zwischen dem Anfang der Kapillare und dem geöffneten Ventil befindet, führt dazu, dass die durch die Kapillare angesaugte Luft erst nach ungefähr viereinhalb Minuten in den Sammelbehälter gelangt. Dies hat zur Folge, dass die zeitliche Taktung der Zeiträume, aus denen die Luft in den Beuteln stammt, im Vergleich zu den Sammelzyklen der Wetteraufzeichnung verschoben ist. Durch eine zeitlich verzögerte Öffnung der Ventile, lässt sich diese Synchronität wieder herstellen und somit kann die Auswirkung des Totvolumens umgangen werden.

Während der Testphase wurden als Auffangbehältnisse für die gesammelte Luft Urinbeutel verwendet. Die Untersuchung der Luft aus den Beuteln mit Hilfe eines Quadrupolmassenspektrometers hat gezeigt, dass die Urinbeutel für Gase durchlässig sind. Aus diesem Grund können diese Beutel nicht als Sammelbehälter für die Luftsammelanlage während

des regulären Betriebs verwendet werden.

Für die interne, autarke Stromversorgung der Luftsammelanlage wurden zwei in Reihe geschaltete Blei-Gel-Akkus mit einer Kapazität von je 80 Ah gewählt, die über ein USV-Modul geladen und überwacht werden. Die gesamte Sammelanlage benötigt über einen Sammelzeitraum von einer Woche etwas mehr als 48 Ah, sodass die Akkus die Sammelstation auch unter ungünstigen Bedingungen mindestens für eine Woche betreiben können. Dadurch, dass ein USV-Modul zur Ladung der Akkus verwendet wird, ist prinzipiell ein Dauerbetrieb der Luftsammelanlage möglich, sofern eine externe 115-230 V Versorgung zur Verfügung steht.

Über die Experimente hat sich aufzeigen lassen, dass während der dreistündigen Sammelperiode gleichmäßig Luft in den Sammelbehälter gelangt und dass das Proben-Volumen in den Sammelbehältern über einen mehrtägigen Sammelvorgang konstant ist.

Die Transportbox ist 56 cm breit, 96 cm tief und 100 cm hoch. Die Akkus wiegen beide jeweils 24 kg. Mit dem Eigengewicht der Transportbox und dem der weiteren Bauelementen wird die Luftsammelanlage ein Gesamtgewicht von mehr 60 kg erreichen. Trotz ihres Ausmaßes und ihres Gewichts kann die Luftsammelanlage als transportabel bezeichnet werden, da die Transportbox über Haltegriffe und Rollen verfügt.

Ausblick

Bisher wurde die Luftsammelanlage nur unter Laborbedingungen getestet. Um die Nutzbarkeit für Außeneinsätze zu ermöglichen, müssen folgende Aspekte untersucht und verbessert werden.

Da die Kapillare sehr anfällig im Bezug auf Verschmutzungen ist, muss sichergestellt werden, dass die Kapillare während eines Außeneinsatzes nicht verstopft. Dazu sollte die Kapillare durch einen zusätzlichen, feinen Filter geschützt werden, der direkt vor der Kapillare befestigt wird. Für den Luftdrucksensor und den Feuchtigkeits- und Temperatursensor sollte das vorgesehene feine Metallgitter ausreichen.

Um die Sammelzyklen der Luftsammelanlage den Zyklen der Wetteraufzeichnung durch die verzögerte Schaltung der Ventile anpassen zu können, müssen zum einen Informationen darüber vorliegen, wann genau die Daten für die Wetteraufzeichnung am Ort der Probennahme genommen werden, und zum anderen muss die Luftsammelanlage mit einem GPS-Sender ergänzt werden, um die Probennahme und die Wetteraufzeichnung zeitliche und örtliche synchronisieren zu können.

Um den Leistungsabfall der Pumpe auszugleichen, müsste eine Programmschleife in das Programm der Luftsammelanlage integriert werden, über welches der Mikrocontroller die Druckdifferenz der Pumpe ausliest und dementsprechend die Pumpleistung variiert. Über solch einen Regelkreis kann die Druckdifferenz, die die Pumpe erzeugt, über den gesamten Sammelvorgang konstant gehalten werden.

Für den Dauereinsatz der Luftsammelanlage muss für die Sammelbehälter eine Alternative zu den Urinbeuteln, die für Stoffe durchlässig sind, gefunden werden. Die Sammelbehälter, die für den Dauereinsatz verwendet werden, sollten folgende Kriterien erfüllen. Sie

sollten ein Volumen zwischen 1,5 und 2 Litern und einen konstanten Ausgangsschlauchdurchmesser zur leichten Befestigung an der Ventilinsel haben, ein Ventil am Ausgangsschlauch besitzen und undurchlässig für Gase sein. Auf Grundlage einer Kosten-Nutzen-Kalkulation soll eine Alternative zu den Urinbeuteln gesucht werden, die die genannten Kriterien erfüllt.

Nach einem einwöchigen Sammelvorgang müssen die Akkus der internen Stromversorgung wieder aufgeladen werden. Da bei Feldstudien eine externe 115-230 V-Versorgung nicht unbedingt in der Nähe des Probenortes liegen dürfte und die Ladung der Akkus längere Zeit erfordert, muss überlegt werden, wie in solchen Fällen der Dauerbetrieb der Sammelanlage aufrecht erhalten werden kann. Eine Möglichkeit wäre, nach dem einwöchigen Sammelvorgang die entladenen Akkus gegen zwei aufgeladene auszutauschen oder eine zweite, identisch aufgebaute Luftsammelanlage herzustellen und beide abwechselnd für einwöchige Sammelvorgänge zu nutzen. Ein weiterer Vorteil von zwei Sammelanlagen wäre, dass die Luftproben im Labor direkt aus der Luftsammelanlage in die Anlage zur Extrahierung des Krypton überführt werden könnten.

Während der Testläufe im Labor waren die Temperaturschwankungen minimal. Bei einem Außeneinsatz werden die Temperaturen jedoch stark variieren. Um einschätzen zu können, welche Temperaturschwankungen auftreten können, müssen realistische Annahmen über die möglichen Temperaturschwankungen am Einsatzort im Laufe eines Jahres gemacht werden und muss experimentell überprüft werden, welche Temperaturen im Inneren der Transportbox bei mehrstündiger Sonnenexpositionen entstehen können und welche Temperaturtoleranzen der verwendeten Bauteile den Einsatzbereich beschränken.

Anhang A

Tabellen

Tabelle A.1: Messwerte Hydostatischer Druck $p_{\text{hydr.}}$ mit h = Wasserstand in Glas = 0,115 m, h_i = Steighöhe in Abhängigkeit der Spannung U .

U [V]	h_1 [m]	h_2 [m]	h_3 [m]	$dh_1 = h_1 - h$ [m]	dh_2 [m]	dh_3 [m]	$\overline{dh}$ [m]	$p_{\text{hydr.}}$ [mbar]
5	0	0	0					
6	0,695	0,71	0,70	0,58	0,595	0,585	0,587	56,8
7	0,875	0,87	0,87	0,76	0,755	0,755	0,757	74,1
8	1,03	1,035	1,03	0,915	0,92	0,915	0,917	89,6
9	1,195	1,2	1,19	1,08	1,085	1,075	1,08	105,7
10	1,345	1,345	1,335	1,23	1,23	1,22	1,227	120,1
11	1,50	1,47	1,48	1,385	1,355	1,365	1,368	134,0
12	1,66	1,64	1,64	1,545	1,525	1,525	1,532	149,9
13	1,86	1,81		1,745	1,695		1,72	168,4
14	2,00	1,99		1,885	1,875		1,88	184,0
15	2,12	2,12		2,005	2,005		2,005	196,3

Tabelle A.2: Volumen in den Beutel nach einem Testdurchlauf mit der 25,2 mm langen Kapillare.

Beutel	Volumen [ml]
1	1100
2	1200
3	1100
4	1100
5	1150
6	1100
7	1100
13	1100
14	1100
20	1100
21	1100

Anhang B

Abbildungen

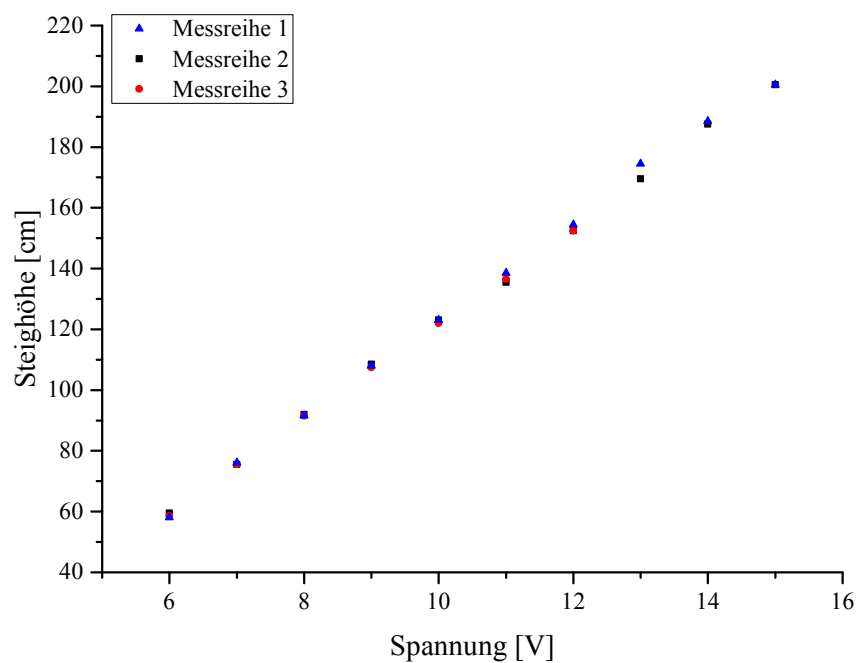


Abbildung B.1: Steighöhen der drei Messreihen in Abhängigkeit von der angelegten Spannung.

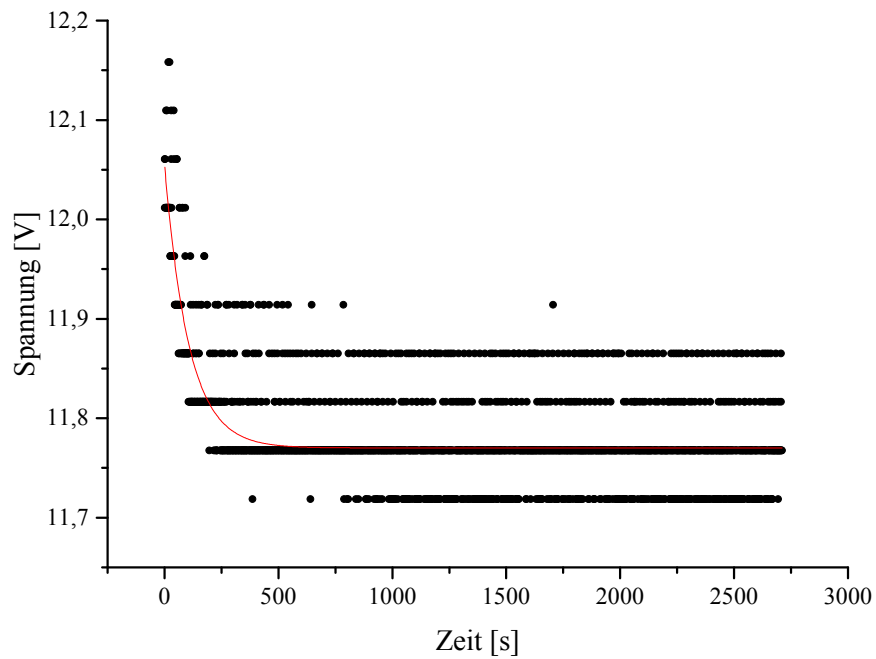


Abbildung B.2: Spannungsabfall des 12 V-Reglers; Messwerte und dazugehöriger exponentieller Fit (rot): $f(x) = 0,285 \text{ V} \cdot e^{\frac{-x}{105,97 \text{ s}}} + 11,77 \text{ V}$.

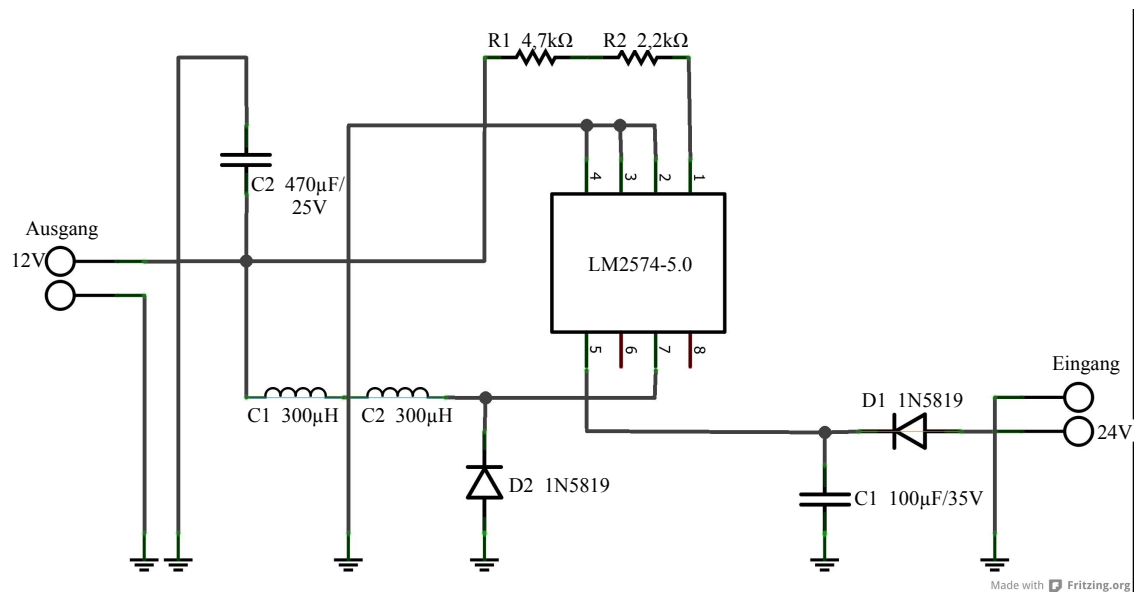


Abbildung B.3: Schaltplan des 12 V-Spannungsreglers.

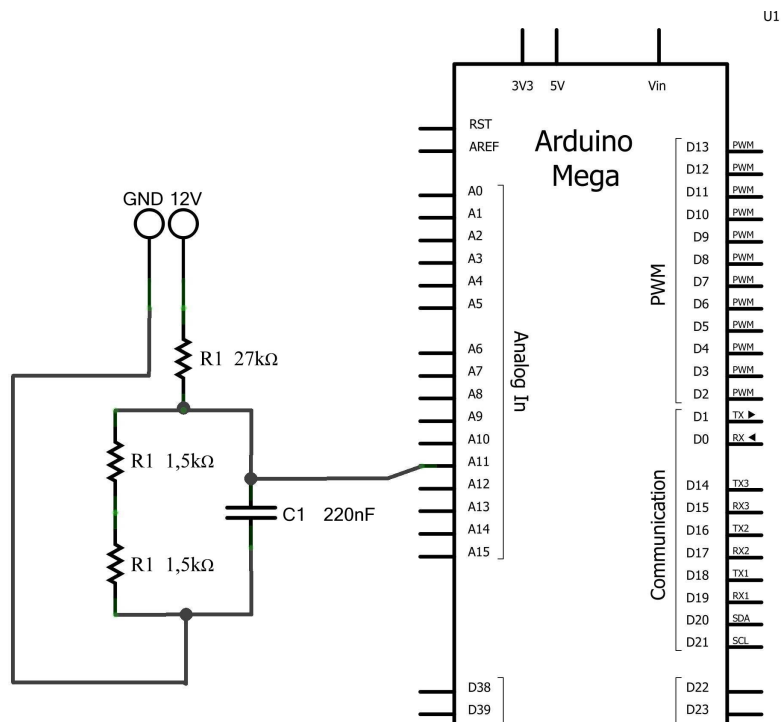


Abbildung B.4: Schaltplan des Spannungsteiler zur Messung der 12 V-Spannung.

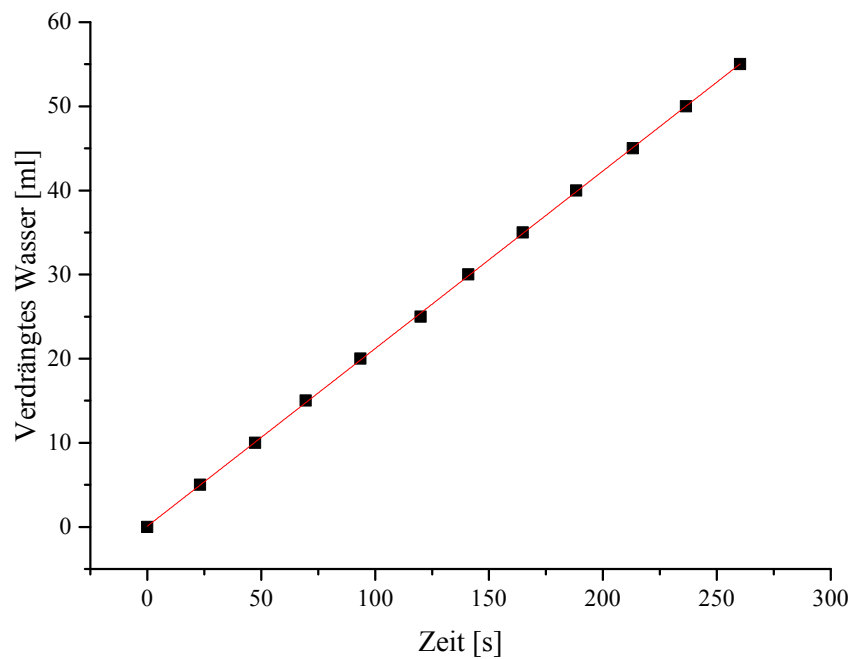


Abbildung B.5: Volumenfluss durch Kapillare der Länge $l_1 = 7,75 \text{ mm}$; Messwerte und dazugehöriger linearer Fit (rot): $f(x) = 0,09 \text{ ml} + 0,21 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \cdot x$.

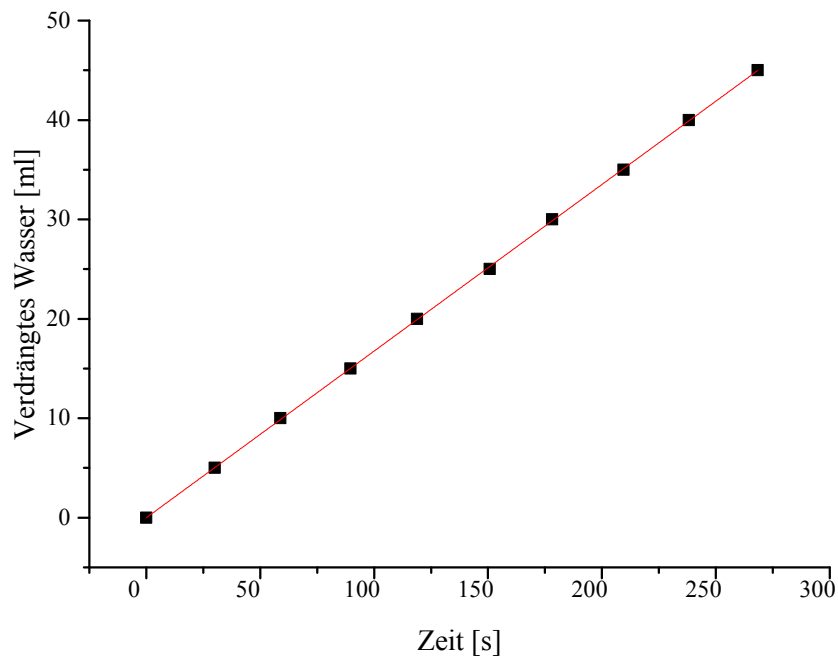


Abbildung B.6: Volumenfluss durch Kapillare der Länge $l_2 = 10,75 \text{ mm}$; Messwerte und dazugehöriger linearer Fit (rot): $f(x) = -0,0002 \text{ ml} + 0,17 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \cdot x$.

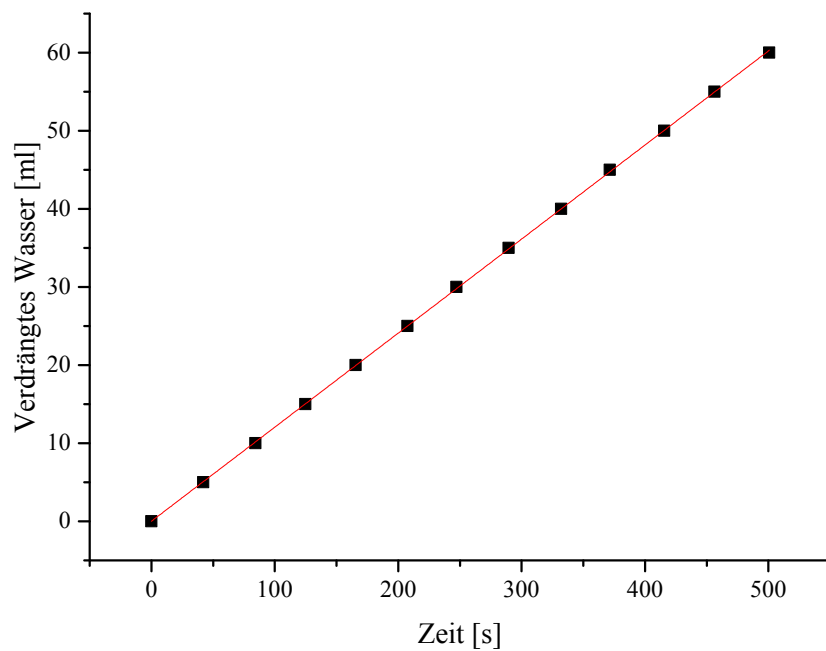


Abbildung B.7: Volumenfluss durch Kapillare der Länge $l_3 = 15,2 \text{ mm}$; Messwerte und dazugehöriger linearer Fit (rot): $f(x) = 0,01 \text{ ml} + 0,12 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \cdot x$.

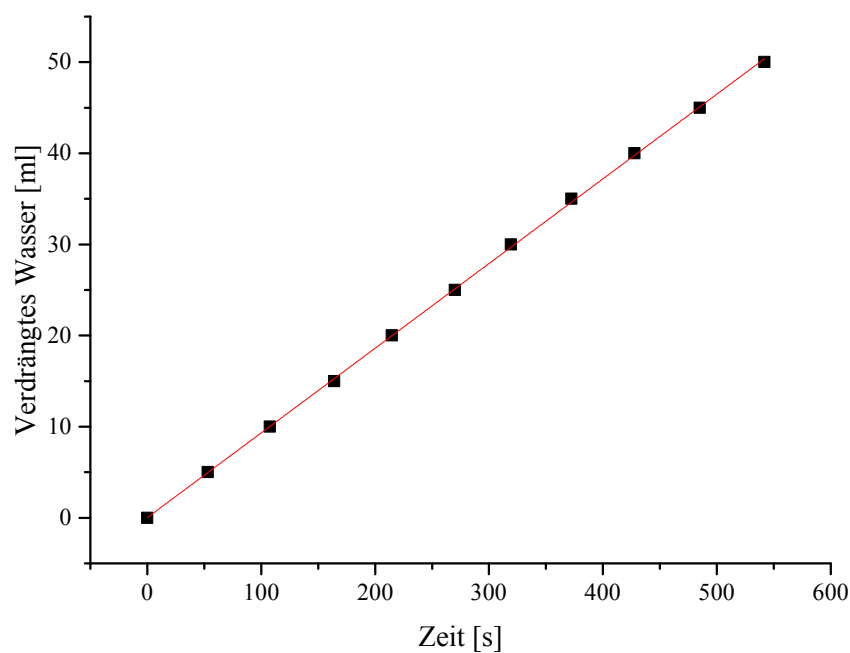


Abbildung B.8: Volumenfluss durch Kapillare der Länge $l_4 = 20,75 \text{ mm}$; Messwerte und dazugehöriger linearer Fit (rot): $f(x) = 0,03 \text{ ml} + 0,09 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \cdot x$.

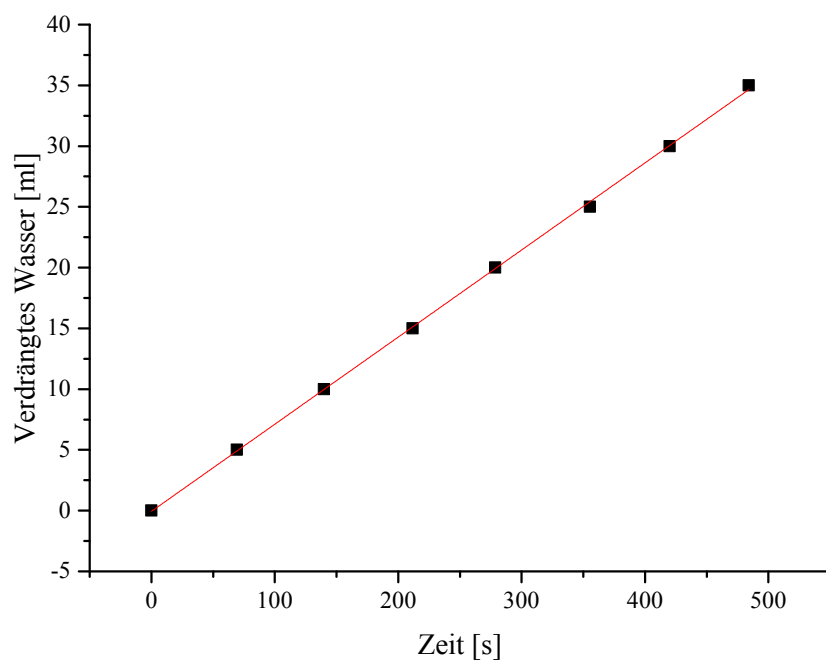


Abbildung B.9: Volumenfluss durch Kapillare der Länge $l_5 = 27,4 \text{ mm}$; Messwerte und dazugehöriger linearer Fit (rot): $f(x) = -0,06 \text{ ml} + 0,07 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \cdot x$.

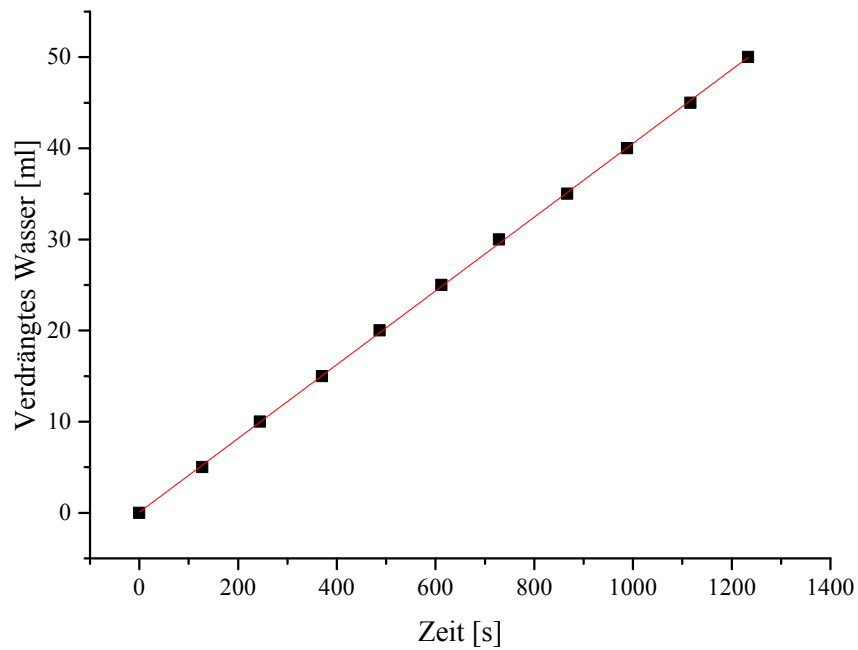


Abbildung B.10: Volumenfluss durch Kapillare der Länge $l_6 = 40,25$ mm; Messwerte und dazugehöriger linearer Fit (rot): $f(x) = 0,08 \text{ ml} + 0,04 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \cdot x$.

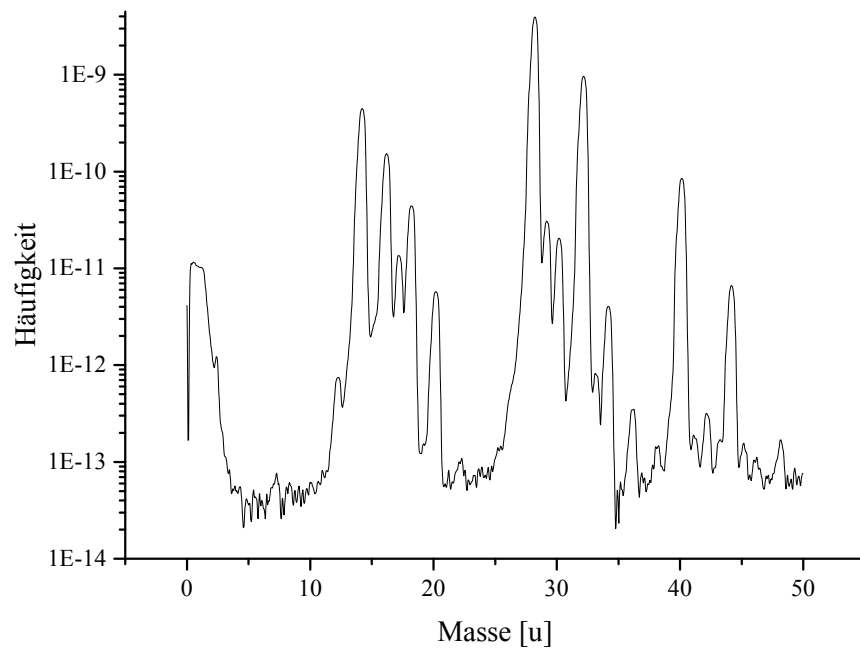


Abbildung B.11: Massenspektrum, das mit Hilfe des QMS aufgenommen wurde.

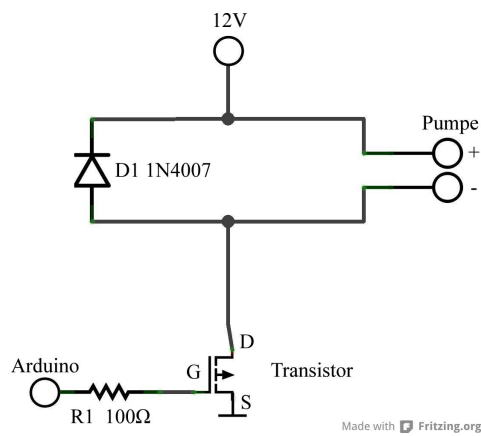


Abbildung B.12: Steuerung der Pumpe.

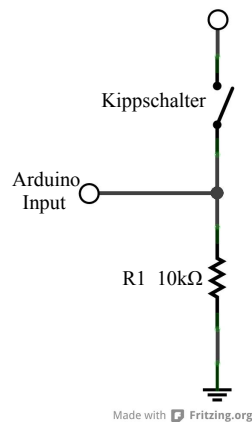


Abbildung B.13: Start des Leerpumpvorgangs.

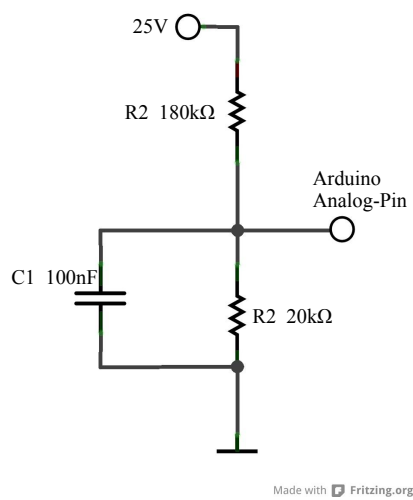


Abbildung B.14: Spannungsmessung der Akkus.

```

#include <math.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SD.h>
#include <DHT11.h>

#define BACKLIGHT_PIN      13

//                                addr, en, rw, rs, d4, d5, d6, d7, bl, blpol
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE); // Set the LCD I2C address
//LiquidCrystal_I2C lcd(0x38, BACKLIGHT_PIN, POSITIVE); // Set the LCD I2C address

//Schieberegister:
double tVent = 10800000;
unsigned int nVent = 0;
int latchPin = A3;
int clockPin = A2;
int dataPin = A4;
//Ventilfunktion:
//int vent_beleg[25] = {0,22,24,18,20,14,16,10,12,6,8,2,4,23,1,19,21,15,17,11,13,7,9,3,5};
int vent_beleg[49] = {0,22,24,18,20,14,16,10,12, 6, 8, 2, 4,23, 1,19,21,15,17,11,13, 7, 9, 3,
5,
46,48,42,44,38,40,34,36,30,32,26,28,47,25,43,45,39,41,35,37,31,33,27,
29};
int whichbyte[9] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0};

int ventilFunction(int a , int c){
int x = (vent_beleg[a]-1) % 8;
float a0 = vent_beleg[a];
int a1=ceil(a0/8);
bitWrite(whichbyte[a1], x, c);

digitalWrite(latchPin, LOW);
for (int i=8; i>=1; i--){
    shiftOut(dataPin, clockPin, MSBFIRST, whichbyte[i]);
}
digitalWrite(latchPin, HIGH);

//Serial.println("fertig!");
}
//LCD:
double tLCD = 60000;
unsigned int nLCD = 0;
//drucksensor:
double tdruck = 60000;
unsigned int ndruck = 0;
File myFile3;
//SD-CARD:
const int chipSelect = 53;
File myFile;
long zeit;

double tSpannung = 10000;
unsigned int nSpannung = 1;
long trigger;
int led = 13;

```

```

//Feuchtigkeitssensor:
double tFeucht = 60000;
unsigned int nFeucht = 0;
DHT11 sensor(47);
float feuchtigkeit;
float temperatur;
//Drucksensor:
File myFile1;
double tDruck = 60000;
unsigned int nDruck = 1;
String dataString = "";
//Spannung:
double tspannung = 1000;
unsigned int nspannung = 1;
File myFile2;
String dataString1 = "";

const uint8_t charBitmap[][8] = {
    { 0xc, 0x12, 0x12, 0xc, 0, 0, 0, 0 },
    { 0x6, 0x9, 0x9, 0x6, 0, 0, 0, 0 },
    { 0x0, 0x6, 0x9, 0x9, 0x6, 0, 0, 0x0 },
    { 0x0, 0xc, 0x12, 0x12, 0xc, 0, 0, 0x0 },
    { 0x0, 0x0, 0xc, 0x12, 0x12, 0xc, 0, 0x0 },
    { 0x0, 0x0, 0x6, 0x9, 0x9, 0x6, 0, 0x0 },
    { 0x0, 0x0, 0x0, 0x6, 0x9, 0x9, 0x6, 0x0 },
    { 0x0, 0x0, 0x0, 0xc, 0x12, 0x12, 0xc, 0x0 }
};

void setup(){
    Serial.begin(9600);
    //Schieberegister:
    pinMode(latchPin, OUTPUT);
    pinMode(clockPin, OUTPUT);
    pinMode(dataPin, OUTPUT);
    digitalWrite(latchPin, LOW);
    //LCD-Display:
    int charBitmapSize = (sizeof(charBitmap) / sizeof(charBitmap[0]));
    pinMode ( BACKLIGHT_PIN, OUTPUT );
    digitalWrite ( BACKLIGHT_PIN, HIGH );
    lcd.begin(20,4);
    for ( int i = 0; i < charBitmapSize; i++ )
    {
        lcd.createChar ( i, (uint8_t *)charBitmap[i] );
    }

    lcd.home ();
    lcd.print("GOOD MORNING :-)");
    lcd.setCursor ( 5, 3 );           // go to the next line
    lcd.print ( "FORUM - fm");
    delay (10000);
    //drucksensor:
    Wire.begin();
    //Sd-Karte:
    pinMode(53, OUTPUT);
    if (!SD.begin(chipSelect)) {
        lcd.setCursor (0,1);
        lcd.print("Card failed, or not present");
    }
}

```

```

    return;
}

pinMode (A7, INPUT);
pinMode (led, OUTPUT);
lcd.setCursor (0,1);
lcd.print("card initialized.");
delay (10000);
//Feuchtigkeitssensor
}

void loop() {
    if (millis() - nspannung * tspannung > 0 ){
        digitalWrite (led, HIGH);
        myFile2 = SD.open("spanno.txt", FILE_WRITE);
        dataString1 = String (analogRead(A10));
        myFile2.println(dataString1);
        myFile2.close();
        digitalWrite (led, LOW);
        nspannung++;
    };

    delay(500);
    if (millis() - nVent* tVent >0){
        lcd.setCursor (0,3);
        lcd.print ("          ");
        lcd.setCursor(14,2);
        lcd.print (" ");
        ventilFunction(nVent,0);
        ventilFunction(nVent+1,1);
        for (int i=1; i<=8; i++){
            lcd.setCursor(0,4);
            Serial.println (whichbyte[i], BIN);}
        delay(1000);
        nVent++;
    };
    if (millis() - ndruck* tdruck >0){
        Wire.requestFrom(0x28, 2); // request 2 bytes from slave device #0x28
        int q = Wire.read(); // receive a byte as character
        int w = Wire.read();
        float y = 256*q + w;
        Serial.print(y);
        float Y = 68.95 * (((y/16384)-0.1)*(30/0.8));
        Serial.println(Y);
        lcd.setCursor(11,3);
        lcd.print(",");
        // print the character
        lcd.setCursor(12,3);
        lcd.print(Y);
        myFile3 = SD.open("dru.txt", FILE_WRITE);
        myFile3.println (y);
        myFile3.close();
        ndruck++;
    }
    if (millis() - nLCD * tLCD > 0){;
        lcd.setCursor(0,2);
        lcd.print ("Ventil offen:");
    }
}

```

```
lcd.setCursor(14,2);
lcd.print (nVent);
zeit =(millis()-((nVent - 1)*tVent))/tLCD;
lcd.setCursor (17,2);
lcd.print (zeit);
nLCD++;
}
if ( millis() - tFeucht * nFeucht > 0) {
    digitalWrite (led, HIGH);
    myFile = SD.open("Feucht.txt", FILE_WRITE);
    sensor.read(feuchtigkeit, temperatur);
    lcd.setCursor (0,3);
    lcd.print(feuchtigkeit);
    lcd.setCursor (5,3);
    lcd.print (" ");
    lcd.setCursor(6,3);
    lcd.print (temperatur);
    //lcd.setCursor(11,3);
    //lcd.print (" ");
    myFile.print(feuchtigkeit);
    myFile.print(" ");
    myFile.println(temperatur);
    myFile.close();
    digitalWrite (led, LOW);
    nFeucht++;
};
if (millis() - nDruck * tDruck > 0 ){
    digitalWrite (led, HIGH);
    myFile1 = SD.open("Druck.txt", FILE_WRITE);
    //dataString = String (analogRead(A13));
    //Serial.println(dataString);
    //digitalWrite (led, HIGH);
    //myFile1.print(dataString);
    dataString = String (analogRead(A14));
    //myFile1.print(" ");
    myFile1.println(dataString);
    myFile1.close();
    digitalWrite (led, LOW);
    nDruck++;
};
}
```

Literaturverzeichnis

- Aosong (Stand:25.10.2014). *Datasheet DHT11*. <http://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/DHT11.pdf>.
- ATMEL (Stand: 25.11.2014). *Datasheet ATmega2560*. <http://www.atmel.com/Images/doc2549.pdf>.
- Company, G. E. (2011). UNIK 5000 Drucksensorplattform.
- Daerr, H. (2011). *Optische Systeme und Konzeptionen für die Ultrapurenanalyse von Krypton-Isotopen*. PhD thesis, Universität Hamburg.
- Deutscher-Wetterdienst (Stand: 25.11.2014a). <https://werdis.dwd.de/werdis/toSimpleSearch2SelectTimesStation.do>.
- Deutscher-Wetterdienst (Stand: 25.11.2014b). <https://werdis.dwd.de/werdis/toSimpleSearch2SelectTimesStation.do>.
- EXIDE (März 2007). *Handbuch für stationäre verschlossene Gel-Bleibatterien; Teil 2*. Industrial Energy, Technical Support Application.
- Festo (2009/04). *Ventilinsel Typ 32 MPA*.
- GEL, C. E. V. (Stand: 25.11.2014). *Datasheet CTC 80-12*. <http://www.akku-partner.com/WebRoot/Sage/Shops/AJMedizintechnikGmbH43798224/4F51/E8A3/104B/B5C3/8851/0A0C/05EA/59F5/CTC80-12.pdf>.
- Hands, G. J. (2013). On-Site Sampling Apparatus (OSA). Master's thesis, Universität Hamburg.
- Hebel, S. (2013). Interim Report on the research visit to Uni Bern 2013. Master's thesis, Universität Hamburg.
- HLUG (Stand: 25.11.2014). *Zusammensetzung der Atmosphäre in Volumenprozent*. <http://www.hlug.de/start/luft/allgemeines/zusammensetzung-der-luft.html>, hessisches landesamt für umwelt und geologie edition.
- Honeywell (Stand: 25.11.2014). *Datasheet ASDX Series Silicon Pressure Sensors*. <http://www.farnell.com/datasheets/1676926.pdf>.

- Kohler, M. (2011). *Vakuum-Ultra-Violette-Lichtquelle und Konzeptionen für die Ultra-spurenanalyse von seltenen Kryptonisotopen*. PhD thesis, Universität Hamburg.
- Lu, Z.-T. and Mueller, P. (2010). Atom trap trace analysis of rare noble gas isotopes. *Atomic, Molecular, and Optical Physics, Academic Press*.
- molex (2011). *The Book on the technologies of Polymicro*. Polymicro Technologies, <http://www.molex.com/molex/common/staticLoader.jsp?fileName=/PolymicroTechnologiesCatalog.html>.
- NXP (Stand: 25.11.2014). *Datasheet 74HC595/ 74HCT595*. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/74HC_HCT595.pdf.
- Oehme, M. (1996). *Praktische Einführung in die GC/MS-Analytik mit Quadrupolen*. Heidelberg; Hüthig Verlag.
- Peters, E. (2008). Spurenanalyse von Kryptonisotopen: Frequenzstabilisierung eines Lasersystems für Atom Trap Trace Analysis und Edelgasprobennahme. Master's thesis, Carl Friedrich von Weizsäcker Zentrum für Naturwissenschaft und Friedensforschung - Universität Hamburg.
- Rossner, A., Farant, J. P., Simon, P., and Wick, D. P. (2002). Development of a Flow Controller for Long-Term Sampling of Gases and Vapors Using Evacuated Canisters. *Environ. Sci. Technol.*, 36, 4912-4920.
- Schego (Stand: 16.10.2014). *Datasheet Aquariumpumpe Basis-Modell SG O electronic (83 ...)*. <http://www.schego.de/industriepumpen.php?/lang=de>.
- Semiconductor, O. (Stand: 25.11.2014). *Datasheet NCP1117ST50T3G*. <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/174874/ONSEMI/NCP1117ST50T3G.html>.
- Semiconductors, N. (Stand: 28.12.2014). *I2C-bus specification and user manual*. http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf.
- Solutions, G. M. . C. (Stand: 25.11.2014). *Datasheet UNIK 5000*. http://www.ge-mcs.com/download/pressure-level/920-483DE_G.pdf.
- Wutz, M. (2006). *Handbuch Vakuumtechnik. Überarbeitet von Karl Jousten*. Wiesbaden; Friedr. Vieweg & Sohn.
- Zierep, J. and Bühler, K. (2013). *Grundzüge der Strömungslehre*. Wiesbaden; Springer Vieweg.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Gerald Kirchner. Durch ihn ist mir die Idee gekommen, die Bachelorarbeit am ZNF zu schreiben. Außerdem wurde durch ihn mein Interesse an Forschungsgebieten des ZNF geweckt. Er hat mir die Sicherheit gegeben, dass ich bei offenen Fragen in ihm immer einen Ansprechpartner finde.

Besonderen Dank gilt auch Dr. Markus Kohler. Durch ihn wurde ebenfalls mein Interesse für die Forschungsgebiete des ZNF geweckt. Während der Bachelorarbeit konnte ich jederzeit mit Ideen und Fragen zu ihm kommen und er hat sich die Zeit genommen, den Gedankenansatz mit mir zu diskutieren.

Dann möchte ich mich bei dem Laborteam dafür bedanken, dass es mich so herzlich in seiner Mitte aufgenommen hat.

Simon Hebel hat sich mit mir in die Thematik der Probenanalyse (im Besonderen von Argon) eingefuchst und wir haben manches Problem gemeinsam gelöst.

Durch Carsten Sieveke sind mir viele Bereiche der Elektronik klarer geworden und ich freue mich jetzt schon auf die Elektronikvorlesung im Masterstudium.

Beide haben mir bei jeder Idee oder Frage ein offenes Ohr geliehen und mich immer unterstützt.

Dank auch an Peter Sahling für die Unterstützung und vielseitige Hilfe.

Dank dir Niko, für die vielen Tipps und Tricks.

Vielen Dank Ergin, dass ich mit dir viele meiner Ideen diskutieren konnte.