

FEUCHTIGKEIT IM GASSYSTEM DES ÜBERGANGSSTRAHLUNGSDETEKTORS IM CBM-EXPERIMENT

Humidity in the Gas System
of the Transition Radiation Detector in the CBM Experiment

Institut für Kernphysik
WWU Münster

Ruben Weber

Sommersemester 2018
betreut von
ANTON ANDRONIC
und
CHRISTIAN KLEIN-BÖSING

29. September 2018

Erster Gutachter: Prof. Dr. Anton Andronic

Zweiter Gutachter: PD Dr. Christian Klein-Bösing

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	5
1 Experimentelle Grundlagen	8
1.1 Übergangsstrahlungsdetektoren	8
1.1.1 Vieldraht-Proportional-Kammern	9
1.1.2 Feuchte in MWPCs	10
1.2 Quellen des Feuchteintrags	10
1.3 MWPCs des CBM-TRDs in Hinsicht auf ihren Feuchteeintrag	11
1.4 Struktur des CBM-TRDs	13
2 Der Versuchsaufbau	15
2.1 Die Einzelkomponenten	15
2.1.1 Der Feuchtesensor	15
2.1.2 Das Flussmessgerät	16
2.1.3 Der Sauerstoffsensor	16
2.1.4 Der Umgebungslogger	17
2.1.5 Der Arduino	17
2.1.6 Die Versuchsatmosphäre	18
2.1.7 Der Drucksensor	18
2.1.8 Der Gasaufbau	18
2.2 Der Gesamtaufbau	19
3 Methoden, Ergebnisse und Diskussion	21
3.1 Feuchteintrag durch Schlauchzuleitungen	21
3.1.1 Einfluss der Umgebungsfeuchte und Größenordnung des Feuchte- eintrags	21
3.1.2 Feuchteentwicklung in einem Kammer-Gassystem	28
3.1.3 Beobachtete Zusammenhänge und Tendenzen	31
3.2 Untersuchung einer TRD-Kammer	35
3.2.1 Zeitliche Entwicklung des Feuchteintrags	37
3.2.2 Senkung der Umgebungsfeuchte	42
3.2.3 Abhängigkeit des Feuchteintrags vom Gasfluss	48
3.2.4 Kontinuität der Feuchterate	54
3.2.5 Einfluss der Umgebungsfeuchte bei fortgeschrittener Spülung	60
3.2.6 Druckdifferenz	66
Zusammenfassung	67

Einleitung

Am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt entsteht zur Zeit die Facility for Antiproton and Ion Research (kurz: FAIR). Letztere ist ein Beschleunigersystem, welches die an der GSI schon bestehenden Beschleuniger um den Ringbeschleuniger SIS100 sowie drei Speicher- und Experimentierringe erweitert. Zusätzlich werden weitere Experimente hinzugefügt. Der Ringbeschleuniger SIS100 wird in der Lage sein, eine Vielzahl verschiedener Schwerionenkerne zu beschleunigen. Die Teilchenstrahlen, die produziert werden, sollen sich dabei durch große Intensität und Qualität auszeichnen (vgl. [1]).

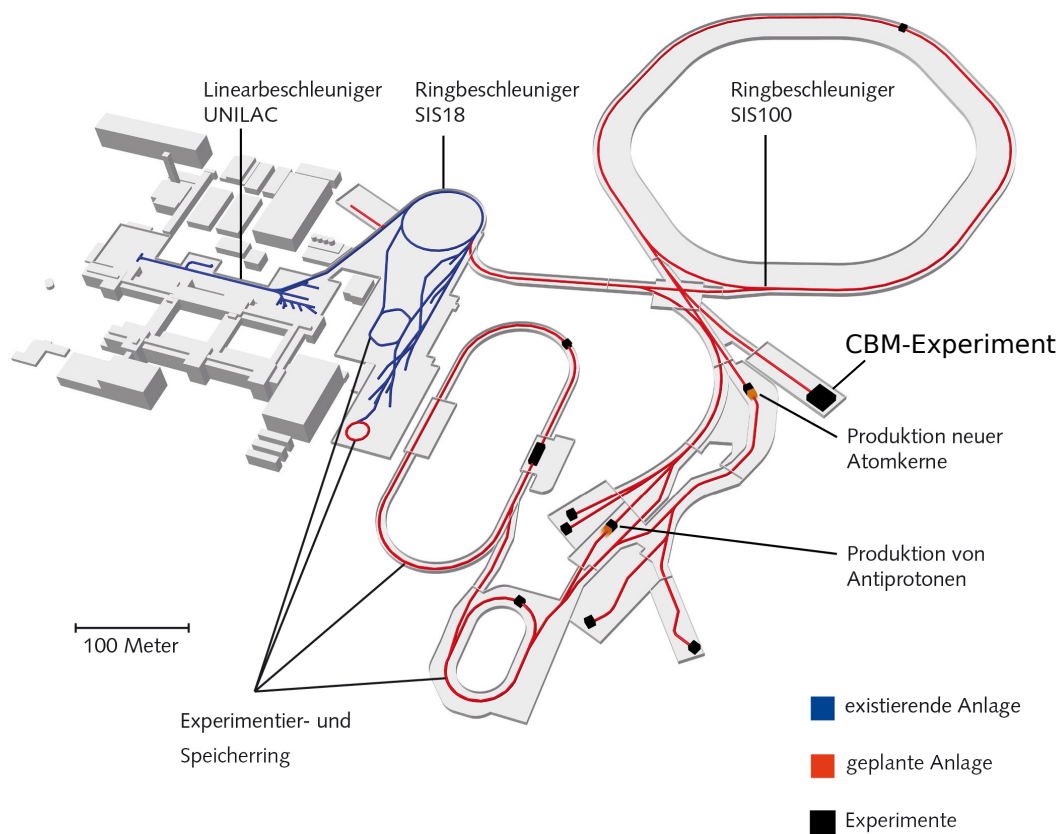


Abbildung 0.1: Zu sehen ist eine schematische Darstellung des Beschleunigersystems an der GSI [1].

Eines der Experimente, welches an diesen Beschleunigerverbund gekoppelt ist, ist das Compressed Baryonic Matter-Experiment (kurz CBM-Experiment), in Abb. 0.1 dargestellt als schwarzes Objekt direkt unterhalb des SIS100-Ringbeschleunigers.

Ziel des CBM-Experiments ist die Erforschung von baryonischer Materie in Zuständen hoher Dichte mittels hochenergetischer Kern-Kern-Kollisionen. Um die für die Erforschung angestrebte Präzision zu erreichen, sollen dazu Reaktionsraten von bis zu 10 MHz erreicht werden. Die an CBM beteiligten Detektoren müssen also großer Strahlung standhalten und mit großer Geschwindigkeit messen.

Die beschleunigten Teilchen aus dem SIS100 werden auf ein ruhendes Target gelenkt. Besagte Detektoren sind hintereinander im Strahlengang jenseits des Targets angeordnet, wobei der Aufbau weitestgehend modular umgesetzt wird. Dies dient dem Zweck, in unterschiedlichen Kollisionstypen optimale Detektorkonfigurationen für die physikalisch relevanten Größen bereitstellen zu können.

Die Einzelkomponenten von CBM sind (vgl. [2, S.12f.])

- ein supraleitender **Dipolmagnet**, dessen magnetisches Feldintegral sich auf 1 T m beläuft. Durch die Krümmung der Trajektorien elektrisch geladener Teilchen wird die Messung des Impulses dieser Teilchen möglich.
- der **Micro-Vertex Detector**, der 5 cm bis 20 cm hinter dem Target im Vakuum verbaut ist, um sekundäre Wechselwirkungspunkte mit einer Genauigkeit von 50 μm bis 100 μm auf der Strahlachse lokalisieren zu können.
- das **Silicon Tracking System**, welches 30 cm bis 100 cm hinter dem Target im Magnetfeld des Dipolmagneten zur Track-Rekonstruktion geladener Teilchen dient. Zudem ermöglicht es eine Impulsmessung mit einer Auflösung von $\Delta p/p = 1,5\%$.
- der **Ring Imaging Cherenkov Detector**, welcher mittels der Erfassung von Cherenkov-Strahlung Elektronen identifiziert. Er wird etwa 1,6 m hinter dem Target in den Strahlengang eingebracht.
- das **Muon Chamber System**, was in Kombination mit dem Silicon Tracking System für eine Myon-Identifikation sorgt.
- der **Transition Radiation Detector** (TRD), der 4,1 m bis 5,9 m hinter dem Target im Strahlengang eingebaut ist. Dieser dient zur Teilchenbahn-Bestimmung und zur Unterscheidung von Elektronen und Positronen ab einem Impuls von $1,0 \frac{\text{GeV}}{c}$.
- das **Time-Of-Flight System**, welches 6 m hinter dem Target die Flugzeit mit einer Zeitauflösung von bis zu 80 ps misst.
- das **Electromagnetic Calorimeter**, welches sowohl direkte Photonen als auch die Zerfälle von neutralen Mesonen zu Photonen erfasst.
- der **Projectile Spectator Detector**, der zur Feststellung der Zentralität der Kollisionen und Bestimmung der Reaktionsebene dient.

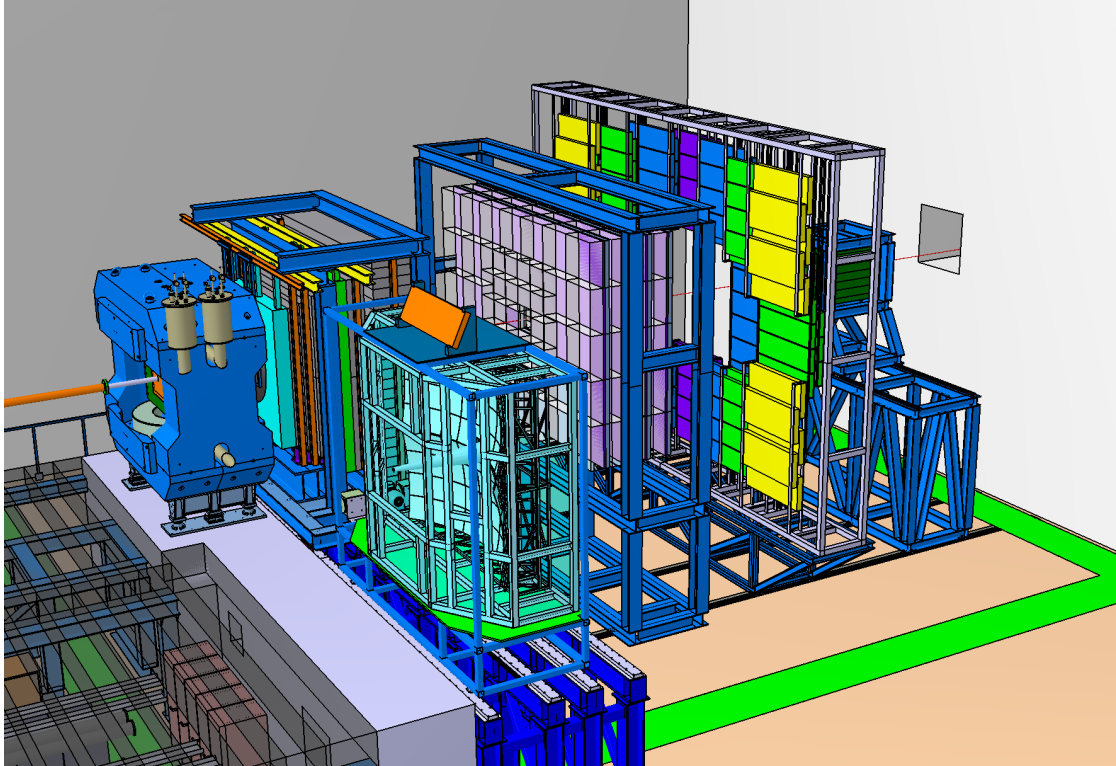


Abbildung 0.2: Schematisch dargestellt ist der Aufbau des CBM-Experiments [2, S.14].
Mittig ist in blassem Lila der TRD eingezeichnet, dessen Kammern in
dieser Arbeit genauer untersucht werden.

In dieser Arbeit wird der Feuchteintrag in die Vieldraht-Proportional-Kammern des Übergangsstrahlungsdetektors (TRD) untersucht. Kenntnisse über diesen Eintrag sind von großer Bedeutung für den Bau des TRDs sowie insbesondere des Detektorgassystems, da Wasser negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Detektors nimmt. Die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen dazu beitragen, die notwendige Leistung der Gasreinigung im Gassystem für den Detektor einzuschätzen, sowie eventuelle Änderungen an der Bauart und dem Versorgungsfluss der Kammern zu motivieren.

1 Experimentelle Grundlagen

1.1 Übergangsstrahlungsdetektoren

Übergangsstrahlungsdetektoren (engl. Transition Radiation Detector, kurz TRD) dienen zum Nachweis, zur Unterscheidung und Ortserfassung hochrelativistischer geladener Teilchen.

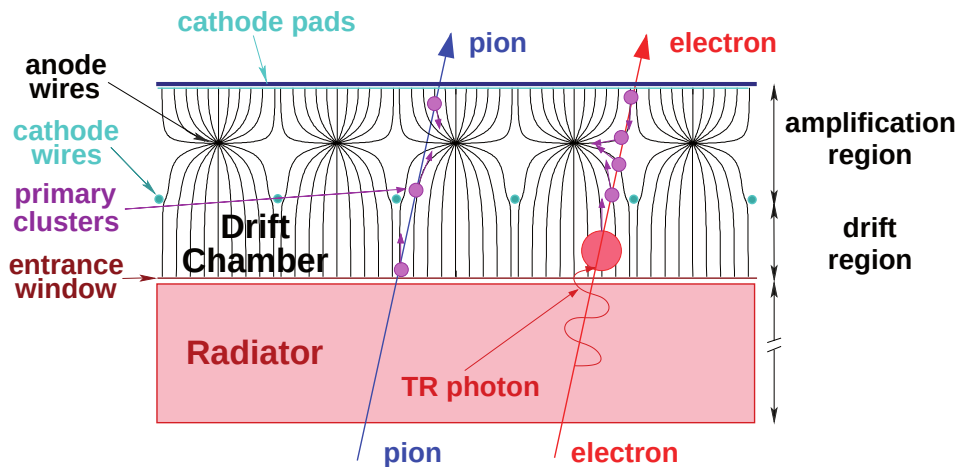


Abbildung 1.1: Eine schematische Darstellung der Funktionsweise eines Übergangsstrahlungsdetektors mit Vieldrahtkammer als Strahlungsdetektor [2, S.35]. Zu sehen sind sowohl Elektronen- als auch Pionendurchgänge durch den Detektor.

Übergangsstrahlung (engl. Transition Radiation, kurz TR) wird beim Übergang eines geladenen Teilchens in ein Medium anderer Dielektrizität erzeugt. Modellhaft kann dies durch die Induktion einer Spiegelladung im anderen Medium erklärt werden. Das geladene Teilchen bildet mit der Spiegelladung einen Dipol. Das elektrische Feld dieses Dipols ändert sich mit dem Abstand vom Teilchen zur Grenzschicht des anderen Mediums. Beim Durchtritt durch die Grenzfläche verschwindet der Dipol schließlich, da keine Spiegelladung mehr induziert wird. Folglich entsteht ein zeitlich verändertes elektisches Feld, welches zur Emission der TR-Photonen führt.

Die Intensität der Übergangsstrahlung hängt im Wesentlichen vom relativistischen Lorentzfaktor $\gamma = \frac{p}{mv}$ ab. Bei gleichem relativistischen Impuls p kann also anhand der Intensität der Übergangsstrahlung auf die Masse m zurückgeschlossen werden [4, S.7]. Die Übergangsstrahlung liegt für den im CBM-TRD favorisierten Radiator im Energiebereich von Röntgenstrahlung zwischen 5 keV und 15 keV (vgl. [2, S.79]).

Die erzeugte Übergangsstrahlung wird in einem im Strahlengang hinter dem Radiator befindlichen Detektor nachgewiesen. Ein oft genutzter Detektor-Typ ist dabei die Vieldraht-Proportional-Kammer (engl. multi-wire proportional chambers, kurz MWPC). Detektorkammer und Radiator werden dabei aufeinander abgestimmt.

1.1.1 Vieldraht-Proportional-Kammern

Vieldraht-Proportional-Kammern nutzen Stoßionisation und Ionisation durch Absorption von Photonen in Kombination mit starken elektrischen Feldern, um Photonen und geladene Teilchen nachzuweisen.

Der Hauptbestandteil eines solchen Detektors ist ein Volumen, welches sich in zwei Teile unterteilen lässt: Den Verstärkungsbereich (engl. amplification region) und den Driftbereich (engl. drift region).

Der Driftbereich liegt im Strahlengang vor dem Verstärkungsbereich. In ihm ionisieren die TR-Photonen die Atome. Durch das zusätzliche Volumen wird die Nachweissicherheit vergrößert. Zudem wäre eine Ionisation in unmittelbarer Nähe zum Draht von Nachteil, da sich in dieser keine vollständige Lawine ausprägen kann.

Im Verstärkungsbereich werden erzeugte Ionen durch elektrische Felder beschleunigt. Typischerweise wird dieses Feld über Drähte aufgebaut, an denen eine Hochspannung anliegt (vgl. Abb. 1.1). In besagtem Feld werden die durch Absorption „freigesetzten“ Elektronen in Richtung der positiv geladenen Anodendrähte beschleunigt. Die Elektronen erlangen dabei so große kinetische Energie, dass sie ihrerseits Teilchen ionisieren, welche ebenfalls wieder beschleunigt werden, bis sie Teilchen ionisieren. Dieser lawinenartige Effekt, welcher vor allem in der Nähe der Drähte, wo das Feld am stärksten ist, stattfindet, sorgt dafür, dass innerhalb sehr kurzer Zeit eine nachweisbare Ladung bei den felderzeugenden Drähten ankommt. Die Ladungsänderung auf den Drähten kann nachgewiesen werden. Eine mögliche Nachweismethode ist dabei die Induktion einer Spiegelladung in nahe Leiterplättchen, welche die Rückwand der Kammer bedecken und Ausmaße in der Größenordnung weniger Zentimeter in beide Raumrichtungen besitzen. Diese Methode hat den Vorteil einer zweidimensionalen Ortsauflösung.

Das beschriebene Volumen ist mit einem speziellen Gasgemisch gefüllt. Dieses weist im Idealfall einen großen Wirkungsquerschnitt mit den zu detektierenden Photonen auf, welche jenes ionisieren. Wie in Abb. 1.1 angedeutet, können die TR-erzeugenden Teilchen ebenfalls durch Stöße das Gas im Detektor ionisieren. Diese direkten Zusammenstöße (vgl. „primary clusters“ in Abb. 1.1) sind mit dem charakteristischen Energieverlust der durchfliegenden Teilchen verbunden. Für das Detektor-Gasgemisch werden Edelgase verwendet, da diese keine weiteren Elektronen aufnehmen und somit nur positiv geladen werden können. Die anderen Bestandteile dienen dazu, die bei der Lawinenbildung erzeugten Photonen zu absorbieren. Diese würden, würden sie nicht absorbiert, zum Teil ihrerseits Lawinen hervorrufen, die die Funktion des Detektors behindern. Für die Absorption dieser Photonen eignen sich organische Moleküle besonders gut, da sie aufgrund ihrer vielen Freiheitsgrade gute Photoabsorber in großen Wellenlängenbereichen sind.

1.1.2 Feuchte in MWPCs

Feuchtigkeit in MWPCs führt zu Verringerung der Gasverstärkung und der Driftgeschwindigkeit. Dies ist auf das statische elektrische Dipolmoment des Wassermoleküls zurückzuführen, was für einen großen Wechselwirkungsquerschnitt mit Elektronen sorgt. Mit zunehmender Wasserkonzentration verlieren also immer mehr Elektronen so viel kinetische Energie durch Wechselwirkung mit Wassermolekülen, dass sie keine weiteren Atome ionisieren können. Gerade die Verringerung der Driftgeschwindigkeit ist für Hochraten-Experimente wie CBM von großer Relevanz: Jene verringert die maximale Messrate. Als Grenzwert für die Feuchtekonzentration gilt gemeinhin ein empirischer Wert von 1000 ppmV.

1.2 Quellen des Feuchteeintrags

Für die Feuchte in einem Gassystem sind verschiedene Quellen denkbar: Feuchte, die durch kleine Undichtigkeiten eintritt, Feuchte, die durch dünne Schichten im Gassystem hindurch diffundiert, Feuchte, die von Teilen des Gassystems ausgedampft wird und solche, die sich zu Beginn der Messung an den Oberflächen im Gassystem befindet. Erstere beiden sind kontinuierliche Beiträge, welche über die ganze Messung beobachtbar sind. Letztere beiden sollten im Laufe der Messung nachlassen.

Feuchte, die durch kleine Undichtigkeiten eindringt, wird durch größere Söge ins Gassystem, z.B. durch Unterdruck oder größere Flüsse, vermehrt. Der Nachweis solcher Feuchtequellen erfolgt durch Variation des Flusses und Berechnung der Feuchte-Eindringrate. Auch ist eine Temperaturabhängigkeit sowie eine Abhängigkeit von der umgebenden Feuchte naheliegend.

Ausgasen ist ein Prozess, der in Festkörpern von Diffusion und Desorption dominiert wird (vgl. [8, S.202-204]). Er ist folglich stark feuchtekonzentrations- und temperaturabhängig. Für die Diffusion durch die Wände des Gassystems ist des weiteren die Dicke und das Material dieser relevant.

Die **einflussreichsten Parameter** für den Feuchteeintrag in einem Gassystem sind zusammenfassend also:

- (Umgebungs-) Temperatur
- Umgebungsfeuchtigkeit
- Gasfluss
- Gassystem-Geometrie und Material
- differentieller und absoluter Druck

1.3 MWPCs des CBM-TRDs in Hinsicht auf ihren Feuchteeintrag

Die Vieldrahtkammern des CBM-TRDs weisen neben dem Verstärkungsbereich auch einen Driftbereich auf. Die Driftregion ist dabei 5 mm tief. Der Abstand zwischen Kathoden-Pad-Rückwand und Anodendrahten liegt bei 3,5 mm. Ebenso groß ist der Abstand zwischen Anodendraht-Ebene und Kathodenraht-Ebene. Die Drähte sind dabei räumlich gegeneinander versetzt parallel ausgerichtet. Die Kathoden-Pads sind in vier verschiedenen Größen verbaut. Die Größe der Pads ist für die Raumauflösung entscheidend, da die induzierte Spiegelladung über die Pads nachgewiesen wird.

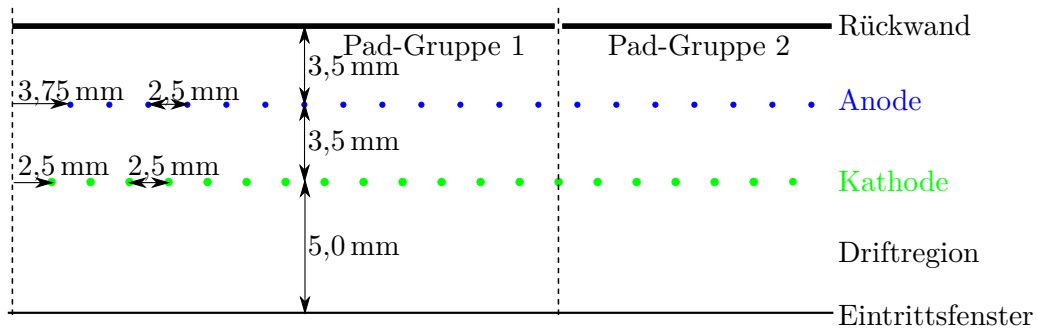


Abbildung 1.2: Zu sehen ist eine schematische Darstellung des inneren Aufbaus der MWPC [2, S.66].

Die Größe der Driftregion ist im Vergleich zu anderen MWPCs (zum Beispiel denen des ALICE-TRDs) klein. Wie in Abschnitt 1.1.1 beschrieben, erhöht eine Driftregion die Stabilität der Gasverstärkung und die TR-Absorptionsrate. Die Driftregion ist hier klein gewählt, da durch Vergrößerung der Driftregion die Signal-Nachweiszeit ansteigen könnte. Dies wäre für Hochratenexperimente wie CBM von Nachteil. Weiterhin könnte eine Vergrößerung der Driftregion eine größere Ansammlung von Raumladungen zur Folge haben. Auch dies ist für den Betrieb des Detektors nicht zuträglich.

Für diese Arbeit sind gerade die Materialien von Relevanz, welche die oben beschriebene Kammer begrenzen, da diese den Wassergehalt in der Kammer beeinflussen.

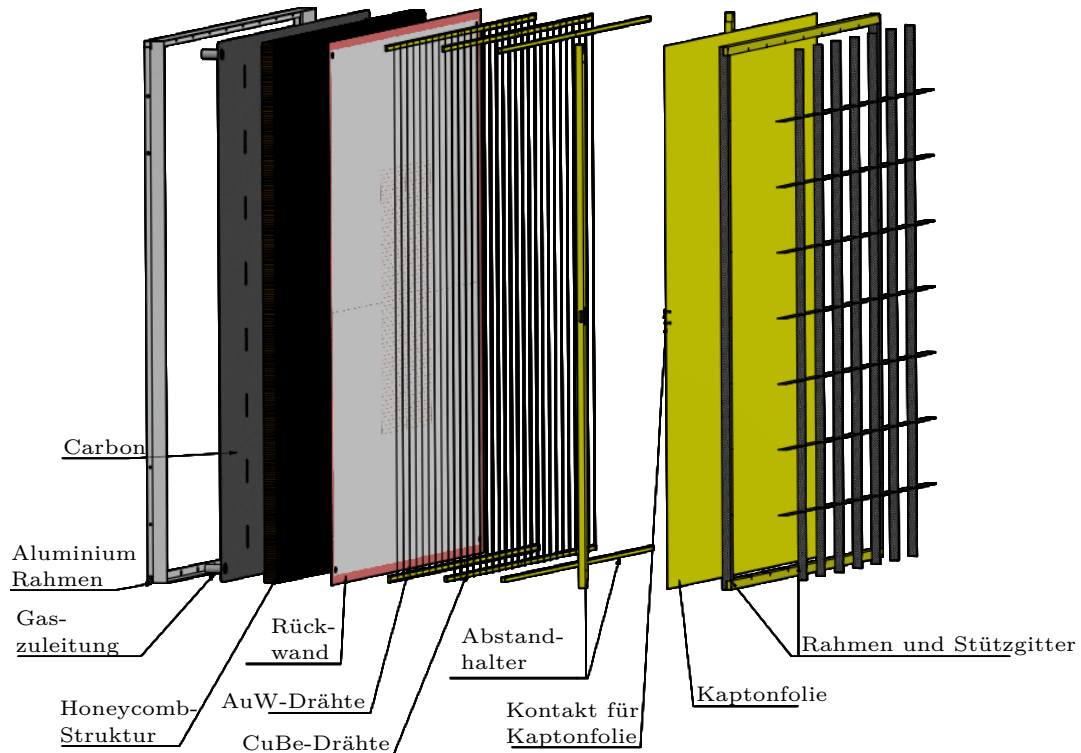


Abbildung 1.3: Zu sehen ist eine Skizze des Aufbaus einer CBM-TRD-MWPC [2, S.64, Abb. 5.10].

Das Eintrittsfenster besteht aus $25\text{ }\mu\text{m}$ dicker Kapton-Folie, welche an der Innenseite mit 50 nm Aluminium beschichtet ist. Dieses dient auch als Elektrode für das elektrische Feld in der Kammer, sodass es möglichst keine Wölbungen aufweisen sollte. Die maximale Druckdifferenz zwischen Innen- und Außendruck ist dadurch begrenzt auf $0,8\text{ mbar}$. Die Seitenwände (Abstandhalter in Abb. 1.3) sind aus Vetronite G11. Die Rückwand der Kammer besteht aus den Kathoden-Pads aus Kupfer, welche $25\text{ }\mu\text{m}$ dick sind. Die Kathoden-Pads sind auf eine Platte aus Platinenmaterial, das der Klasse FR-4 angehört, aufgeätzt. Dieses besteht aus Epoxidharz und Glasfasergewebe. Auch der Kleber, welcher verwendet wird, um die Einzelbestandteile zu verbinden, gehört zur Gruppe der Epoxidharze.

Epoxidharze sind sehr unterschiedlich in ihren Materialeigenschaften. Allgemein beläuft sich die Wasseraufnahme von Epoxidharzen auf wenige Prozent [7, S.22-24]. An den Oberflächen ist ebenfalls Wasseranlagerung möglich (vgl. [7, S.22-24]). Für die Feuchteentwicklung der Kammer ist also zu erwarten, dass zunächst alle Epoxidharz-enthaltenden Teile ausgasen. Ein Einfluss von der Umgebungsfeuchtigkeit ist vor allem durch das dünne Kapton-Eintrittsfenster zu erwarten.

1.4 Struktur des CBM-TRDs

Der CBM-TRD besteht aus vier Lagen, welche jeweils aus mehreren verschiedenen TRD-Modulen zusammengesetzt sind. Die einzelnen TRD-Module existieren in zwei Größen: $57\text{ cm} \times 57\text{ cm}$ und $99\text{ cm} \times 99\text{ cm}$. Diese Module bestehen ihrerseits aus den in Abschnitt 1.1 erwähnten Komponenten: einem Radiator, einer ROC und Frontendelektronik. In Abb. 1.4 ist zu sehen, wie die Module zu einer TRD-Schicht zusammengesetzt werden.

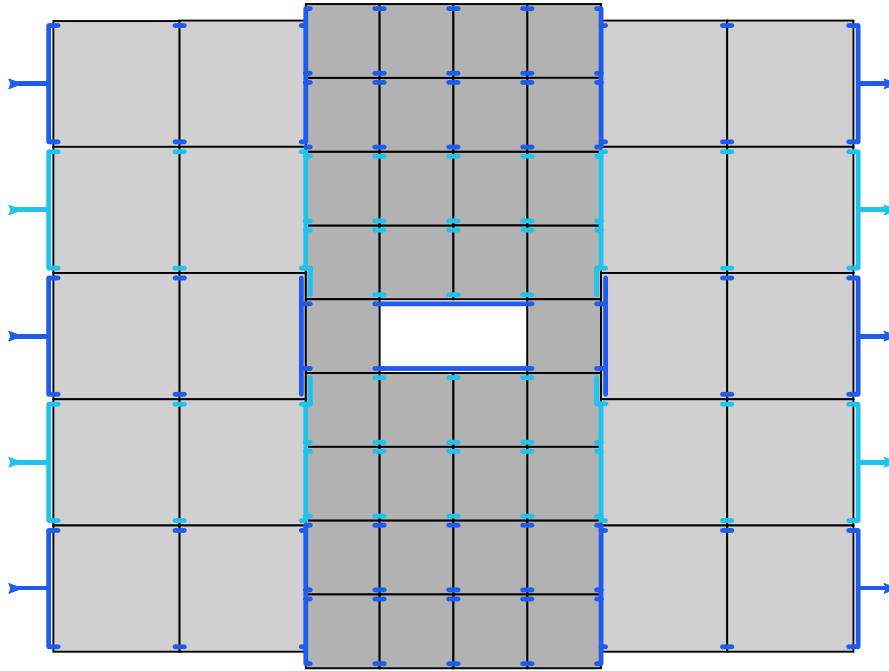


Abbildung 1.4: Eine schematische Darstellung der Modulordnung einer TRD-Lagen [2, S.108, Abb. 8.7]. In blau sind die Gasversorgungswege eingezeichnet.

Wie in Abb. 1.4 zu erkennen, werden im zentralen Bereich ausschließlich kleine Module verwendet. Diese werden mittig in gesamter vertikaler Richtung des Detektors verbaut. Weiter außen in der Horizontalen sind große Module verbaut.

Wie ebenfalls aus Abb. 1.4 hervorgeht, werden jeweils vier große und acht kleine Module über eine einzelne Gasversorgungsline betrieben. Einzige Ausnahme bildet die mittlere Gaslinie, über die lediglich vier große und zwei kleine Module versorgt werden.

Die Gaslinien sind für den Betrieb im CBM-Experiment in ein geschlossenes System aus Regulatoren und Aufbereitern eingebunden. Über diverse Zwischenstufen wird das Gasgemisch verdichtet, gekühlt, nachgefüllt und auf Verunreinigungen untersucht. Besagte Verunreinigungen – vor allem Sauerstoff und Wasser – werden durch einen Filter aus aktiviertem Kupfer entfernt. Um eine unterbrechungsfreie Filterung zu gewährleisten, werden zwei parallele Aufbereitungsstufen unterhalten. Während eine der beiden Aufbereitungsstufen ausgeheizt wird, bleibt die andere in Betrieb.

Betrachtet man die Struktur in Abb. 1.4 also im Kontext des Feuchtigkeitseintrags, welcher maßgeblich durch das Eintrittsfenster aus Kapton-Folie erfolgt, so muss der Fluss durch jede Gasversorgungslinie so bemessen sein, dass dieser den Feuchtigkeitseintrag durch

$$A_1 = 4 \cdot 99 \text{ cm} \cdot 99 \text{ cm} + 8 \cdot 57 \text{ cm} \cdot 57 \text{ cm} = 65\,196 \text{ cm}^2 \quad (1.1)$$

beziehungsweise

$$A_2 = 4 \cdot 99 \text{ cm} \cdot 99 \text{ cm} + 2 \cdot 57 \text{ cm} \cdot 57 \text{ cm} = 45\,702 \text{ cm}^2 \quad (1.2)$$

Kapton-Folie aufnehmen kann, ohne dass der gesetzte Ziel-Wert von 200 ppmV [2, S.106] überschritten wird. Dabei ist insbesondere auch die Leistung der Aufbereitungsstufen zu berücksichtigen.

Die Zuleitungen zu den Lagen sind aus Stahl und daher für den Feuchtigkeitseintrag nicht relevant.

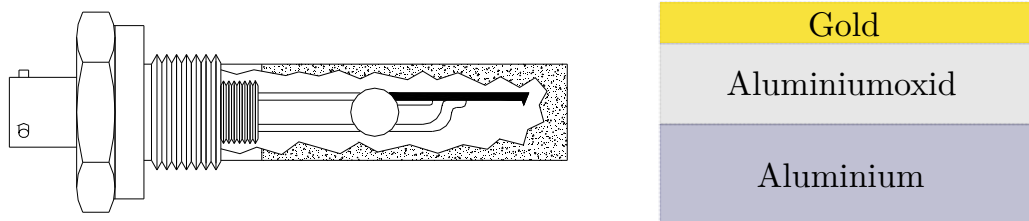
2 Der Versuchsaufbau

Wie in Abschnitt 1.2 motiviert, wird ein Aufbau benötigt, der eine Untersuchung der Feuchtigkeit in Kammer und Schlauch in Abhängigkeit der umgebenden Feuchte und Temperatur ermöglicht.

2.1 Die Einzelkomponenten

2.1.1 Der Feuchtesensor

Zur Messung der Feuchte wird ein Feuchtesensor des Modells M35 der Firma General Electric verwendet. Gemessen wird dabei mit einer Messsonde, die in einer Stahlkapsel in den Gasfluss eingebracht wird. Die Messsonde besteht im Wesentlichen aus einem Aluminium-Band, welches durch ein spezielles Verfahren anodisiert wird, um eine poröse Oxid-Schicht zu erzeugen. Über diese Oxidschicht wird eine dünne Goldschicht aufgedampft. Die Dicke dieser Goldschicht wird vom Hersteller nicht genauer angegeben. Die Aluminium-Basis bildet nun mit der Goldschicht und dem Aluminiumoxid als Dielektrikum einen Kondensator.



- (a) Dargestellt ist der Sensorkopf mit Einblick in das Innere [5, S.2]. Die schwarze Platte auf der rechten Seite ist der beschriebene Kondensator. (b) Zu sehen ist eine schematische Darstellung des Schichtaufbaus des Sensors.

Abbildung 2.1: Zu sehen sind Skizzen des Sensorkopfes und des Messkondensators. Die Schichtdicken in Abb. 2.1b sind nicht maßstabsgetreu.

Durch die Goldschicht kann, abhängig von der umgebenden Konzentration, Wasser diffundieren. Dieses ändert die Leitfähigkeit des porösen Aluminiumoxids und damit die Impedanz, die der Kondensator darstellt. Zwischen der Impedanz des Kondensators und der umgebenden Feuchte kann also ein funktionaler Zusammenhang gefunden werden. Das Messgerät misst die Impedanz der Messsonde und ordnet diese einem Feuchtigkeitswert zu.

Für die Genauigkeit des Messgeräts ist eine Bestimmung des Taupunktes mit einer Genauigkeit von $\pm 2^\circ\text{C}$ zwischen 5,3 ppmV und 12 100 ppmV angegeben ([5, S.77]). Außerhalb dieses Intervalls liegt die Genauigkeit bei $\pm 3^\circ\text{C}$ ([5, S.77]). Die Umrechnung vom Taupunkt in die in dieser Arbeit genutzte Einheit ppmV ist nicht linear, sondern exponentiell und druckabhängig. Eine Angabe der Unsicherheit für dieses Messgerät erweist sich also als schwierig. Das Messgerät diskretisiert die Messwerte jedoch abhängig von der gemessenen Feuchte. Da sich die Unsicherheiten auf die Genauigkeit der angezeigten Werte bezieht, bietet die Größe der Diskretisierung zumindest eine untere Grenze für die Unsicherheit. In dieser Arbeit werden stets einige hundert Messwerte zeitlich gemittelt. Die empirische Standardabweichung dieses Mittelwerts in Kombination mit der Unsicherheit durch Diskretisierung sollte eine gute Einschätzung der Unsicherheit darstellen. Die Aufnahme der Messwerte dieses Messgeräts erfolgt über ein 4 mA-20 mA-Signal, welches das Gerät direkt ausgibt. Dieses Signal wird aufgrund der größeren Störungs-Resistenz einem Spannungssignal vorgezogen.

2.1.2 Das Flussmessgerät

Das verwendete Flussmessgerät ist ein Massen-Flussmessgerät des Typs GFM17 der Firma Aalborg. Der Messbereich des Geräts beläuft sich auf $0 \frac{1}{h}$ bis $100 \frac{1}{h}$.

Die Messdatenaufzeichnung erfolgt ebenfalls durch ein Stromsignal von 4 mA bis 20 mA. Um den Fluss zu messen, ist das Messgerät in diesen eingebracht. Die Messung erfolgt durch Abzweigung einer kleinen Gasmenge, welche im Messgerät mittels einer Heizspule erhitzt wird. Gemessen wird die Zeit, die dieses aufgeheizte Gas braucht, um zu einer Stelle in bekannter Entfernung innerhalb des Messgeräts zu fließen.

Die Unsicherheiten der Messdaten sind vom Hersteller mit $\pm 1\%$ des Messbereichs angegeben, belaufen sich also auf $\pm 1 \frac{1}{h}$ [9, S.6]. Hinzu kommt die Digitalisierungsunsicherheit (siehe dazu Abschnitt 2.1.5), welche sich auf etwa $\pm 0,2 \frac{1}{h}$ beläuft. Auch dieser Wert wird über mehrere hundert Werte gemittelt. Die Standardabweichung ist dabei erheblich geringer als die vom Hersteller angegebene Unsicherheit.

2.1.3 Der Sauerstoffsensor

Als Sauerstoffmessgerät dient eine Orbisphere 510 der Firma Hach. Der verwendete Sensor ist ein elektrochemischer Sensor, der für einen extrem breiten Messbereich von 20 ppmV aufwärts geeignet ist. Der Sensor spaltet mittels Elektrolyse die vorhandenen Sauerstoffmoleküle, sodass ein Stromfluss an den Elektroden entsteht, welcher proportional zur vorhandenen Menge an Sauerstoff ist. Aus Messung des Stroms kann also indirekt die Sauerstoffkonzentration gemessen werden.

Die Datenaufnahme erfolgt über eine RS-485 Schnittstelle, welche mit einem entsprechenden Adapter an einen Computer angeschlossen ist.

In dieser Arbeit ist der Sauerstoffanteil keine quantitativ zu untersuchende Größe. Es ist lediglich anzumerken, dass durch die hauseigene Kalibration der Bereich zwischen 0 ppmV und 20 ppmV nicht zuverlässig ausgelesen werden kann. Hier reicht es allerdings zu wissen, dass der Sauerstoffanteil niedrig ist.

2.1.4 Der Umgebungslogger

Der Sensor misst Temperatur und relative Feuchte. Es handelt sich um einen Datalogger vom Typ 5185 der Firma PeakTech. Das Gerät schreibt die aufgenommenen Messpunkte in einen internen Speicher, der 2×16000 Messpunkte aufnehmen kann.

Über die genaue Funktionsweise wird bei diesem Gerät vom Hersteller keine Angabe gemacht.

Die Unsicherheiten für Temperatur und Feuchtigkeit liegen bei $\pm 0,3^\circ\text{C}$ bzw. $< \pm 0,5\%$ relativer Feuchte pro Jahr [6, S.16].

2.1.5 Der Arduino

Zur Messung der 4 mA-20 mA-Signale wird ein Nachbau eines Arduino Uno R3 der Firma Elego mit einem Libelium Shield verwendet. Letzteres kann bis zu vier 4 mA-20 mA-Signale auf einmal messen. Dabei wird das analoge 16 mA große Intervall digitalisiert. Die Umwandlung erfolgt dabei durch Zerlegung des Intervalls in 512 Teile, sodass sich eine Genauigkeit von etwa 0,03 mA ergibt. Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass der entsprechende Shield mit 10bit – also 1024 Teilen – ausgewiesen ist, diese aber offenbar nicht komplett nutzt.

Die Nutzung von 4 mA-20 mA-Signalen erfolgt aufgrund ihrer großen Stör-Resistenz im Vergleich zu Spannungssignalen. Letztere könnten schon durch einen nicht-optimalen Kontakt verfälscht werden.

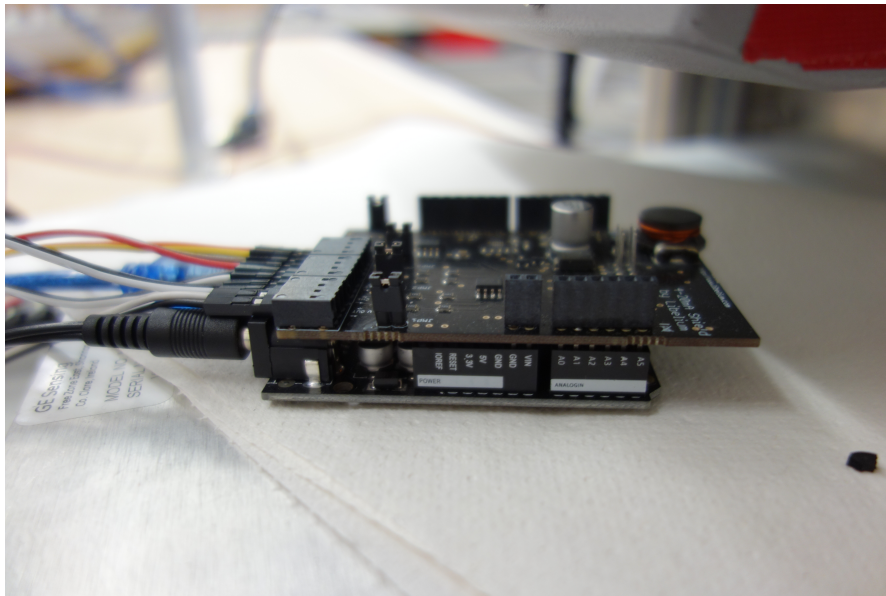


Abbildung 2.2: Zu sehen ist der verwendete Arduino mit dem Libelium-Shield. Das blaue Kabel an der linken Seite führt zum Computer.

Der Arduino ist an einen Computer angeschlossen, der die ausgegebenen Daten mit-schreibt. Diese Datenaufnahme erfolgt alle zwei Sekunden.

2.1.6 Die Versuchsatmosphäre

Es soll die eingetragene Feuchtigkeit in Abhängigkeit von Umgebungsparametern wie zum Beispiel Luftfeuchtigkeit und Temperatur bestimmt werden.

Für die Temperaturabhängigkeit ist keine Regelung vorgesehen. Es wird also nicht eine Temperatur eingestellt, sondern über längere Zeiträume beobachtet, in denen sich die Temperatur ändert. Die Aufnahme der Temperaturdaten erfolgt über den Peaktech Datenlogger.

Um unterschiedliche Luftfeuchtigkeiten untersuchen zu können, werden die untersuchten Objekte unter einer Plexiglashaube angeordnet, welche ihrerseits mit sauberer Druckluft gespült wird. Die Filterung erfolgt durch Umleitung der Luft in eine Drehbewegung. Diese treibt schwere Partikel aus dem Luftstrom in einen tieferen Abfangbehälter. Durch Regelung der Druckluftzufuhr besteht also die Möglichkeit, verschiedene Luftfeuchtigkeiten in der Atmosphäre von Detektormodul und zuleitenden Detektorgasschläuchen einzustellen. Die Einstellung ist dabei eher digitaler Natur: Bei abgeschalteter Druckluft liegt die relative Feuchte zwischen 30 % und 60 %. Wird die Haube hingegen gespült, liegt sie bei unter 10 %.

2.1.7 Der Drucksensor

Der Drucksensor misst die Druckdifferenz zwischen einem Gassystem und der umgebenden Luft. Diese Messung erfolgt dabei durch Vermessung der Auslenkung einer bekannten Membran. Jene ist dabei druckdifferenzabhängig. Die Aufnahme der Messung erfolgt dabei über ein 4 mA-20 mA-Signal, welches durch den Arduino erfasst wird.



Abbildung 2.3: Abgebildet ist der verwendete Drucksensor in Draufsicht. Rechts ist der Schlauch des Gassystems zu erkennen. Oben links ist ein Stück des zum Arduino führenden Kabels zu sehen.

2.1.8 Der Gasaufbau

Für die Verbindung der Einzelkomponenten des Sagox-Gassystems werden Edelstahlrohre und Polyamidschläuche verwendet. Die Polyamid-Schläuche tragen die Aufschrift

„DIN 73378-6x1-PA 12 PHL-23/08-Ktn. 11“. Sie genügen also der DIN 73378, haben einen Gesamtdurchmesser von 6 mm und eine Wanddicke von 1 mm. Weiterhin sind sie aus Polyamid, genauer mutmaßlich aus Laurinlactam (PA 12). Die Geometrie der Edelstahlrohre ist identisch.

Die Übergänge zwischen Rohren und Messgeräten werden über Stahl-Schraubverbinder der Firma Swagelok realisiert. Einzig der Übergang von Polyamid-Schlauch zu Kammer ist mit Steckverbindern umgesetzt.

2.2 Der Gesamtaufbau

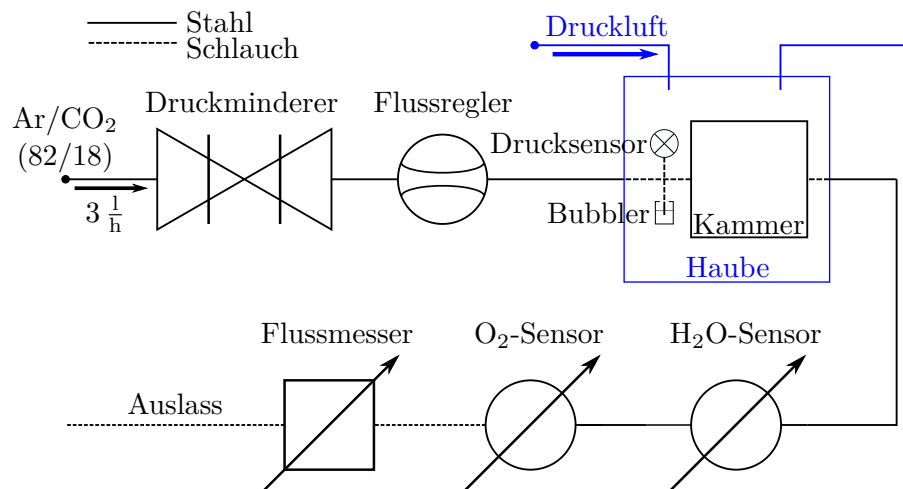


Abbildung 2.4: Dargestellt ist ein Flussdiagramm des Versuchsaufbaus. Zur besseren Unterscheidbarkeit ist das Druckluftsystem in blau dargestellt.

Das Gas wird einer Gasflasche entnommen. Ein Edelgas-Druckminderer senkt den Druck auf ein Maß zwischen 1 bar und 2 bar. Da die Detektorkammer keine Drücke in dieser Größenordnung aushält, ist der Flussregler *vor* der Haube eingebaut. Bis zur Haube werden Stahlrohre zur Verbindung der Komponenten verwendet. Unter der Haube wird mit Polyamid-Schläuchen verbunden. Zunächst werden Bubbler und Drucksensor an Abzweigungen vom flussführenden Schlauch angebracht. In letzteren wird dann die Kammer eingebaut. Diese ist leicht geneigt, um eine vollständige Spülung der Kammer zu erreichen. Zudem muss der Kontakt des Eintrittsfensters mit der Umgebungsatmosphäre sichergestellt sein. Der Einlass erfolgt am unteren Ende der Kammer. Vom Auslass der Kammer wird der Schlauch direkt zum Ausgang der Haube geführt, von dem aus wieder Stahlrohre Verwendung finden. Direkt hinter dem Ausgang der Haube sind Feuchtigkeits- und Sauerstoffsensoren installiert. Zuletzt wird der Gasfluss über einen Polyamid-Schlauch mit dem Flussmesser verbunden, auf den der ca. 3 m lange und hochgestellte Auslass folgt.

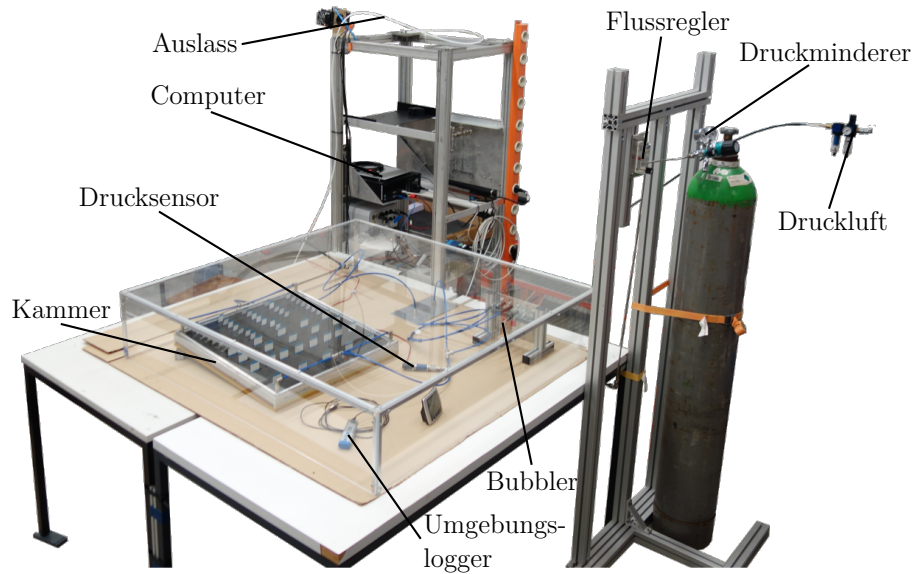


Abbildung 2.5: Zu sehen ist eine Fotografie des Versuchsaufbaus. Die sichtbaren funktionellen Teile aus Abb. 2.4 sind beschriftet. Weiterhin sind auch der Umgebungslogger und der Computer zu sehen.

Wie in Abb. 2.5 nicht zu sehen, sind die Sensoren, das Flussmessgerät und der Auslass unter beziehungsweise hinter dem Tisch montiert. Im hinteren Teil des Aufbaus ist ein Rack zu erkennen, in dem die elektronischen Komponenten der Messgeräte montiert sind. Auch sind im Rack der besagte Arduino, das Flussmessgerät und der Computer, der die Daten mitschreibt, untergebracht. Der Auslass ist, wie in Abb. 2.5 zu erkennen, hochgestellt. Dies dient der Reduktion von Kontaminationen des schwereren Detektorgases durch Rückflüsse umgebender Luft.

3 Methoden, Ergebnisse und Diskussion

Die unternommenen Messungen und die zur Auswertung notwendigen Schritte werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert. Die Unsicherheitsbestimmung erfolgt nach den *Guides to the expression of uncertainty in measurement*, kurz GUM. Weiterhin gilt es zu beachten, dass in allen Korrelationsdiagrammen nur die empirische Standardabweichung als Unsicherheit dargestellt ist. Dies geschieht zugunsten besserer Erkennbarkeit von Tendenzen in den Grafiken. Die Vorgehensweise ist aufgrund der Natur der systematischen Fehler legitim: Wenn die Unsicherheiten Fluktuationen in den Messwerten verursachen, werden sie durch die empirische Standardabweichung erfasst. Wenn sie hingegen nur Offsets zu den Messwerten beitragen, bleiben die gefundenen Korrelationen qualitativ gültig.

Zur Erstellung der Graphen wird das Programm GnuPlot verwendet.

3.1 Feuchteeintrag durch Schlauchzuleitungen

Zur Charakterisierung der Schläuche werden solche in unterschiedlicher Länge in unterschiedlichen Umgebungsfeuchten gemessen. Dies geschieht unter Verwendung des in Kapitel 2 beschriebenen Versuchsaufbaus.

3.1.1 Einfluss der Umgebungsfeuchte und Größenordnung des Feuchteeintrags

Anhand eines Schlauchstücks von 1 m Länge werden grundsätzliche Eigenschaften des Schlauchs untersucht. Dazu wird das Stück bei normaler und trockener Umgebungsluft vermessen. Es wird beobachtet, ob ein Knick in der Gasfeuchte beobachtbar ist, wenn von feuchter auf trockene Umgebungsluft gewechselt wird.

Qualitative Untersuchung des Trocknungsverhaltens des Schlauchs

In dieser Messung wird die Feuchtigkeit im Gas über einen großen Zeitraum von mehreren Wochen beobachtet. Dabei wird insbesondere eine Beeinflussung durch die äußere Atmosphäre untersucht, indem nach ca. einer Woche die Haube getrocknet wird.

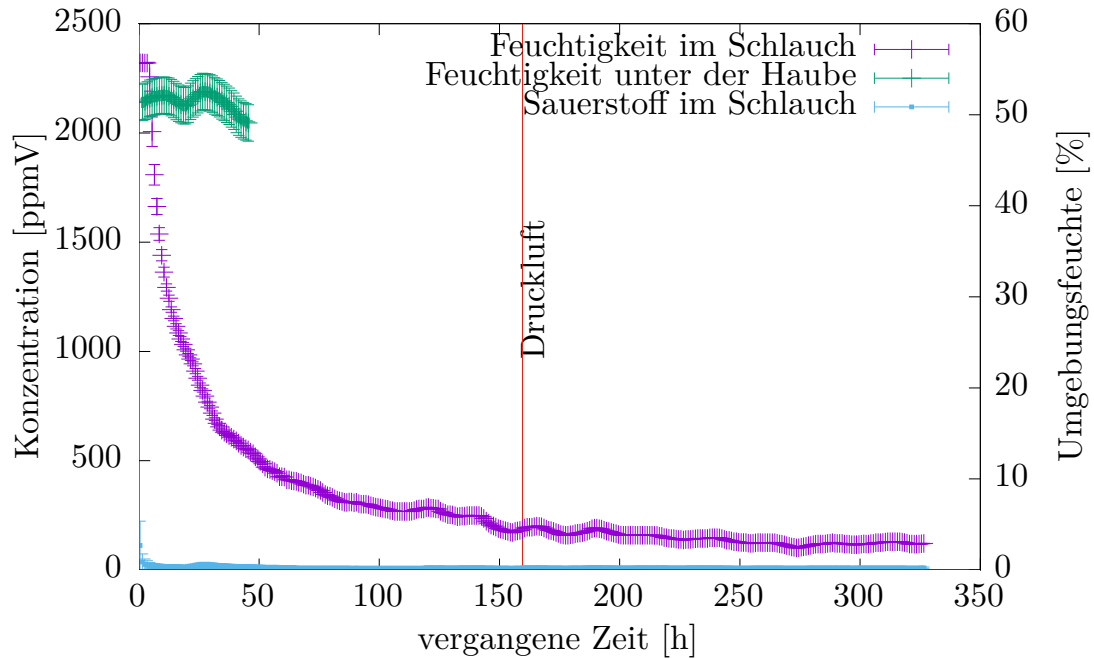


Abbildung 3.1: Zu sehen ist der Konzentrationsverlauf in einem 1 m langen Stück Schlauch über einen Zeitraum von ca. 320 h bei einem Fluss von etwa $5 \frac{1}{h}$. Auf der zweiten y -Achse ist überdies die Umgebungsfeuchte aufgetragen. Die Werte sind jeweils über eine Stunde gemittelt.

Wie in Abb. 3.1 zu erkennen, fällt die Wasserkonzentration im Inneren des Gassystems exponentiell über die Zeit ab. Es sind periodische Schwankungen in den Messwerten für die Feuchte zu erkennen, die eine Periodendauer von einem Tag aufweisen und vermutlich auf temperaturinduzierte Flussschwankungen zurückzuführen sind. In Abb. 3.1 ist überdies der Zeitpunkt eingezeichnet, zu dem die Druckluft eingeschaltet wird. Aufgrund einer leeren Batterie im Umgebungslogger sind nach etwa 50 h keine Umgebungsdaten mehr aufgezeichnet. Eine vorangemessene Messung zeigt jedoch einen exponentiellen Feuchteabfall beim Einschalten der Druckluft, der auch in Abb. 3.2 dargestellt ist.

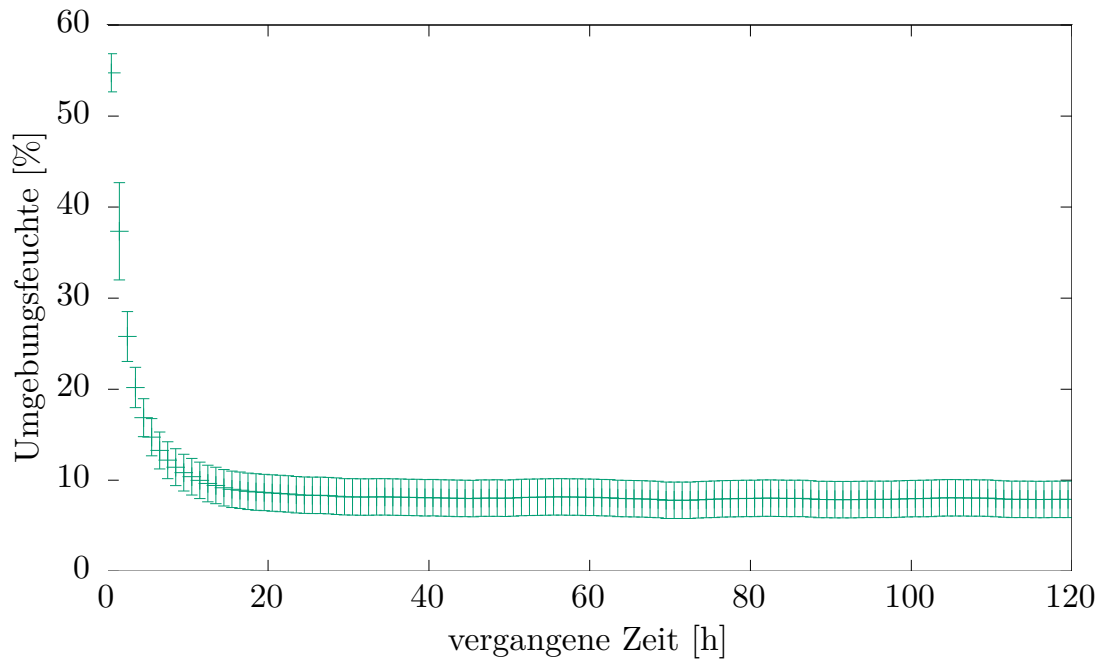


Abbildung 3.2: Dargestellt ist der Verlauf der Feuchtigkeitskonzentration unterhalb der Haube aufgetragen auf die Zeit nach Anschalten der Druckluft. Die Werte sind für jede Stunde gemittelt.

In Abb. 3.1 ist keine Abweichung vom stetigen Verlauf der Feuchteentwicklung durch das Einschalten der Druckluft zu erkennen. Zwar ist ein Zusammenhang mit der Umgebungsfeuchte anhand dieser Messung nicht vollständig auszuschließen, da auch Flussschwankungen in diesem Bereich einen etwaigen Einfluss der Umgebungsfeuchte überdecken könnten, jedoch kann geschlossen werden, dass der Einfluss äußerer Feuchte klein beziehungsweise nur auf größeren Zeitskalen relevant ist.

Der Sauerstoffanteil im Gas ist unterdessen um ein vielfaches geringer, als der Wasseranteil. Die Verläufe beider Konzentrationen sind sehr unterschiedlich. Während der Sauerstoffgehalt nach wenigen Stunden auf eine – relativ zur Feuchte – kleine Gleichgewichtskonzentration sinkt, die sich im Laufe der Messzeit kaum verändert, klingt die Feuchtekonzentration langsamer ab. Am Ende der Messung liegt zwischen Wasser- und Sauerstoffkonzentration ein Faktor 13, der jedoch ob der großen Unsicherheit der Sauerstoffkonzentration unterhalb von 20 ppmV mit Vorsicht zu betrachten ist.

Insgesamt kann also aus dieser Messung gefolgert werden, dass die Gasfeuchte aus den verwendeten Polyamidschläuchen nur eine sehr schwache Abhängigkeit von der umgebenden Feuchte aufweist. Dieses Ergebnis wird im folgenden Abschnitt 3.1.1 überprüft. Weiterhin ist als erstes wichtiges Ergebnis festzuhalten, dass die Entwicklung von Sauerstoff- und Wasserkonzentrationen nicht gleichartig sind.

Handelt es sich bei dem verwendeten Polyamid, wie vermutet, um Laurinlactam, so liegt die Wasseraufnahme bei 1,8 % [10, S.644]. Im Laufe der Messung wird also vermutlich

sowohl das Wasser von der Oberfläche der Polyamid-Schläuche als auch das Wasser, was sich in diesen angesammelt hat, aus dem Schlauch getragen, bis nur eine konstante Feuchterate aufgrund von Permeation übrig bleibt.

Es wird vermutet, dass der Anteil der Feuchte, der durch Ausgasen in das Gassystem eintritt, sich ähnlich verhält, wie das Ausgasen einer dünnen Metallplatte, welche zu beiden Seiten in ein Vakuum ausgast. Zwar liegt in diesem Versuch kein Vakuum vor, jedoch ist die Wasserkonzentration im Detektorgassystem gering, sodass vielleicht, aufgrund des geringen Partialdrucks des Wassers, die Beschreibung trotzdem angewendet werden kann. Auch sind die Wasser-Transport-Prozesse in einem Kunststoff mutmaßlich verschieden von denen in einem Metall. Die Transport-Art geht jedoch nicht in die in [11, S.72] durchgeführte Rechnung ein.

Die zeitliche Entwicklung des Ausgasens wird für die beschriebene Situation nach [11, S.72] wie folgt beschrieben:

Es wird eine die Ausgasung charakterisierende Zeitkonstante $t_a = \frac{4d^2}{\pi^2 D}$ eingeführt. Dabei ist D die temperaturabhängige Diffusionskonstante und $2d$ die Dicke der Metallplatte. Für den Teilchenstrom an der Oberfläche der Metallplatte gilt dann nach einer Zeit t von $t > 0,5t_a$ näherungsweise für den Diffusionsstrom (vgl. [11, S.72, Gl. (3.16)])

$$j_{\text{diff}} = j_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{t_a}\right). \quad (3.1)$$

Der Ausgangsstrom j_0 ist Teilchenzahl-abhängig.

Für den Strom zu Zeiten $t < 0,5t_a$ gilt nach [11, S.72, Gl. (3.17)]

$$j_{\text{diff}} = j_0 \sqrt{\frac{\pi}{16} \frac{t_a}{t}}. \quad (3.2)$$

Da in der beschriebenen Situation in ein unendlich großes Vakuum ausgegast wird, geht der Teilchenstrom für $t \rightarrow \infty$ gegen Null. Für die Polyamidschläuche in dieser Situation gilt dies aufgrund der Permeation und eventuell anderer Effekte nicht: es kommt stetig Wasser von außen nach. Der Teilchenstrom konvergiert also gegen eine Konstante. Folglich werden Funktionen an die Daten in Abb. 3.1 angepasst, welche an Gleichungen (3.1) und (3.2) angelehnt sind:

$$f_1(t) = \frac{a}{\sqrt{\frac{\pi}{16}b}} \exp\left(-\frac{t}{b}\right) + c \quad (3.3)$$

$$f_2(t) = a\sqrt{\frac{1}{t}} + d \quad (3.4)$$

Die Anpassungsparameter sind dabei mit den Buchstaben a bis d benannt. Die Zusammenhänge dieser Parameter mit den Größen aus Gleichungen (3.1) und (3.2) sind dabei:

$$a \hat{=} j_0 \sqrt{\frac{\pi}{16} t_a}$$

$$b \hat{=} t_a$$

$$c \hat{=} \text{Permeationseintrag und Reste von anderen Feuchteinträgen}$$

$$d \hat{=} \text{Feuchteintrag von Oberflächen und anderen Feuchteinträgen}$$

Der Übergang von der einen in die andere Funktion wird dabei nicht nach den beschriebenen Übergangszeiten gewählt, sondern so, dass die Anpassung die Messdaten gut beschreibt. Dies dient ebenfalls zur Kompensation anderer Feuchteinträge in den Messpunkten.

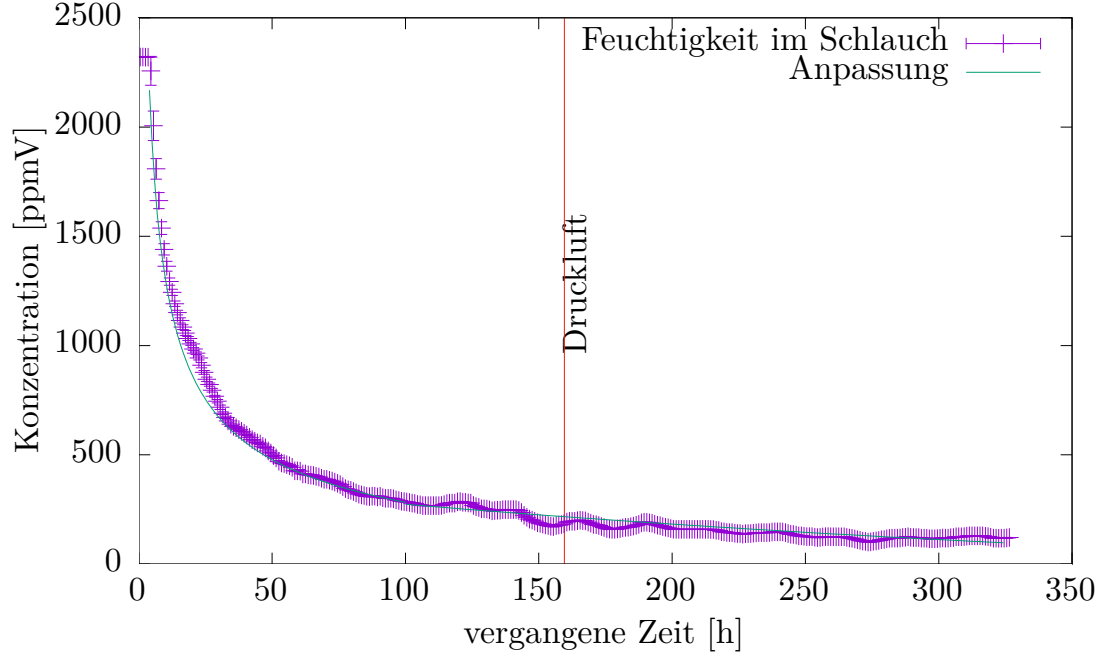


Abbildung 3.3: Die Feuchtekonzentrationswerte mit einer Anpassung nach Gleichungen (3.3) und (3.4) sind hier dargestellt. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

Wie aus Abb. 3.3 hervorgeht, eignen sich Gleichungen (3.3) und (3.4) gut, um die Entwicklung der Feuchte zu beschreiben. Die Anpassungsparameter ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} a &= 4715,05 \pm 57,96 \\ b &= 404,055 \pm 7,835 \\ c &= -139,607 \pm 1,146 \\ d &= -188,817 \pm 6,403 \end{aligned}$$

Dabei erfolgt der Übergang von Gleichung (3.2) zu Gleichung (3.1) nach 100 h. Der Übergang erfolgt also nicht nach $0,5b$, wie in der beschriebenen Situation gefordert. Diese Vorgehensweise wird, wie erwähnt, gewählt, um die zunächst notwendige Trocknung der Oberflächen mit einzubeziehen.

Die bestimmten Gleichgewichtskonzentrationen c und d liegen im negativen Bereich und sind daher physikalisch nicht sinnvoll. Auch dies ist auf die Unterschiede zwischen den Situationen zurückzuführen. Da es kein reiner Ausgasungsprozess ist, sondern auch andere Prozesse einspielen, die mutmaßlich schneller konvergieren.

Insgesamt ist die Anpassung trotzdem gut zu nennen. Zwar liegt die angepasste Kurve meist außerhalb der Unsicherheitsintervalle der Messpunkte, jedoch ist dies auf besagte Flussschwankungen zurückzuführen.

Trotz dieser Abweichungen kann man folgern, dass Ausgasen zumindest einen Bestandteil der Gesamtfeuchte ausmacht. Zudem spricht die gute Beschreibung durch *eine* Anpassung für die Unabhängigkeit der inneren von der äußeren Feuchte.

Referenzmessung bei einer Umgebungsfeuchte von unter 10 %

Um eine Abhängigkeit von der umgebenden Feuchte für Polyamid-Schläuche genauer zu erproben, wird eine Messung mit dem selben Schlauch bei von Anfang an mit Druckluft gespülter Haube wiederholt. Somit kann eine etwaige Änderung des Feuchtigkeitsverlaufs in den ersten Stunden starker Konzentrationsänderungen gemessen werden. Besagtes Schlauchstück aus Abschnitt 3.1.1 wird für etwa eine Woche bei normaler Raumluft zur Wiederherstellung des Ausgangszustands gelagert.

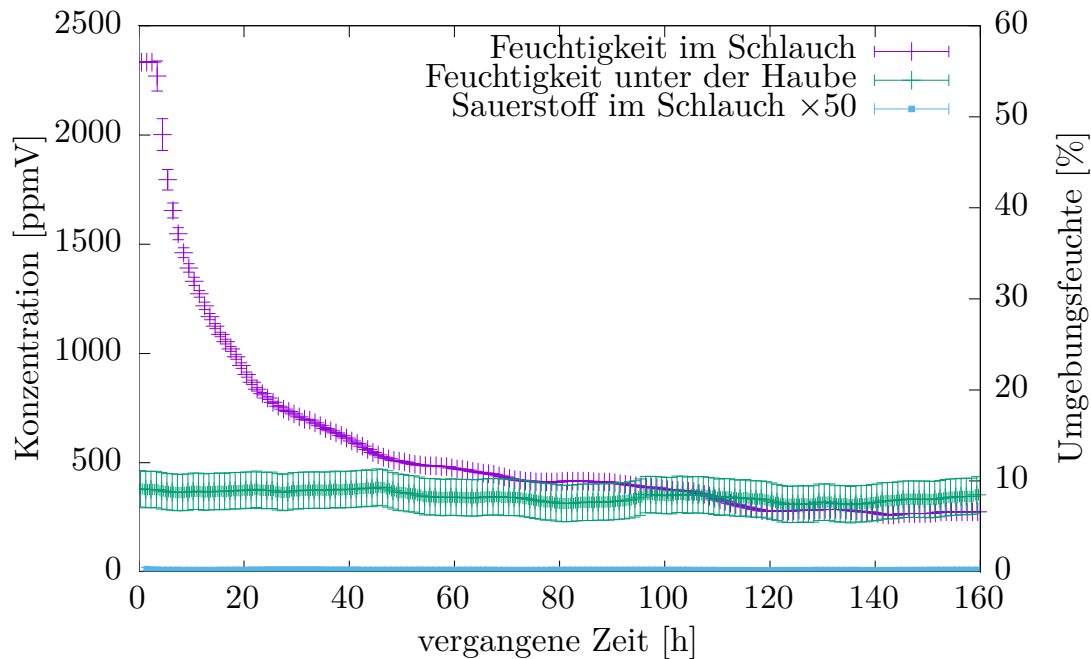


Abbildung 3.4: Aufgetragen ist die Konzentration von Sauerstoff und Wasser im Gassystem über die vergangene Zeit. Ebenfalls dargestellt ist die Feuchtigkeit in der umgebenden Haubenatmosphäre. Es wird über jede Stunde gemittelt.

Wie in Abb. 3.4 zu erkennen, ist der Verlauf der Wasser- und Sauerstoffkonzentration sehr ähnlich zu dem unter normaler Raumluft in Abb. 3.1. Auch gelingt es mit Hilfe der Druckluft die Luftfeuchtigkeit unter der Haube näherungsweise konstant zu halten. Ein direkter Vergleich beider Messungen erfolgt im nächsten Unterkapitel.

Abhängigkeit des Feuchteintrags von Umgebungsfeuchte

Fügt man beide Messreihen aus Abschnitt 3.1.1 und Abschnitt 3.1.1 in einen Graphen ein, kann ein Vergleich der beiden Verläufe vorgenommen werden.

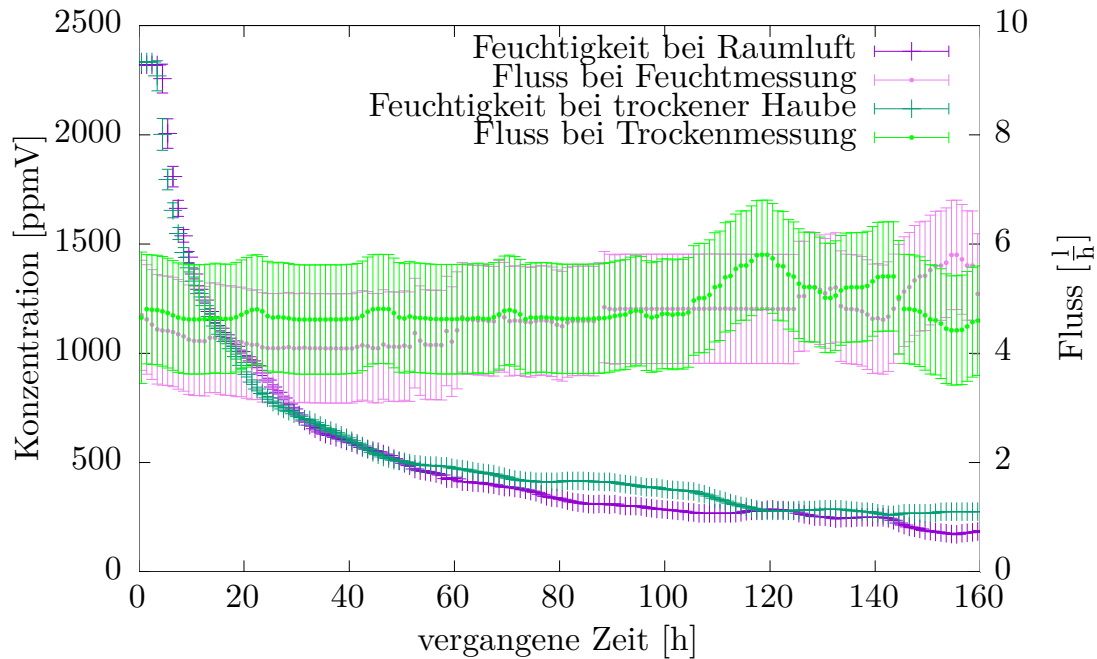


Abbildung 3.5: Dargestellt sind die beiden Verläufe der Feuchtekonzentration im Gas-system bei normaler Raumluft und trockener Druckluft. Zudem sind die Flüsse im Verlauf beider Messungen eingezeichnet. Die Werte sind über jeweils 1 h gemittelt.

Aus Abb. 3.5 geht hervor, dass der Verlauf der Feuchtekonzentration im Schlauch sich zwischen trockener und feuchter Luft kaum unterscheidet. Die wenigen Abweichungen sind durch die erkennbaren Flussschwankungen zu erklären. Dabei hat ein höherer Fluss geringere Feuchtigkeitskonzentrationen zur Folge. Eine andere Abhängigkeit ist weniger naheliegend, da die Flussschwankungen gut zum Verlauf der Kurven passen. Zwar sind die Flussschwankungen ihrerseits auf Temperatur- und Druckschwankungen zurückzuführen, jedoch ist die relative Änderung des Flusses bedeutend größer als die relativen Änderungen der Temperatur und des Drucks.

Insgesamt kann also gefolgert werden, dass die Feuchtigkeit im Schlauch für kurze Zeiträume unabhängig von der umgebenden Feuchte ist. Dominant für die Feuchtekonzentration ist der Gasfluss im Schlauch. Diese starke Abhängigkeit ist physikalisch vollkommen plausibel, da ein größerer Fluss bei ungefähr konstanter Rate ein größeres Volumen darstellt, in dem sich die Feuchte verteilt. Die „Verdünnung“ des Gases durch Erhöhung des Flusses kostet ein wenig Zeit, sodass keine instantane Proportionalität zum Fluss zu erwarten ist.

3.1.2 Feuchteentwicklung in einem Kammer-Gassystem

Um die Feuchtigkeit, die durch das Schlauchsystem zur Kammer in das Gassystem gelangt, einzuschätzen, wird das System, was später die Kammer versorgt, zunächst ohne Kammer untersucht. Der verwendete Gasfluss liegt bei ca. $3 \frac{1}{h}$. Das Gassystem entspricht dem in Abb. 2.4 gezeigten.

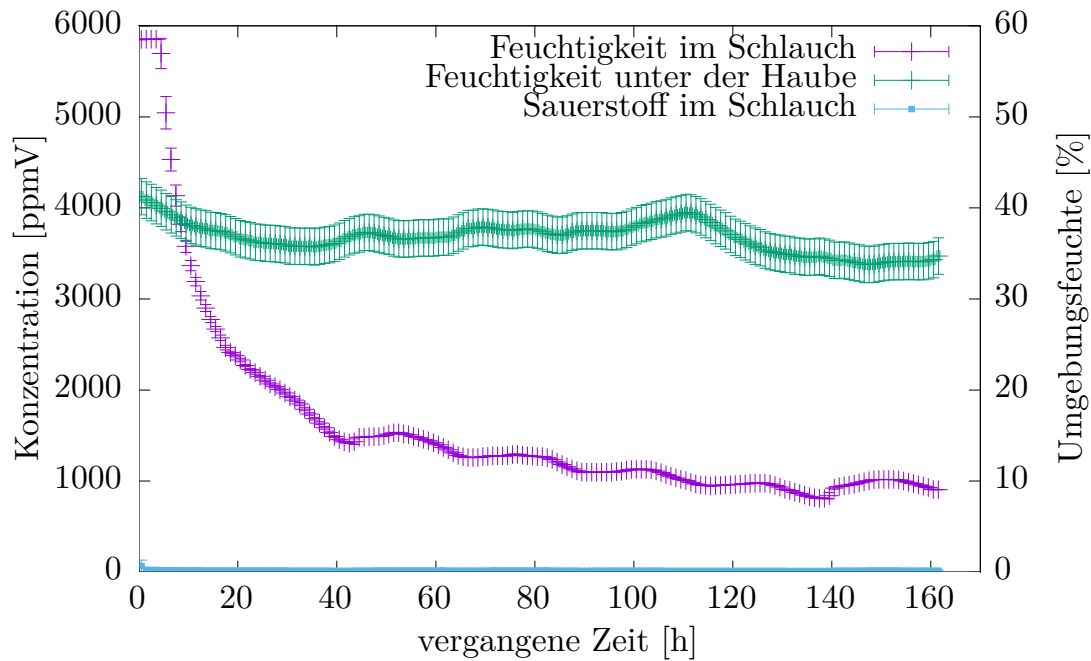


Abbildung 3.6: Zu sehen ist die Entwicklung der Wasser- und Sauerstoffkonzentration über die Zeit. Auch die Umgebungsfeuchte ist eingezeichnet. Auch für diesen Plot wird über jeweils eine Stunde gemittelt.

Der Verlauf in Abb. 3.6 entspricht den zuvor beobachteten Verläufen. Da das Schlauchsystem zur Versorgung der Kammer erheblich länger ist als das zuvor untersuchte 1 m lange Schlauchstück, sind die Feuchteschwankungen im Tagesverlauf stärker ausgeprägt. Am Ende dieser Messung liegt die Feuchte im Gassystem bei knapp 1000 ppmV. Es ist nicht davon auszugehen, dass dies schon die vollständige Gleichgewichtskonzentration ist. Vielmehr ist zu vermuten, dass wie in Abb. 3.1 ein langsamer Abfall der Feuchte folgt.

Unmittelbar nach den Untersuchungen an der Kammer wird erneut die Feuchte im Gassystem gemessen. Für die Auswertung wird dabei davon ausgegangen, dass der Schlauch über die Dauer der Kammermessung gleichmäßig ausgast.

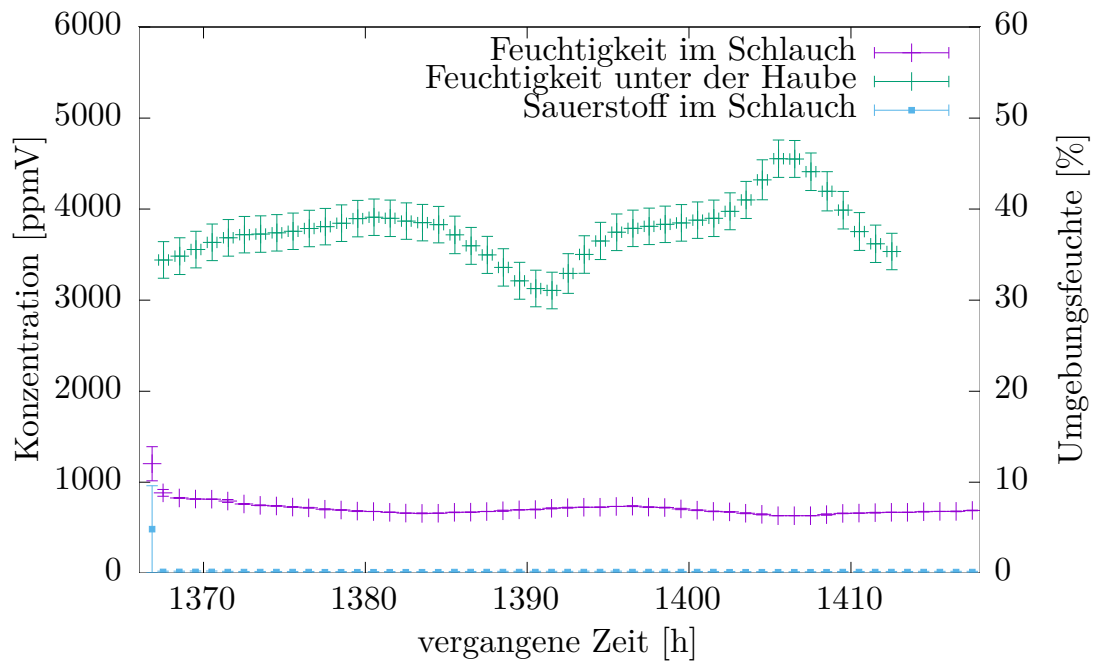


Abbildung 3.7: Zu sehen ist die zeitliche Feuchte- und Sauerstoff-Entwicklung im Kammer-Gassystem nach dem Abschluss der Kammeruntersuchung. Ein-gezeichnet ist auch die umgebende Feuchte. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

Wie in Abb. 3.7 zu erkennen, hat sich die Feuchte im Laufe der Kammeruntersuchungen nur noch wenig verändert. Zu Beginn dieser erneuten Messung sind höhere Feuchte- und Sauerstoffkonzentrationen zu beobachten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Gas-system zum Ausbau der Kammer geöffnet werden muss. Nach dem „Ausspülen“ dieser (mutmaßlich) gasförmigen Verunreinigungen liegt die Feuchte-Konzentration zwischen ca. 740 ppmV und 690 ppmV. Die Schwankungen sind dabei wahrscheinlich flussbedingt. An den Gesamtverlauf beider Messungen kann das schon in Abschnitt 3.1.1 angewandte Modell für den Feuchtekonzentrationsverlauf eines ausgasenden Festkörpers angepasst werden.

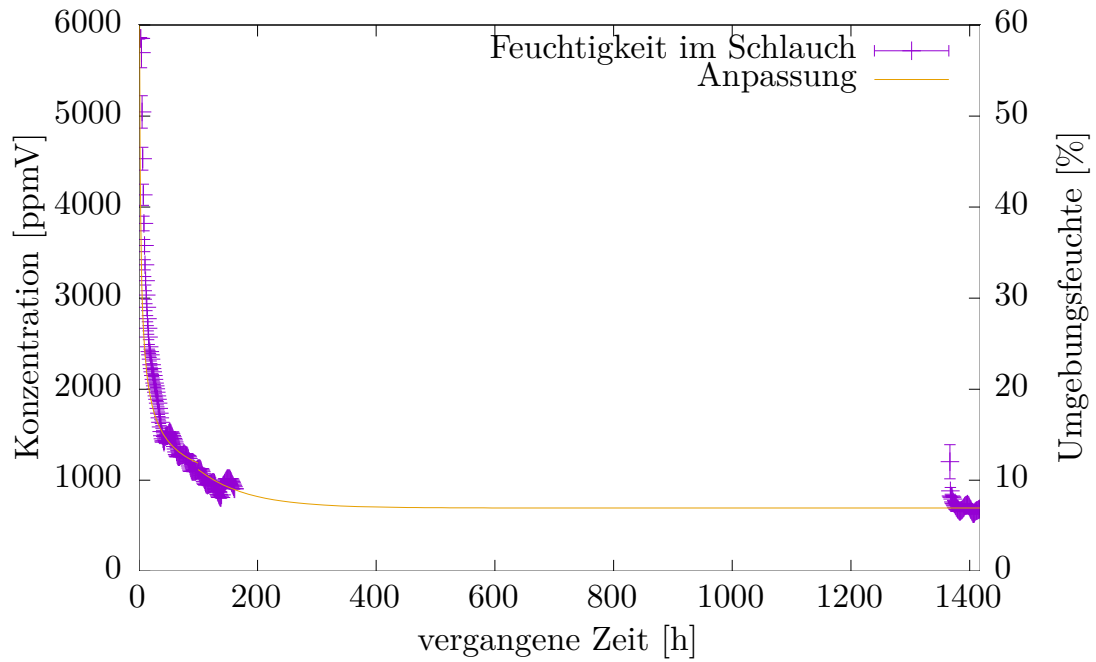


Abbildung 3.8: Dargestellt ist die Entwicklung der Feuchtekonzentration mit angepassten Graphen nach Gleichungen (3.1) und (3.2). Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

Wie in Abb. 3.8 zu erkennen, beschreibt das angepasste Modell die Feuchte-Konzentration. Die Anpassungsparameter ergeben sich dabei zu

$$\begin{aligned} a &= 5710,58 \pm 180,10 \\ b &= 82,70 \pm 3,58 \\ c &= 694,946 \pm 10,340 \\ d &= 617,384 \pm 21,260. \end{aligned}$$

Dabei wird, wie zuvor, bei etwa 100 h der Wechsel von Gleichung (3.2) zu Gleichung (3.1) vollzogen. Die Zuverlässigkeit dieser Anpassung ist aufgrund der relativ geringen Anzahl von Messpunkten schwer zu bewerten.

Um auch bei Flussänderungen eine Einschätzung der Feuchtekonzentration zu gewinnen, wird der mittlere Fluss während der Untersuchung des Kammergassystems bestimmt. Auf dieser Basis wird die Feuchtekonzentration mit dem Verhältnis von dem in der TRD-Kammermessung auftretendem Fluss und jenem Mittelwert multipliziert. Bei dieser Vorgehensweise handelt es sich um eine Abschätzung, die aufgrund der nicht-porösen Struktur des Polyamidschlauches angenommen wird. Durch die Mittelung des Flusses werden auch Tag-Nacht-Schwankungen ausgemittelt, welche bei der Anpassung für Abweichung sorgen. Insbesondere können

Der mittlere Fluss liegt während der Messungen bei ca. $(3,1 \pm 0,3) \frac{1}{h}$.

3.1.3 Beobachtete Zusammenhänge und Tendenzen

Aus den zuvor diskutierten Messungen können einige grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden.

Zusammenhang: Fluss und Temperatur

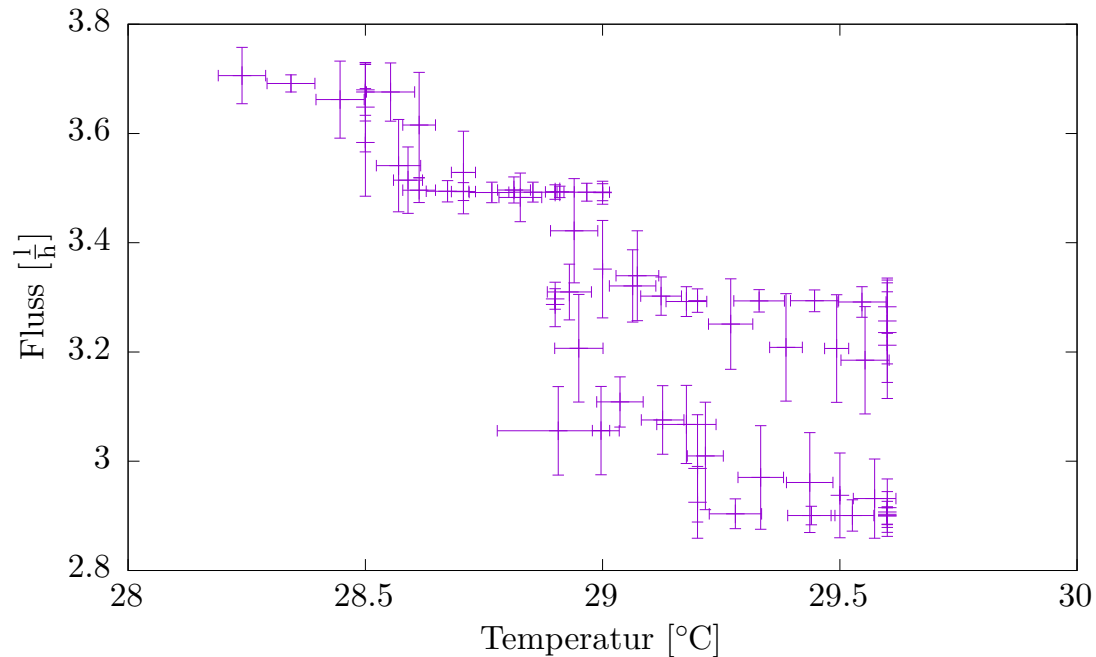


Abbildung 3.9: Dargestellt ist der Fluss in Abhängigkeit der Temperatur aus Abschnitt 3.1.2. Für diese Grafik werden lediglich die Messpunkte in der Messzeit zwischen 65 h und 130 h miteinbezogen. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

Wie in Abb. 3.9 zu sehen, besteht ein starker Zusammenhang zwischen Temperatur und Fluss. Mit steigender Temperatur sinkt der Fluss (wenn nicht nachgeregelt wird).

Auch in späteren Messungen kann dieser Zusammenhang beobachtet werden. Dieser erschwert die Deutung der Ergebnisse, da der Einfluss von Fluss- und Temperaturschwankung nur schlecht auseinandergehalten werden kann.

Ein Erklärungsansatz für diese starke Abhängigkeit liegt im verwendeten Flussregler aus Plexiglas. Dieses dehnt sich bei steigender Temperatur aus. Da es sich um einen dickwandigen Block handelt, ist vorstellbar, dass die Durchlassweite sinkt, da sich die Wände in den Fluss dehnen. Umgekehrt verhält es sich bei Abnahme der Temperatur.

Zusammenhang: Druckdifferenz und Fluss

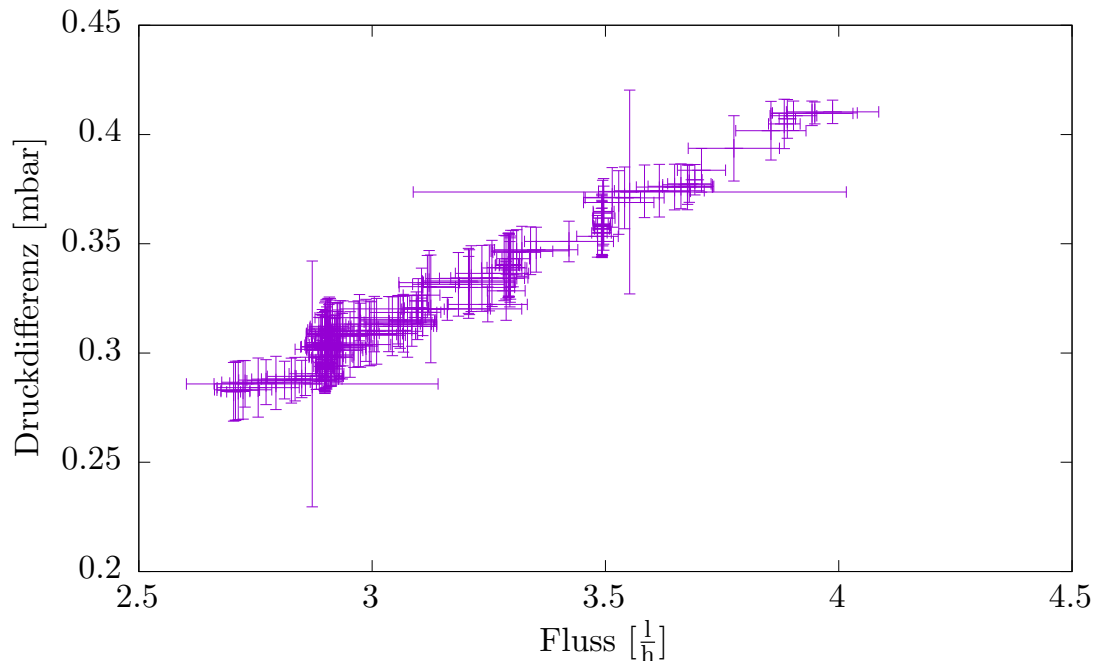


Abbildung 3.10: Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen Fluss und Druckdifferenz zwischen Innerem des Kammergassystems (Abschnitt 3.1.2) und der Umgebungsatmosphäre. Die Werte sind jeweils über eine Stunde gemittelt.

Wie klar aus Abb. 3.10 hervorgeht, ist der Zusammenhang zwischen Fluss im Gassystem und Druckdifferenz zur umgebenden Atmosphäre für das Gassystem aus Abschnitt 3.1.2 linear. Diese Art des Zusammenhangs ist auch für den Schlauch aus Abschnitt 3.1.1 zu beobachten, jedoch ist die dort gefundene Gerade nicht mit der aus Abb. 3.10 identisch. Der quantitative Zusammenhang hängt also maßgeblich von der Gassystemgeometrie ab.

In Abb. 3.10 weisen zwei Punkte eine besonders große Unsicherheit auf. Diese ist auf eine große Umstellung des Flusses innerhalb der den Punkt bestimmenden Stunde zurückzuführen.

Der Zusammenhang zwischen Fluss und Differenzialdruck entspricht völlig den Erwartungen. Mit zunehmendem Fluss in das Gassystem verlässt auch mehr Gas das System. Dieser Ausfluss-Zuwachs wird durch Erhöhung des Differenzialdrucks angestoßen.

Zusammenhang: Feuchte und Fluss

Wie schon erwähnt, kann ein starker Zusammenhang zwischen Feuchte und Fluss beobachtet werden.

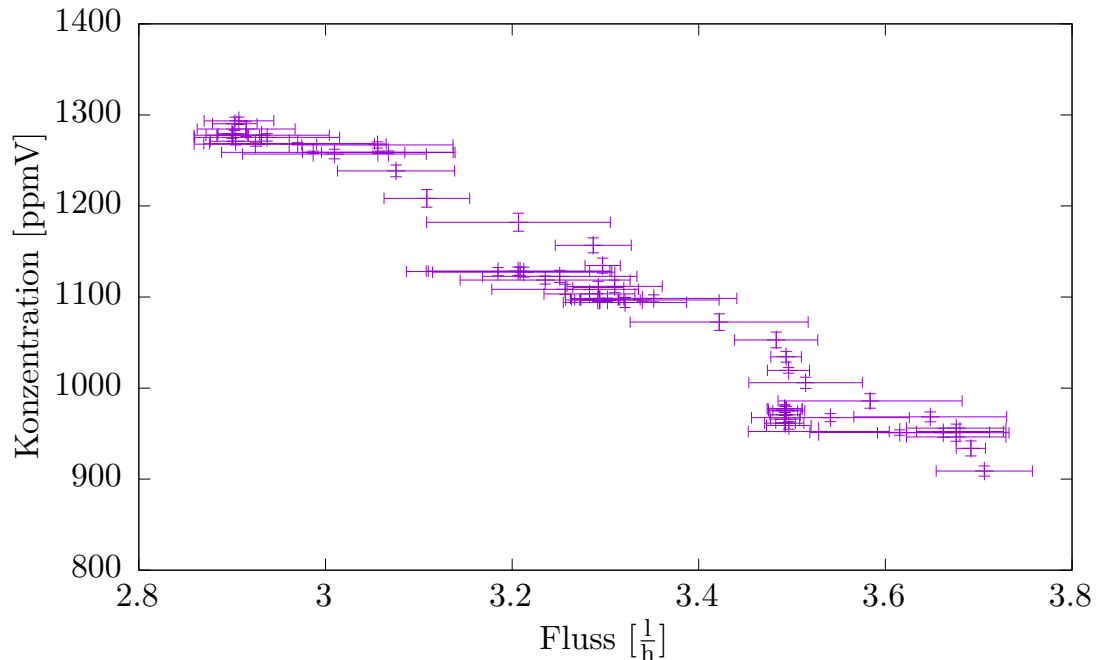


Abbildung 3.11: Zu sehen ist die Feuchtekonzentration aufgetragen auf den Fluss. Die Werte stammen aus der Messung in Abschnitt 3.1.2, wobei nur das Zeitintervall zwischen 65 h und 130 h berücksichtigt wird. Die Werte sind stundenweise gemittelt.

Aus Abb. 3.11 geht hervor, dass der Zusammenhang zwischen Feuchte und Fluss auf dem betrachteten Intervall linear ist. Im Zeitbereich zwischen 65 h und 130 h von Abschnitt 3.1.2 sinkt die Feuchte aufgrund der fortschreitenden Trocknung mit der Zeit. Gleichzeitig steigt der Fluss. Folglich könnte der in Abb. 3.11 deutlich erkennbare Zusammenhang auch unkorreliert sein. Dagegen spricht jedoch der sehr klare Zusammenhang, der in Abb. 3.11 beobachtet werden kann. Die Flussschwankungen, die die Feuchteschwankungen bedingen, würden, wären die Werte nicht korreliert, zu einer breiteren Verteilung der Messpunkte führen.

Eine Überprüfung des Zusammenhangs kann über die Betrachtung der Rate, also dem Produkt aus Feuchtekonzentration und Fluss, erfolgen. Ist der Zusammenhang zwischen Fluss und Feuchte linear, wie in Abb. 3.11 zu erkennen, so weist die Rate keine, beziehungsweise wenige Tag-Nacht-Schwankungen auf.

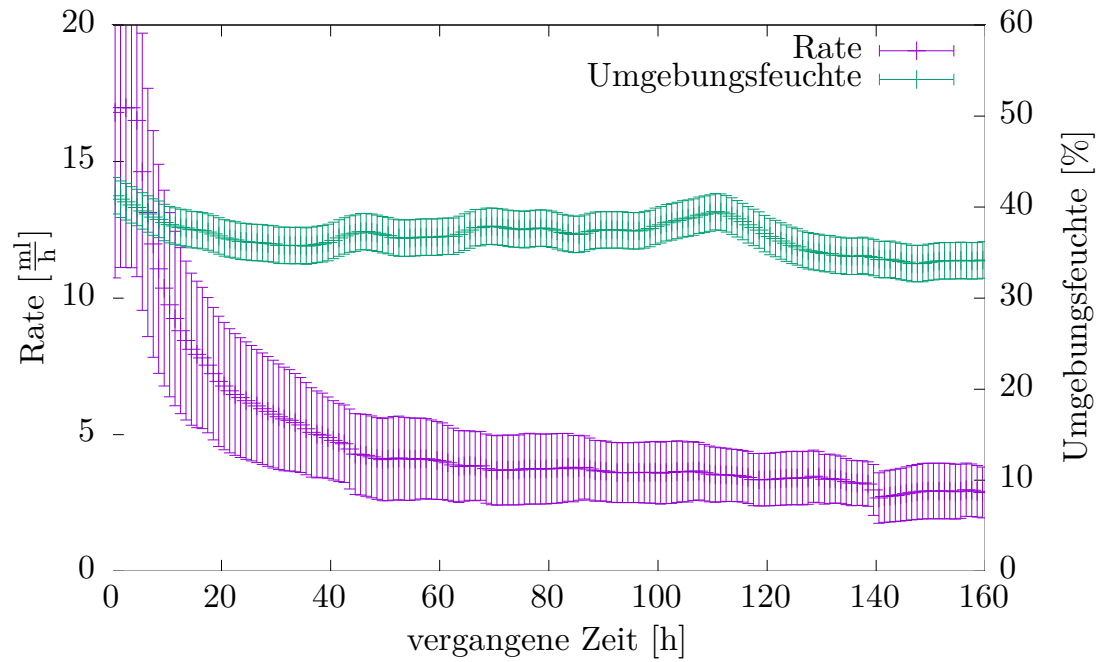


Abbildung 3.12: Dargestellt ist die Rate, mit der Feuchtigkeit in das Gassystem eindringt. Die Rate wird dabei als Produkt der über eine Stunde gemittelten Werte von Feuchte und Fluss berechnet. Zudem ist die stundenweise gemittelte Umgebungsfeuchte dargestellt.

Wie in Abb. 3.12 zu erkennen, ist der Verlauf glatt. Es sind kaum Tag-Nacht-Schwankungen zu erkennen. Im Vergleich mit Abb. 3.6 ist die starke Flussabhängigkeit der Feuchte sichtbar und bestätigt den zuvor vermuteten Zusammenhang in Abb. 3.11.

Dass keine komplette Glättung der Kurve erfolgt, ist auf eine leichte Zeitverzögerung zwischen Änderung des Flusses und Änderung der Feuchte zurückzuführen. Bei extrem großen Flussänderungen weicht die Rate von der Konstanz ab. Dies ist in Abb. 3.12 bei ca. 140 h zu beobachten.

In den folgenden Messungen wird die Rate als maßgebliche Größe betrachtet, da sie aufgrund ihrer mutmaßlichen Flussunabhängigkeit besser auszuwerten ist. Zudem ist sie diejenige Größe, welche relevant für das Detektorgassystem ist.

3.2 Untersuchung einer TRD-Kammer

Die relevanteste Untersuchung dieser Arbeit ist die Untersuchung des Feuchteintrags in eine TRD-Kammer. Dazu wird das in Abschnitt 3.1.2 schon untersuchte Gassystem an eine Kammer angeschlossen, die schon in Abschnitt 1.3 beschrieben ist. Das Gassystem aus Abschnitt 3.1.2 wird dabei nur für wenige Stunden belüftet, sodass kurz nach Beginn dieser Messung der aus Abschnitt 3.1.2 bekannte letzte Wert für die Feuchte im Gas als Feuchtebeitrag aus den Schläuchen angenommen werden kann.

Im Zuge der Messung wird die Umgebungsfeuchte verändert. Auch wird, um die Konstanz der Rate zu überprüfen, der Fluss bei eingestelltem Gleichgewicht verdoppelt. Beide Veränderungen werden in späteren Versuchsteilen wieder rückgängig gemacht, um einen Vergleich ziehen zu können.

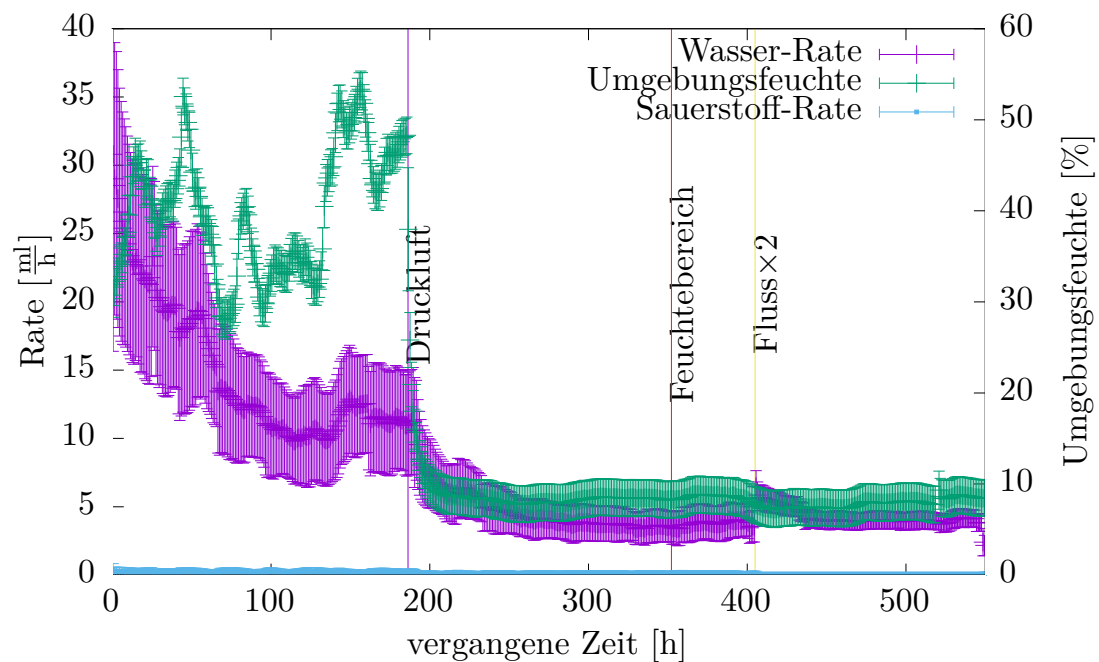


Abbildung 3.13: Zu sehen ist der zeitliche Ratenverlauf in dem Gassystem. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt. Bei „Druckluft“ wird mit der Spülung der Haube begonnen, bei „Feuchtebereich“ der Feuchtebereich verkleinert und bei „Fluss $\times$ 2“ der Fluss verdoppelt.

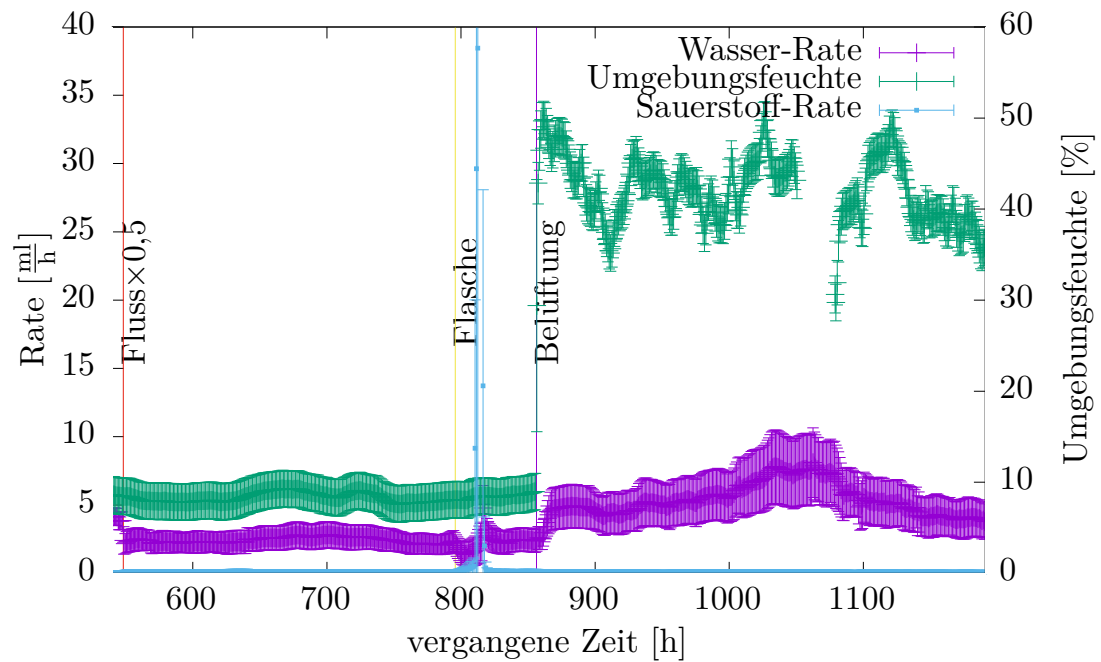


Abbildung 3.14: Dargestellt ist der zweite Teil der Kammermessung. Aufgetragen ist der Ratenverlauf auf die Zeit. Ebenfalls eingezeichnet ist der Verlauf der umgebenden Feuchte. Bei „Fluss $\times$ 0,5“ wird der Fluss auf das Anfangsmaß reduziert. Bei „Flasche“ wird die Gasflasche ausgetauscht und bei „Belüftung“ wird die Haube angehoben. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

Der Verlauf in Abb. 3.13 und 3.14 zeigt eine starke Abhängigkeit der Wasser-Rate von der umgebenden Luftfeuchtigkeit. Durch das Weglassen der Haube im Versuch bis zum Einschalten der Druckluft ist die Umgebungsfeuchte im ersten Versuchsteil sehr wechselhaft. Um die Verläufe genauer zu analysieren, wird der Verlauf in Abb. 3.13 und 3.14 in die einzelnen Versuchsabschnitte unterteilt.

3.2.1 Zeitliche Entwicklung des Feuchteintrags

Die ersten 186 h der Messung erfolgen, wie erwähnt, ohne die Abtrennung des Messvolumens durch die Haube. Der Fluss beläuft sich auf etwa $3 \frac{1}{h}$.

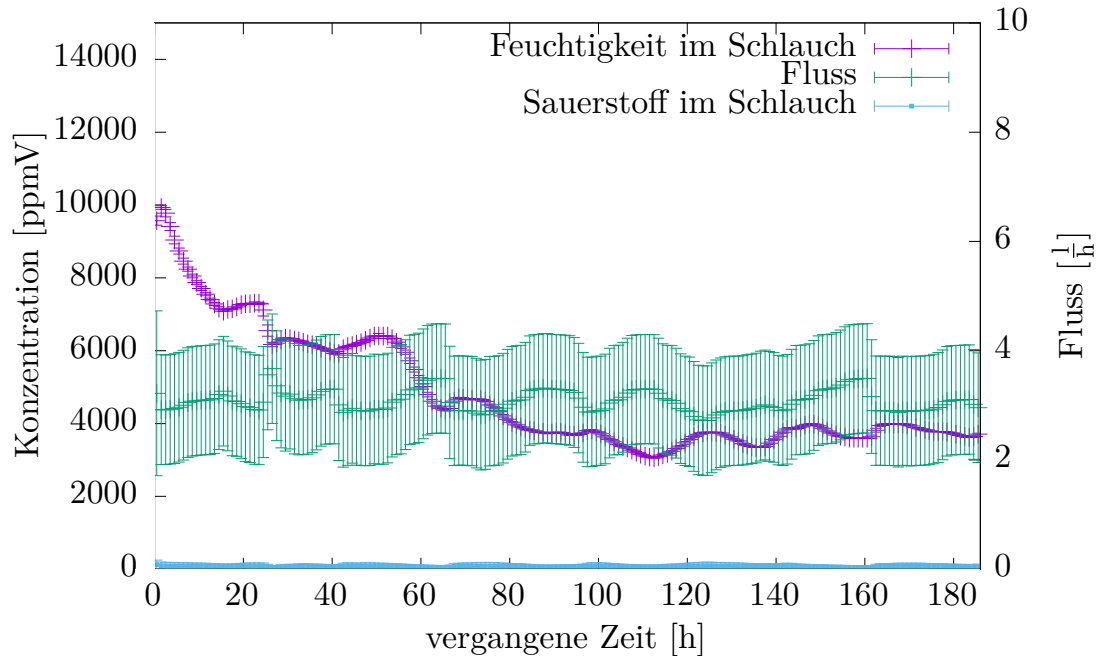


Abbildung 3.15: Zu sehen ist der zeitliche Konzentrationsverlauf von Wasser und Sauerstoff, sowie der Fluss zur jeweiligen Zeit. Gemittelt wird über jeweils eine Stunde.

Wie aus Abb. 3.15 hervorgeht, ist die Abhängigkeit vom Fluss auch in dieser Messung dominant. Die meisten signifikanten Stellen im Plot lassen sich mit Flussänderungen erklären. Etwaige Abweichungen vom direkten Zusammenhang sind durch die Mittelung und den leichten Zeitversatz, mit dem die Konzentrationsänderung erfolgt, zu erklären. Die einzige Entwicklung, die der Fluss nicht erklärt, ist die Tendenz zu zunehmender Wasserkonzentration im Gas in den letzten 66 h des in Abb. 3.15 dargestellten Messabschnitts.

Auch bei der Sauerstoffkonzentration ist ein vergleichbarer Zusammenhang mit dem Fluss zu vermuten, jedoch sind die Sauerstoffkonzentrationen hier so klein, dass aufgrund der hohen Unsicherheiten in niedrigen Bereichen keine zuverlässige Aussage getroffen werden kann.

Die Feuchtekonzentration beläuft sich nach diesen ersten 186 h auf etwa 3750 ppmV. Dieser Wert liegt in der erwarteten Größenordnung. Dabei sind einige hundert ppmV der Beitrag aus dem Schlauchsystem. Da die Kammer allerdings, wie in Abschnitt 1.3 diskutiert, eine große innere Oberfläche und viele ausgasende Bestandteile aufweist, ist nicht davon auszugehen, dass dies schon der Gleichgewichtswert ist.

Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte

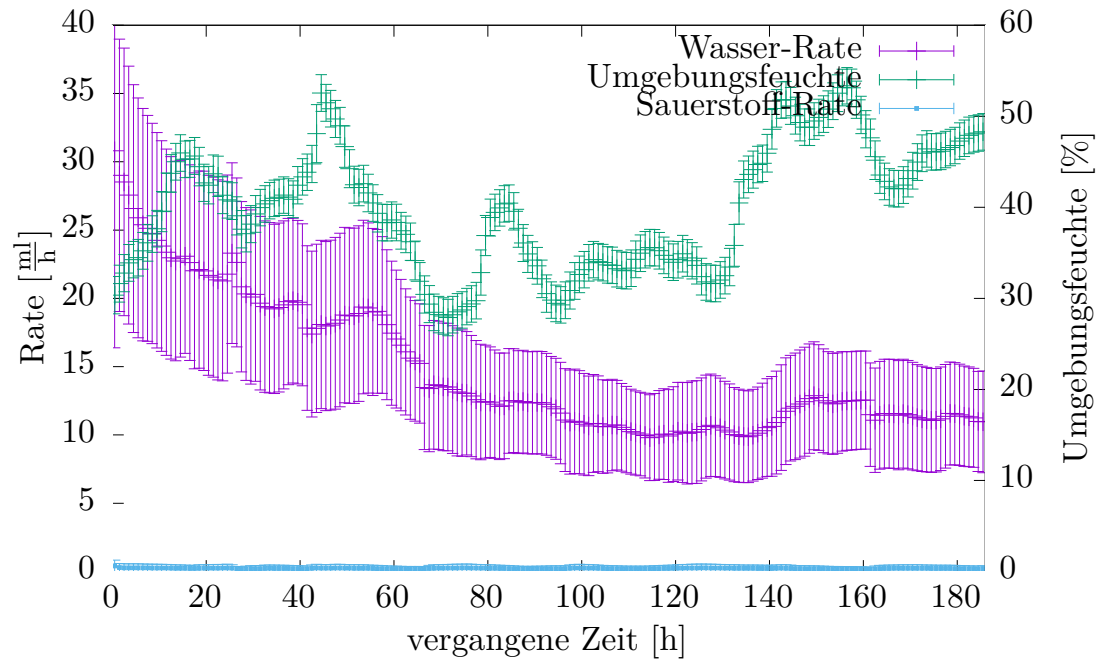


Abbildung 3.16: Die ersten 186 h der Messung sind hier dargestellt. Aufgetragen ist die Feuchte- und Sauerstoff-Rate, sowie die Raum-Luftfeuchtigkeit auf die Zeit. Weiterhin wird über jeweils eine Stunde gemittelt.

Vergleicht man die Verläufe von umgebender Feuchte und Feuchtigkeit im Gassystem in Abb. 3.16, so lässt sich eine Abhängigkeit der Gassystemfeuchte von der umgebenden Feuchte erahnen.

Dieser Zusammenhang lässt sich insbesondere an den Zeiten großer Änderung in der Raumfeuchte erkennen: Auf ein Maximum der umgebenden Feuchte bei ca. 50 h folgt ein leichter Anstieg der Wasser-Rate im Gassystem. Noch besser erkenntlich ist diese Abhängigkeit zwischen 130 h und 170 h. Dort erreicht die Umgebungsfeuchte ein Maximum, welches für ca. 30 h bestehen bleibt. Die Feuchte-Rate im Gassystem lässt wenig später einen ähnlichen Verlauf erkennen.

Insgesamt ergibt sich nach 186 h eine Rate von $(11,08 \pm 0,33) \frac{\text{ml}}{\text{h}}$. Abzuziehen ist noch die Rate, welche aus den Polyamidschläuchen herrührt. Diese beläuft sich maximal auf $(2,83 \pm 0,05) \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ (letzter bekannter Wert für die Feuchtigkeitsrate in das System aus Abschnitt 3.1.2). Insgesamt ist die durch die Kammer entstehende Wasser-Eintrags-Rate nach 186 h also größer als $(8,25 \pm 0,33) \frac{\text{ml}}{\text{h}}$.

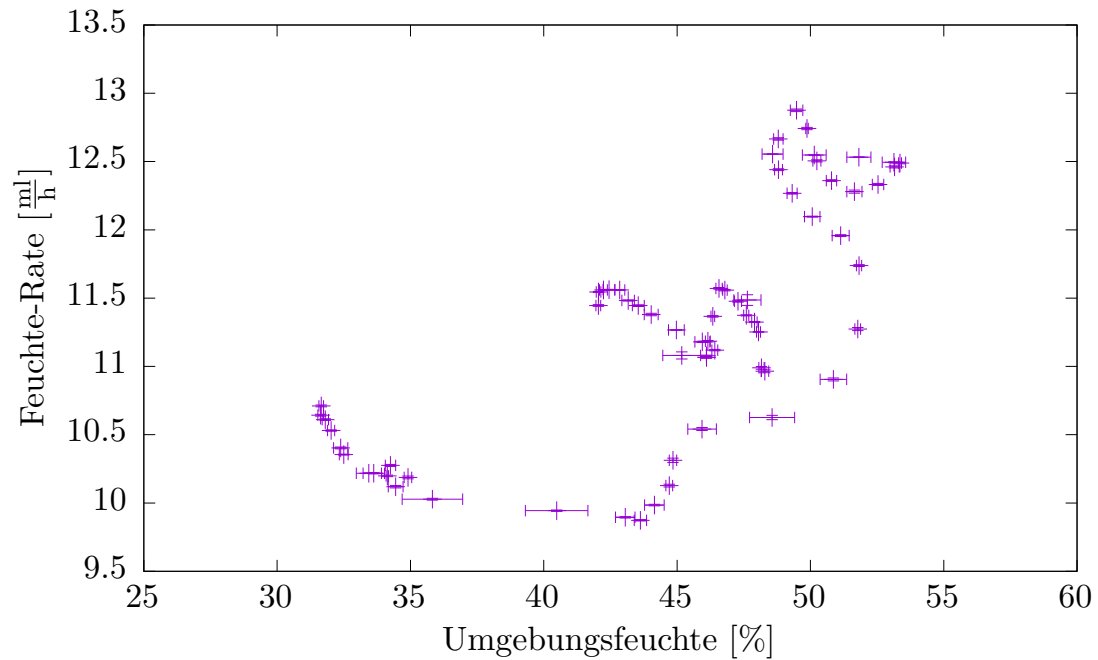


Abbildung 3.17: Aufgetragen ist die Feuchte-Rate auf die Umgebungsfeuchte. Dabei ist nur das Zeitintervall von 120 h bis 185 h berücksichtigt, da in diesem Zeitraum näherungsweise ein Gleichgewicht eingetreten ist. Die Werte sind jeweils über eine Stunde gemittelt.

Der in Abb. 3.16 schon sichtbare Zusammenhang zwischen Umgebungsfeuchte und Rate ist auch in Abb. 3.17 zu erkennen. Mit steigender Umgebungsfeuchte geht ein Anstieg der Rate einher. Aufgrund der vielen eingehenden Variablen und Zeitverzögerungen ist die Tendenz in Abb. 3.17 recht unscharf und es kann kein quantitativer Zusammenhang gefolgert werden. Jedoch ist das qualitative Ergebnis einer umgebungsfeuchteabhängigen Rate wichtig.

Eine Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte ist am ehesten durch das dünne Eintrittsfenster aus Kapton zu erwarten. Diese Vermutung wird im folgenden noch genauer diskutiert.

Abhängigkeit von der Temperatur

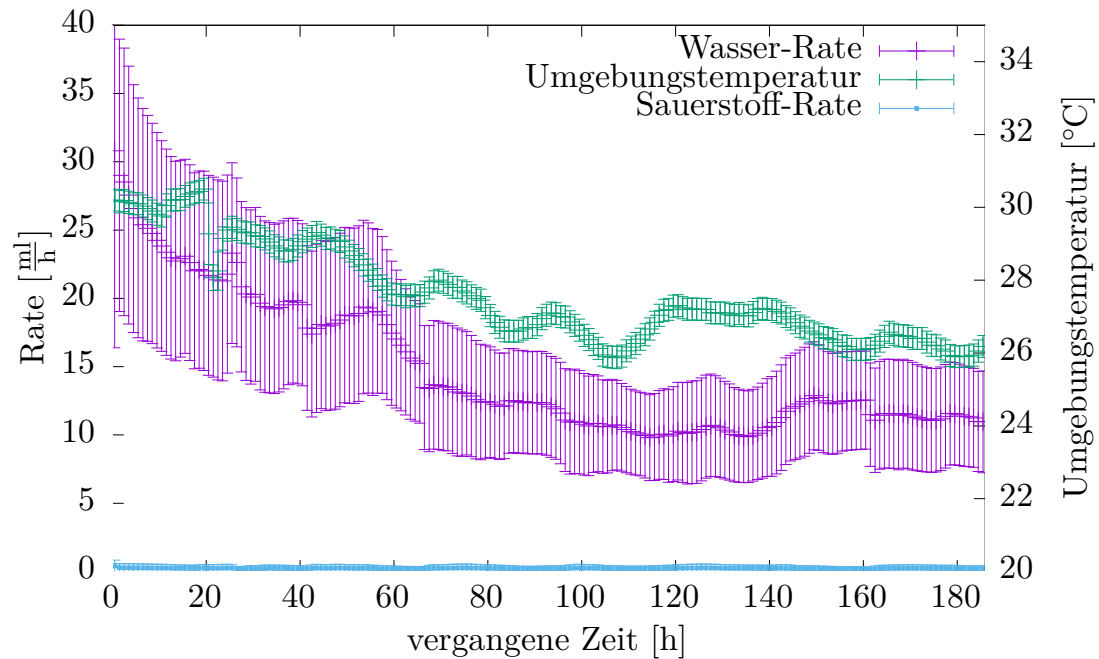


Abbildung 3.18: Aufgetragen ist die Rate von Feuchte und Sauerstoff im Gassystem sowie die Temperatur auf die Zeit. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

Wie in Abb. 3.18 zu erkennen ist, weisen die Verläufe von Temperatur und Rate nur eine sehr leichte Ähnlichkeit auf. Beide Verläufe sind im Messverlauf fallend. Insbesondere sind einige Charakteristika in beiden Messungen zu finden: Auf einen starken Temperaturabfall bei ca. 20 h folgt wenige Stunden später ein starker Anstieg der Rate. Zwischen 120 h und 140 h steigt die Temperatur auf einen Wert, der für einige Stunden bestehen bleibt. Ein ähnlicher Verlauf zeigt sich ab ca. 140 h bei der Rate.

Aufgrund des unsteten Zeitversatzes zwischen dem Auftreten der Charakteristika bei der Temperatur und dem Auftreten bei der Rate steht jedoch zu vermuten, dass eine direkte Korrelation der Größen unwahrscheinlich oder nur schwach ist. Da die Temperatur allerdings direkt mit der relativen Feuchte korreliert ist und, wie gezeigt, starken Einfluss auf den in die Rate eingehenden Fluss hat, kann ein indirekter Zusammenhang beobachtet werden.

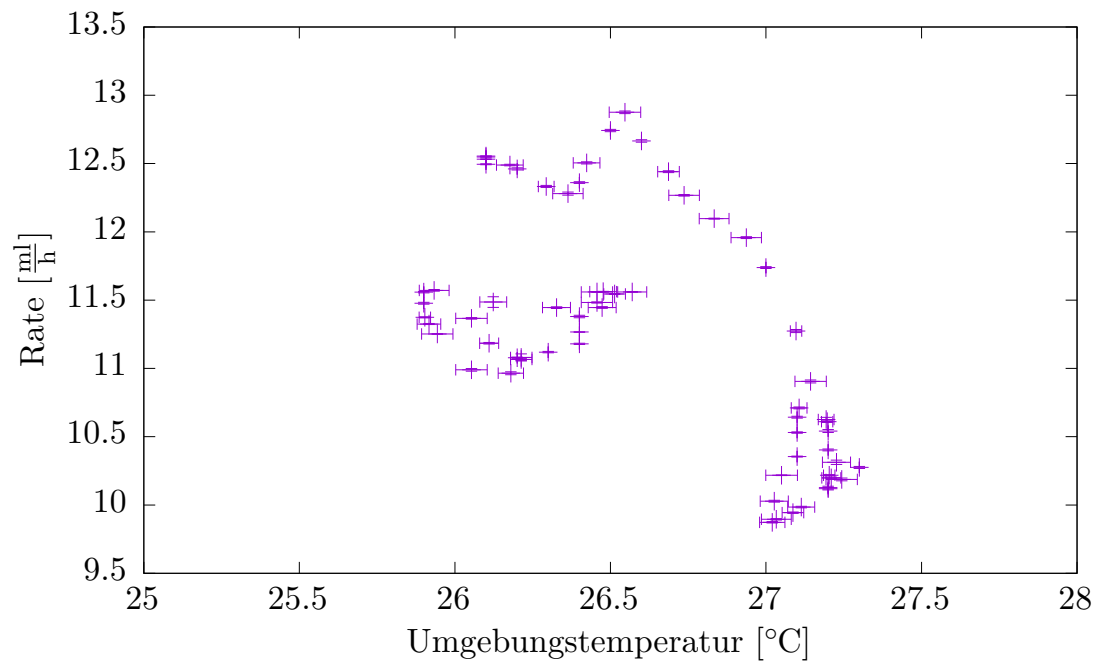


Abbildung 3.19: Dargestellt ist die Wasser-Rate aufgetragen auf die Umgebungstemperatur. Dabei wird nur das Intervall zwischen 120 h und 185 h betrachtet, in dem die Ratenänderung durch weitere Trocknung gering ist. Die Werte sind über jede Stunde gemittelt.

In Abb. 3.19 ist eine Messpunkt-Verteilung zu erkennen, die auf eine abnehmende Rate mit steigender Temperatur hindeutet. Diese Beobachtung widerspricht jedoch der in Abb. 3.18 gemachten Beobachtung. Eine verlässliche Aussage ist bei dem kleinen von den Messpunkten abgedeckten Temperaturintervall kaum möglich.

3.2.2 Senkung der Umgebungsfeuchte

Nach 186,3 h wird, da die Änderung der Konzentration nur noch klein ist, die Haube mit Druckluft gespült. Bis dies wieder der Fall ist, werden die Parameter soweit möglich konstant gehalten. Um eine größere Auflösung zu erreichen, wird nach ca. 352,2 h die Reichweite, die das 4 mA-20 mA-Intervall abdeckt, von 15 000 ppmV auf 2000 ppmV verkleinert.

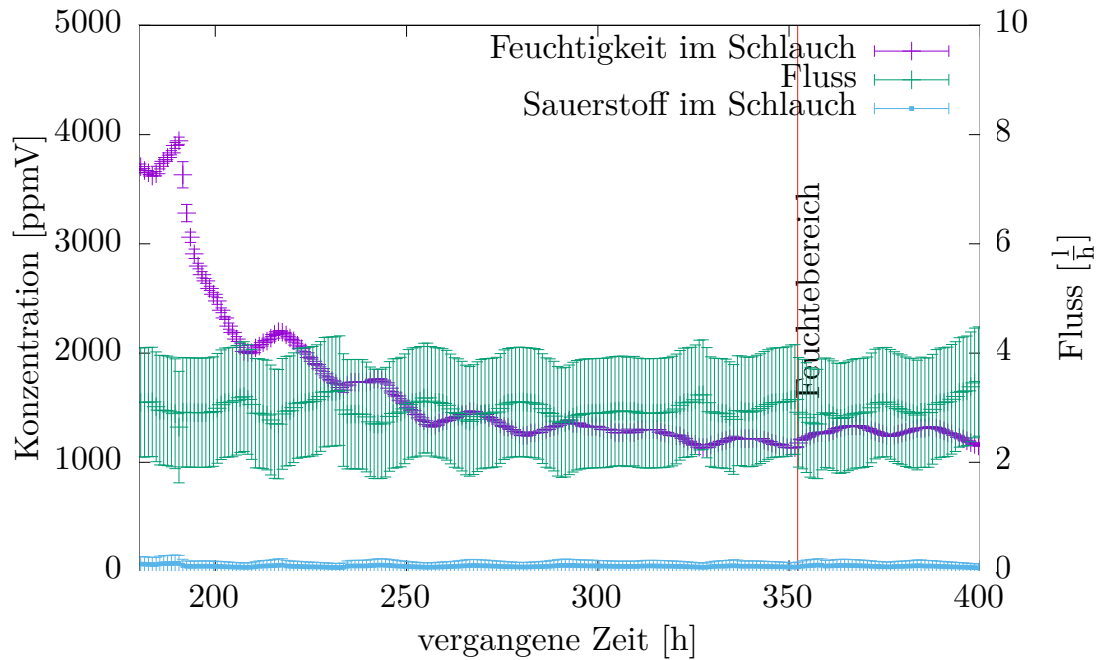


Abbildung 3.20: Zu sehen ist die zeitliche Entwicklung von Sauerstoff- und Feuchtekonzentration. Auch ist der zeitgleiche Fluss zu sehen. Gemittelt wird über jeweils eine Stunde.

In Abb. 3.20 ist erneut der Zusammenhang zwischen Feuchte und Fluss zu erkennen, welcher bei der Betrachtung der Rate angenommen wird.

Die Feuchte nach 400 h beläuft sich für $3 \frac{1}{h}$ auf etwa 1150 ppmV. Eine genauere Angabe ist aufgrund der erwähnten Schwankungen schwierig. Auch hier muss natürlich der Feuchtebeitrag des Schlauchsystems abgezogen werden. Dieser beläuft sich zu dieser Zeit auf ca. $(619,4 \pm 60,6)$ ppmV. Dieser Wert stammt aus der in Abschnitt 3.1.2 vorgenommenen Anpassung mit der erläuterten Flussnormierung. Somit ergibt sich der Feuchteeintrag durch die Kammer zu etwa 530 ppmV.

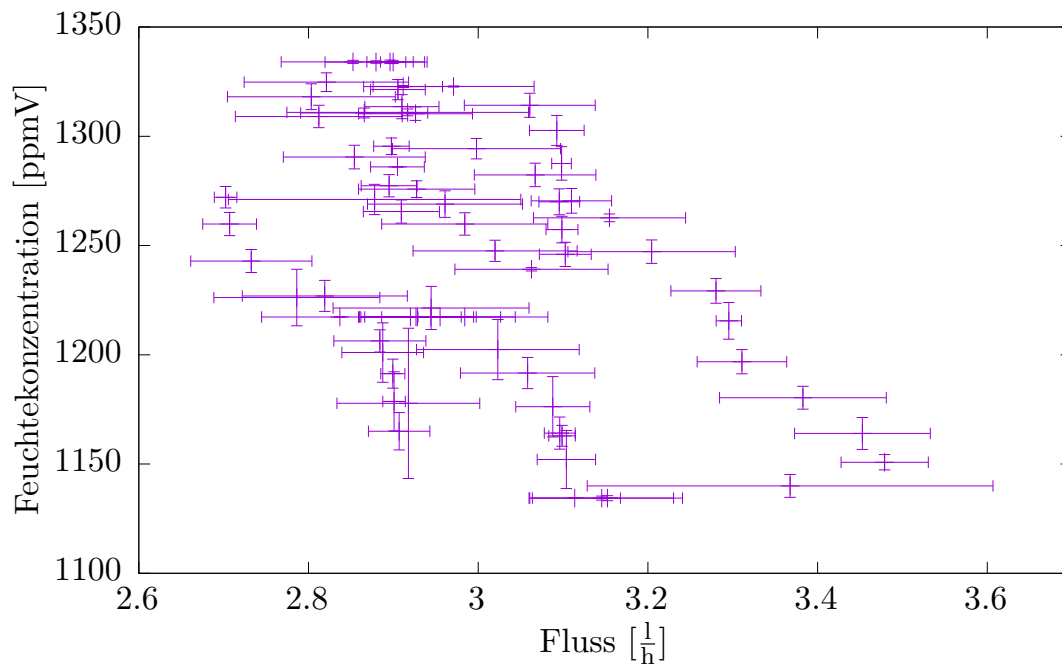


Abbildung 3.21: Dargestellt ist die Feuchtekonzentration aufgetragen auf den Fluss. Dabei geht nur die Messzeit zwischen 330 h und 400 h ein. Die Werte sind stundenweise gemittelt.

Der zuvor beobachtete lineare Zusammenhang zwischen Fluss und Feuchtekonzentration ist auch in Abb. 3.21 zu erkennen. Die Punkte in Abb. 3.21 sind in einem gerichteten Bereich angeordnet. Mit zunehmendem Fluss treten keine hohen Feuchtekonzentrationen mehr auf. Andererseits wird bei kleineren Flüssen eine gewisse Feuchte nicht unterschritten. Folglich ist, wie erwartet und beobachtet, ein starker linearer Zusammenhang zwischen Fluss und Feuchtekonzentration gegeben.

Hier sei noch einmal auf die Vernachlässigung der systematischen Fehler hingewiesen, die in Abb. 3.21 nicht eingezeichnet sind, um die erläuterte Tendenz erkennbar zu machen.

Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte

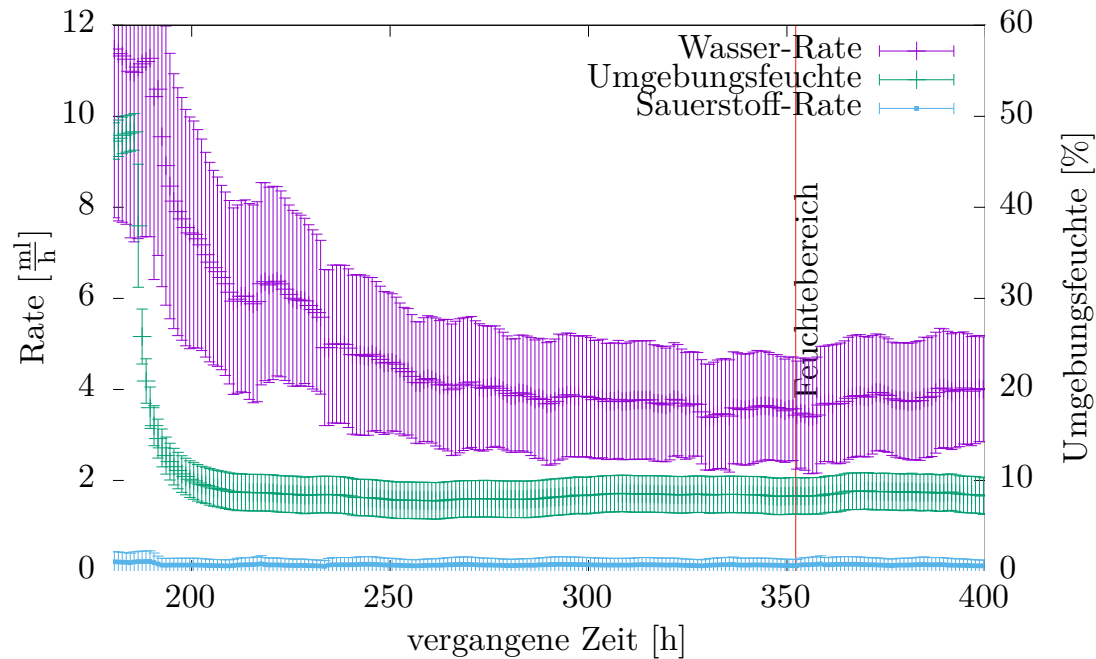


Abbildung 3.22: Abgebildet ist die Wasser- und Sauerstoff-Rate im Gassystem in Abhängigkeit von der Zeit. Die Umgebungsfeuchte ist auch eingezeichnet. Die Werte sind jeweils über eine Stunde gemittelt.

Wie in Abb. 3.22 zu erkennen, zeigt sich für die starke Senkung der relativen Umgebungsfeuchte eine große Abnahme der Feuchte-Rate im Gassystem. Da nur die Umgebungsfeuchte in großem Stil verändert wird, ist der neue exponentielle Abfall der Feuchtekonzentration im Gassystem auf die Verkleinerung jener zurückzuführen.

Es besteht also ein Zusammenhang zwischen Außenfeuchte und Wasserkonzentration im Gassystem, wie schon zuvor bemerkt. Eine gewisse zeitliche Verzögerung zwischen Senkung der Umgebungsfeuchte und Absinken der Feuchtekonzentration im Gassystem ist zu beobachten. Denkbar ist auch eine Unterschreitung einer Sättigungskonzentration der Außenfeuchte, unterhalb derer ein weiteres Absinken der Gassystem-Feuchte auftritt. Dagegen spricht jedoch der als linear zu erahnende Zusammenhang in Abb. 3.17.

Die Wasser-Rate aus den Polyamid-Schläuchen ist unabhängig von der Umgebungsfeuchte, wie unter anderem aus Abb. 3.12 und dem zugehörigen Abschnitt hervorgeht. Folglich rührt die Umgebungsfeuchte-Abhängigkeit bei dieser Messung allein von der Detektorkammer her. Aufgrund der geringen Verzögerung zwischen Änderung der Außenfeuchte und Änderung der Innenfeuchte steht weiterhin zu vermuten, dass das Kapton-Eintrittsfenster ursächlich für den Feuchteeintrag ist.

Die Feuchte-Eintritts-Rate beläuft sich nach 400 h auf ca. $(4,00 \pm 1,15) \frac{\text{ml}}{\text{h}}$. Ungefähr $(2,16 \pm 1,17) \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ davon kommen vom Schlauchsystem. Durch die Kammer kommt also

nach 400 h Trocknen bei $3 \frac{1}{h}$ eine Feuchte von $(1,85 \pm 0,50) \frac{ml}{h}$. Die geringere Unsicherheit bei letzterem Wert ergibt sich dabei aus der Annahme eines konstanten Flusses, sodass dessen große systematische Unsicherheiten nur einmal in die Rate eingehen.

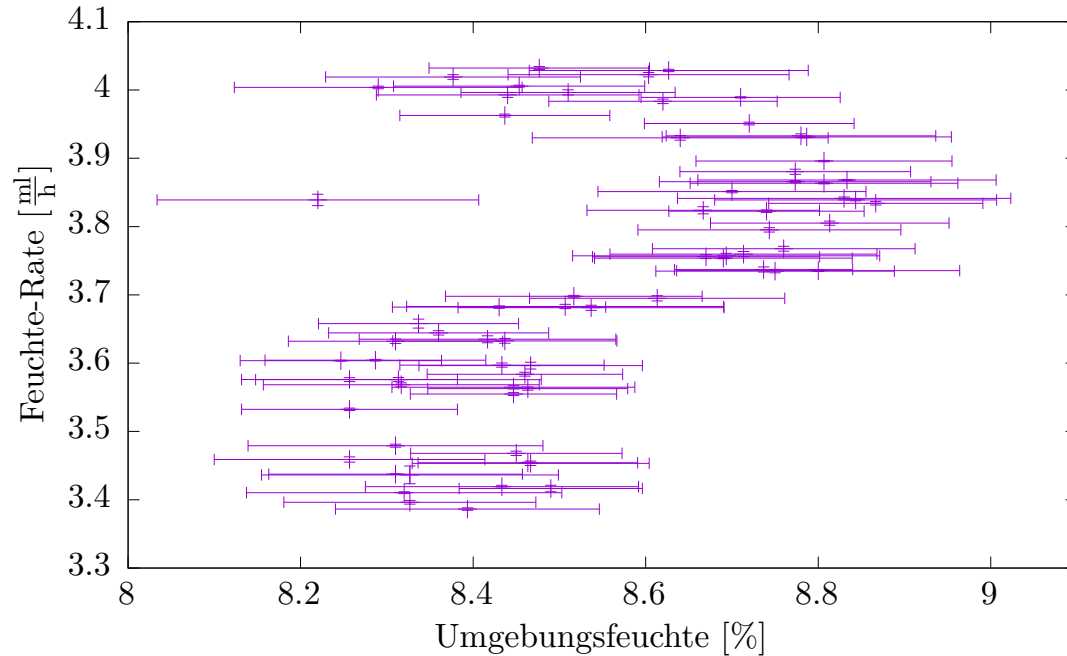


Abbildung 3.23: Hier ist die Feuchte-Rate aufgetragen auf die Umgebungsfeuchte. Die Werte sind über eine Stunde gemittelt und stammen aus dem Zeitintervall von 330 h bis 400 h, da in dieser Zeit die Ratenänderung aufgrund von Trocknung gering ist.

Wie aus Abb. 3.23 hervorgeht, sind die Änderungen der Feuchte unter der gespülten Haube so gering, dass keine Umgebungsfeuchte-abhängige Änderung der Rate beobachtet werden kann. Jedoch widerspricht dieses Ergebnis nicht den schon gefundenen Zusammenhängen zwischen Umgebungsfeuchte und Feuchte im Gassystem. Abweichungen von weniger als 1 %-Punkt führen also zu keiner merklichen Änderung der Feuchte.

Abhängigkeit von der Temperatur

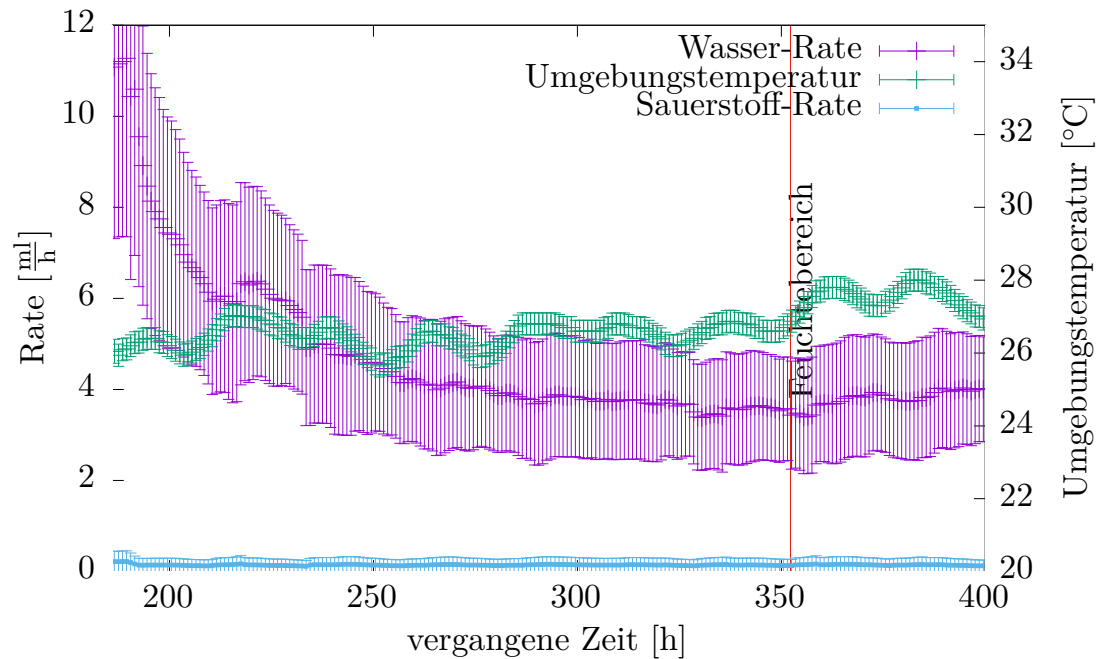


Abbildung 3.24: Aufgetragen sind Feuchte- und Sauerstoff-Rate, sowie die zugehörige Temperatur auf die vergangene Zeit. Es wird über jede Stunde gemittelt.

Wie schon im vorangegangenen Messabschnitt zeigen Raten- und Temperaturverlauf ähnliche Charakteristika. Durch die Untersuchung der Rate anstelle der Konzentration gelingt es zwar die in den Schlauchmessungen in Abschnitt 3.1 beobachteten Schwankungen des Flusses und die daraus resultierende Veränderung der Feuchtekonzentration, welche die Auswertung erschweren, deutlich abzuschwächen, jedoch ist der Zeitversatz zwischen Fluss- und Feuchteänderung, wie erwähnt, nicht zu vernachlässigen. Dieser Sachverhalt könnte zu den Abweichungen von einem gleichmäßigen exponentiellen Abfall in Abb. 3.24 beitragen. Eine solche Abweichung ist besonders gut zwischen 210 h und 230 h zu erkennen. Auch ist ein leichter Anstieg der Rate zum Ende der Messung hin beobachtbar. Dieser könnte auf den leichten Temperaturanstieg zum Ende der Messung zurückzuführen sein.

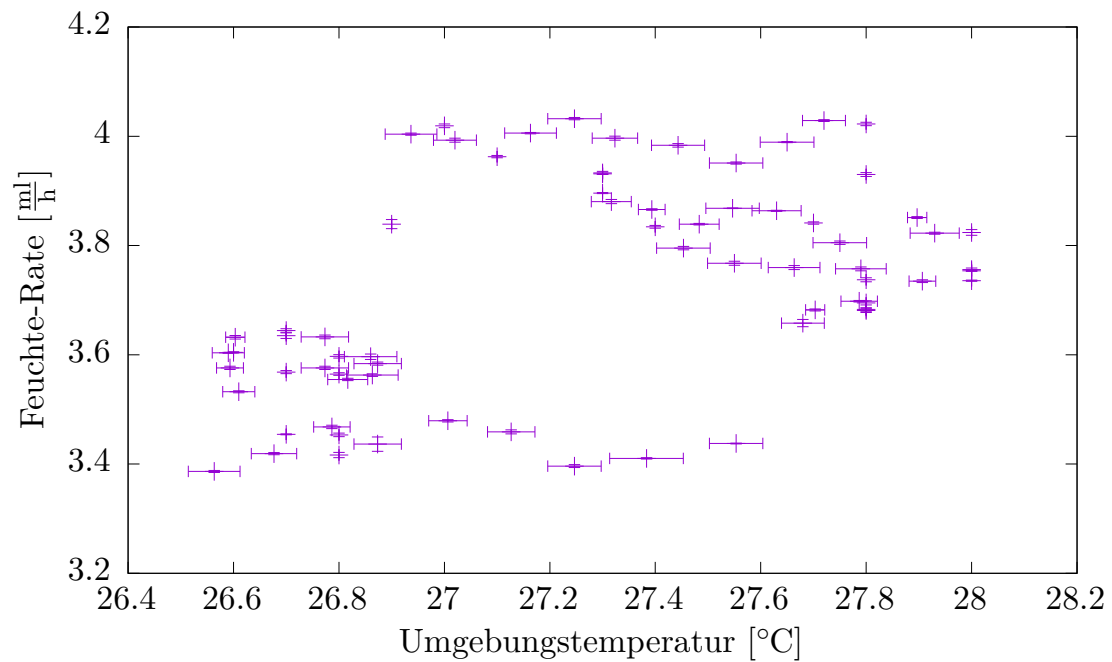


Abbildung 3.25: Aufgetragen ist die Rate auf die Temperatur. Die Werte sind stundenweise gemittelt. Sie stammen aus der Messzeit zwischen 330 h und 400 h.

Wie in Abb. 3.25 zu sehen, ist das abgedeckte Temperaturintervall sehr klein. Die Punkte sind in einem begrenzten Bereich angeordnet. Daraus lässt sich folgern, dass eine Temperaturabhängigkeit besteht, bei der mit steigender Temperatur die Rate zunimmt. Dieses Ergebnis entspricht dem beobachteten Verlauf, da der Anstieg der Rate zum Ende dieses Messabschnitts hin durch die Temperaturänderung bestätigt werden könnte.

3.2.3 Abhängigkeit des Feuchteeintrags vom Gasfluss

Nach ca. 405 h wird der Fluss auf ca. $6 \frac{1}{h}$ verdoppelt. Dies wird getan, um die Konstanz der Wasser-Eintrittsrates zu überprüfen.

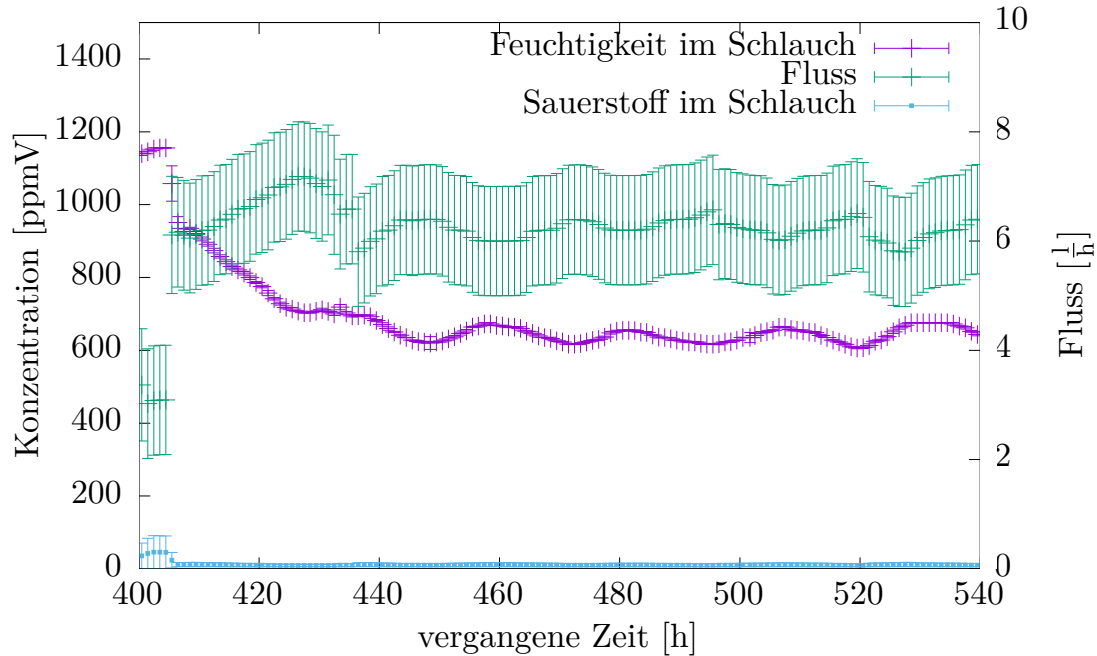


Abbildung 3.26: Zu sehen sind die Konzentrationen von Sauerstoff und Wasser im Gas-system aufgetragen auf die Zeit. Ebenfalls dargestellt ist der Fluss im Verlauf der Zeit. Gemittelt wird über jeweils eine Stunde.

In Abb. 3.26 ist die Verdopplung des Flusses zu erkennen, sowie der schon diskutierte direkte Zusammenhang zwischen Feuchte und Fluss. Die wichtigste Erkenntnis ist die ungefähre Halbierung der Feuchtekonzentration bei Verdopplung des Flusses. Wie erwähnt liegt der unter trockener Haube erreichte Wert für $3 \frac{1}{h}$ bei ca. 1200 ppmV. Der hier erreichte Wert für $6 \frac{1}{h}$ liegt bei ca. 630 ppmV.

Dieses Ergebnis ist eine wichtige Erkenntnis, denn es lässt vermuten, dass die Feuchte also im gleichen Maß sinkt, wie der Fluss steigt. Dieses Verhalten wird bei kleinen Flussschwankungen beobachtet und scheint auch auf größeren Skalen vorhanden zu sein. Dass die Feuchtekonzentration sich nicht vollständig halbiert, könnte durch eine zu geringe Messzeit oder die großen systematischen Fehler im Fluss-Messgerät bedingt sein.

Für den CBM-TRD bedeutet dies, dass zur Reduktion der Feuchte eine Möglichkeit darin besteht, den Fluss entsprechend zu erhöhen. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Versorgungsleitungen entsprechend zu dimensionieren sind, da sonst ein Überdruck jenseits der Belastungsgrenzen auftreten könnte. Diese Dimensionierung hat allerdings eine Pad-Größen-bedingte Obergrenze, da die Versorgungsrohre durch die Rückseite der Kammern geführt werden. Folglich kann die Feuchtekonzentration durch

eine derartige Maßnahme nicht beliebig verkleinert werden. Derartige Möglichkeiten werden in späteren Unterkapiteln noch diskutiert.

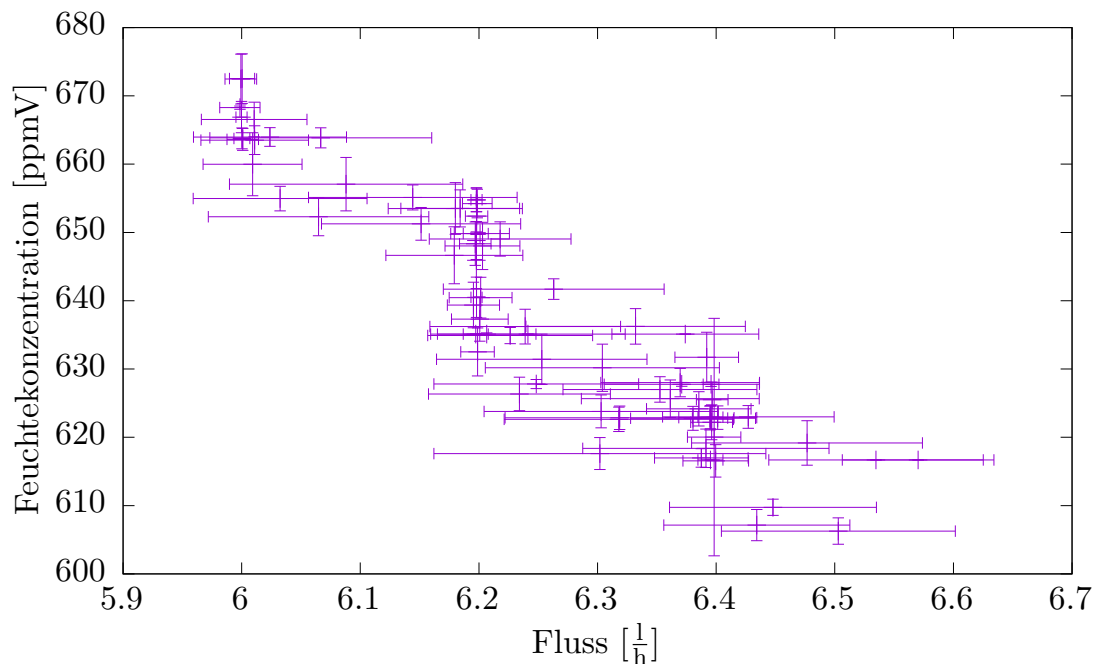


Abbildung 3.27: Aufgetragen ist die Feuchte im Gassystem auf den Fluss. Das untersuchte Zeitintervall liegt zwischen 445 h und 519 h, da bei 520 h durch Regelung eine starke Unstetigkeit im Fluss entsteht. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

In Abb. 3.21 ist die starke Flussabhängigkeit der Feuchte sehr gut zu erkennen. Die Feuchte nimmt mit steigendem Fluss ab. Dass der Bereich, in dem die Punkte angeordnet sind, hier so klein ist im Vergleich zu den anderen Graphen dieser Art, ist auf die Konstanz der Umgebungfeuchte und kleinere Änderungen der Umgebungstemperatur zurückzuführen. Unter diesen Umständen ist die Abhängigkeit vom Gasfluss dominant und damit gut zu erkennen.

Weiterhin ist der Zusammenhang linear, was für die schon diskutierte Möglichkeit zur Reduktion der Feuchte sehr relevant ist.

Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte

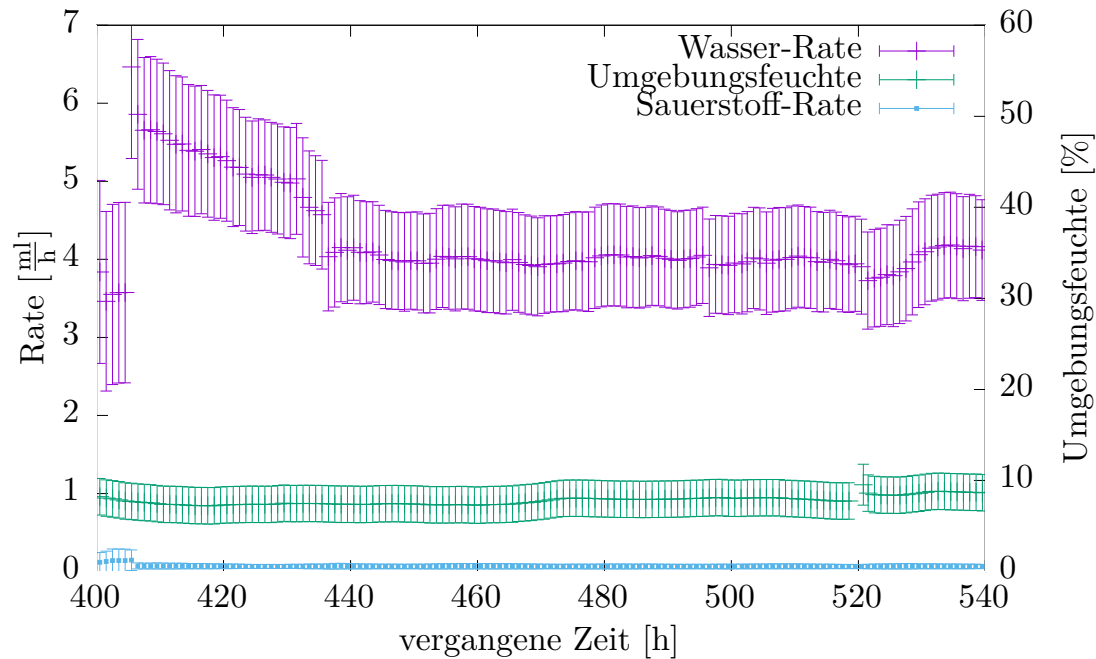


Abbildung 3.28: Dargestellt ist die Rate von Wasser und Sauerstoff im Gassystem im Verlauf der Zeit. Auch die Umgebungsfeuchte zu den jeweiligen Zeiten ist eingezeichnet. Es wird über jeweils eine Stunde gemittelt.

Der Verlauf der Wasser-Rate in Abb. 3.28 weist einen starken Sprung nach oben bei der Verdopplung des Flusses nach ca. 405 h auf. Von einem Maximum der Rate nach dem Sprung sinkt diese kontinuierlich auf den ungefähren Wert der Rate vor der Verdopplung des Flusses von etwa $4 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$. Es ist zwar ein sehr leichter Anstieg der Rate nach besagter Verdopplung zu beobachten, jedoch ist dieser innerhalb der großen systematischen Unsicherheiten vernachlässigbar, beziehungsweise durch die beschränkte Messzeit zu erklären. Nach ca. 539,5 h liegt die Rate bei $(4,12 \pm 0,64) \frac{\text{ml}}{\text{h}}$.

Die Sauerstoff-Rate sinkt nach der Flussverdopplung schnell. Die Konzentration beläuft sich dabei auf weit unter 20 ppmV. Folglich ist dieser Ratenabfall nicht sehr zuverlässig, wenn auch naheliegend.

Weiterhin ist in Abb. 3.28 zu sehen, dass die Umgebungsfeuchte in diesem Zeitfenster in guter Näherung konstant ist. Eine zusätzliche Aussage zu der schon festgestellten Abhängigkeit ist also nicht möglich.

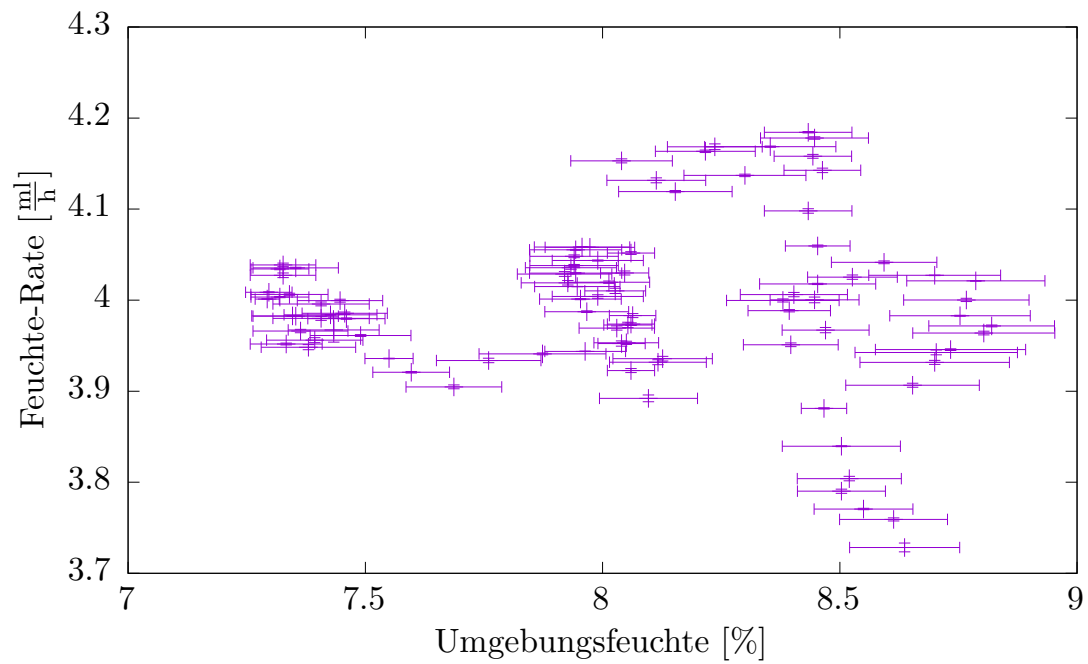


Abbildung 3.29: Aufgetragen ist die Rate auf die Umgebungsfeuchte. Die Werte stammen aus dem Intervall zwischen 445 h und 500 h und sind jeweils über eine Stunde gemittelt.

Wie in Abb. 3.29 zu sehen, verhält sich die Umgebungsfeuchte in diesem Messabschnitt genauso wie schon im vorangegangenen Messabschnitt. Auch hier ist das abgedeckte Feuchteintervall zu klein, um Tendenzen zu erkennen und Schlussfolgerungen zu ziehen.

Abhängigkeit von der Temperatur

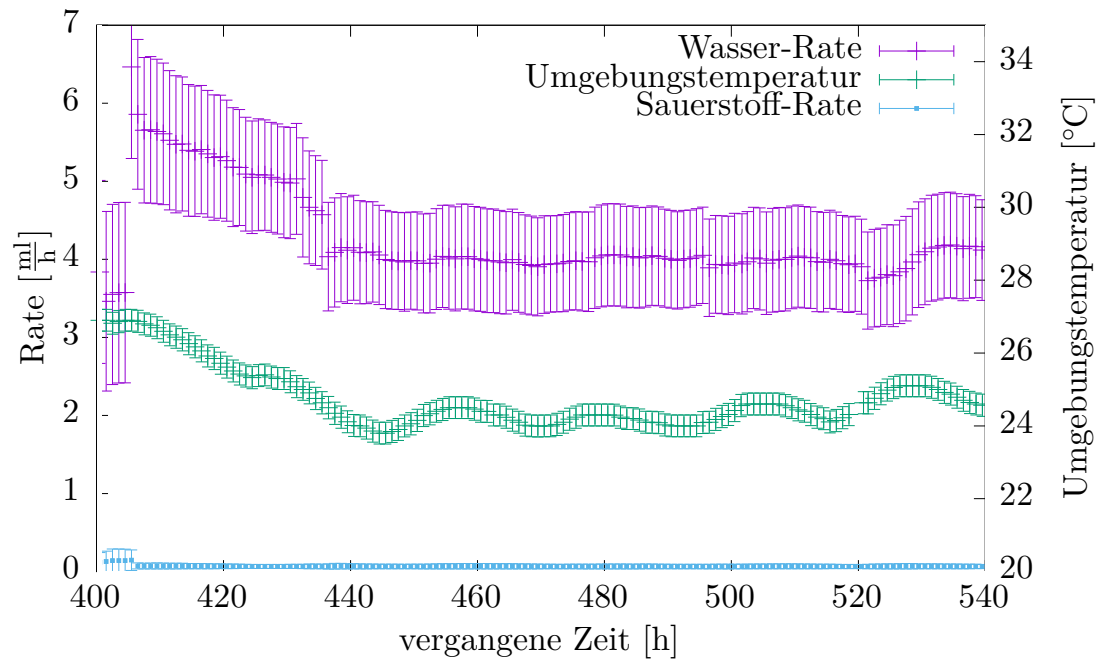


Abbildung 3.30: Die Sauerstoff- und Wasser-Rate sind aufgetragen auf die vergangene Zeit. Auf der zweiten y -Achse ist die Umgebungstemperatur zur jeweiligen Zeit dargestellt. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

Die Temperatur- und Ratenverläufe weisen wie in allen vorangegangenen Messabschnitten und Versuchsteilen ähnliche Charakteristika auf. Den zuvor formulierten und diskutierten Aussagen ist an dieser Stelle nichts hinzuzufügen.

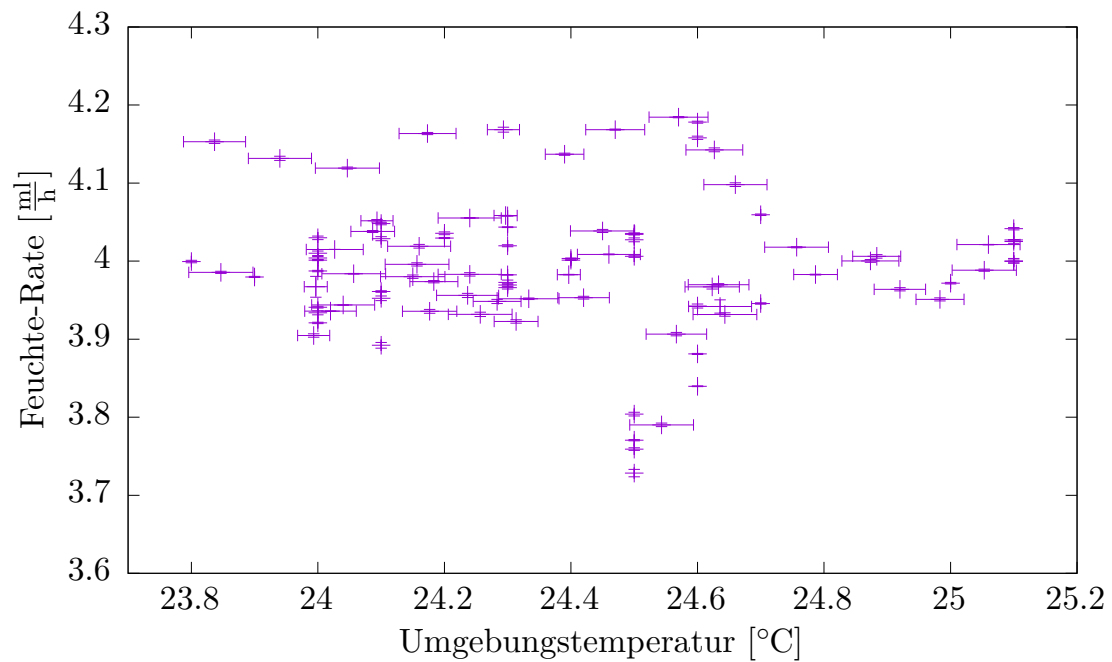


Abbildung 3.31: Zu sehen ist die Rate aufgetragen auf die Temperatur. Berücksichtigt ist das Zeitintervall zwischen 445 h und 540 h. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

In Abb. 3.31 ist keine eindeutige Korrelation zwischen Feuchte-Rate und Temperatur zu erkennen. Dies ist auf den kleinen abgedeckten Temperaturbereich zurückzuführen. Aufgrund dessen ist die Unkorrelation, die aus Abb. 3.31 gefolgert werden könnte, eine extrem unzuverlässige Aussage.

3.2.4 Kontinuität der Feuchterate

Nach ca. 548 h wird der Fluss wieder auf sein ursprüngliches Maß von ca. $3 \frac{1}{h}$ halbiert. Dies dient zur Feststellung der Wiederherstellung des Ausgangszustands. Im Zuge dieses Messabschnitts läuft die Gasflasche, die den Aufbau mit Sagox versorgt, leer. Während die Flasche getauscht wird, steht der Einlass in den Gasaufbau zeitweise offen.

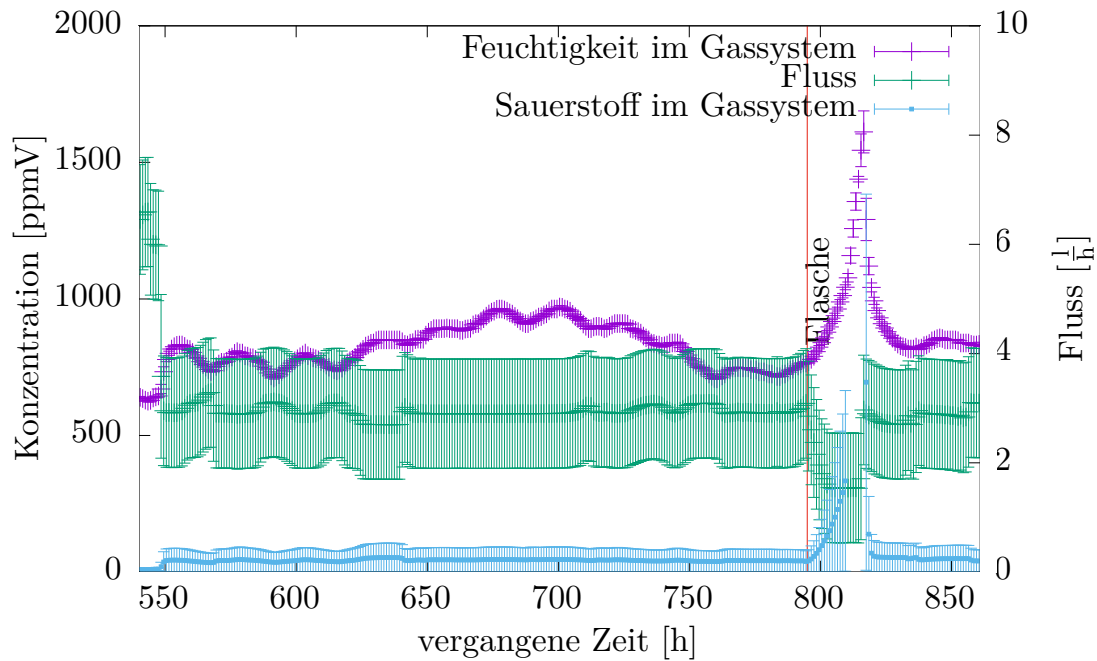


Abbildung 3.32: Dargestellt ist die Entwicklung der Feuchte- und Sauerstoffkonzentration über die Zeit. Ebenfalls eingezeichnet ist der Sagox-Fluss. Bei „Flasche“ sinkt der Flaschendruck unter den eingestellten Wert von ca. 1,4 bar, sodass der Fluss stetig nachlässt. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

In Abb. 3.32 ist zu erkennen, dass die Feuchtekonzentration nach Halbierung des Flusses nicht auf das alte Maß zurück steigt. Vor der Fluss-Verdopplung liegt die Feuchtekonzentration bei ca. 1200 ppmV. Nach ca. 795 h liegt die Feuchtekonzentration bei ca. 765 ppmV. Dass kein direkter Anstieg auf den alten Wert erfolgt, ist auf die fortschreitende Trocknung zurückzuführen. Die Rückkehr zum geringeren Fluss führt dann zu einem Anstieg der Feuchtekonzentration, die durch Permeation oder stetige Ausgasprozesse hervorgerufen wird.

Für die Existenz einer „Grundrate“, also einer flussunabhängigen Wasser-Eintrittsrates, spricht der ruckartige Anstieg der Feuchtekonzentration kurz nach Absenken des Flusses. Zudem könnte durch den geringeren Fluss auf die Existenz einiger „Feuchteknissen“ im Gassystem spekuliert werden, die die Feuchtekonzentration durch eintretende Feuchte abpuffern.

Beim Wechsel der Flasche tritt Raumluft in das Gassystem ein. Folglich steigen Sauerstoff- und Feuchtekonzentration ab 795 h stark an. Der Fluss sinkt dabei auf Null, jedoch ist dies in Abb. 3.32 nicht zu erkennen. Das liegt an einem dem Messgerät eigenen Offset, der in der Aufnahme über das 4 mA-20 mA-Signal nicht berücksichtigt und deshalb in dessen Umrechnung als Konstante hinzuaddiert wird.

Während der Abwesenheit des Flusses steigt der Sauerstoffgehalt im Gassystem auf Zimmerniveau an, weshalb dieser in Abb. 3.32 zeitweise außerhalb des Darstellungsbereichs der Grafik liegt. Auch die Feuchte erfährt einen starken Anstieg. Bei ca. 816 h wird ein Maximum der Feuchte erreicht. Ein weiterer Anstieg der Feuchtekonzentration wird durch Wiedereinstellung eines Flusses von ca. $3 \frac{1}{h}$ verhindert.

Anhand der stark gestiegenen Feuchte kann untersucht werden, wie oft das Innenvolumen des Gassystems beziehungsweise der Kammer getauscht werden muss, um eine Rückkehr zum Ausgangszustand zu gewährleisten. Dabei wird, wie in Abb. 3.32 zu erkennen, der Ausgangszustand nicht direkt vollständig erreicht. Untersucht wird daher der Konzentrationsabfall bis zum Minimum bei ca. 830 h.

Das Volumen der Kammer beläuft sich auf

$$V_{\text{Kammer}} = (3,5 \text{ mm} + 3,5 \text{ mm} + 5 \text{ mm}) \times 57 \text{ cm} \times 57 \text{ cm} \approx 3,9 \text{ l.}$$

Hinzu kommt das Volumen der Schläuche und Rohre. Die Länge der damit überbrückten Strecke beläuft sich schätzungsweise auf 8 m. Damit ergibt sich das Volumen des Zuleitungssystems zu

$$V_{\text{Leitung}} = \pi \times (2 \text{ mm})^2 \times 8 \text{ m} \approx 0,4 \text{ l.}$$

Insgesamt ergibt sich also ein Volumen von etwa 4,3 l für das Gassystem. An die zeitliche Entwicklung des Gasflusses wird ein Polynom zweiten Grades angepasst, welches den Verlauf zwischen 816 h und 830 h hinreichend beschreibt:

$$f(t) = at^2 + bt + c.$$

Die Anpassungsparameter a, b und c ergeben sich zu

$$\begin{aligned} a &= 0,0016 \pm 0,0001 \left[\frac{1}{h^3} \right] \\ b &= -2,7096 \pm 0,1778 \left[\frac{1}{h^2} \right] \\ c &= 1125,16 \pm 73,19 \left[\frac{1}{h} \right] \end{aligned}$$

Über dieses Polynom wird zum Intervall passend integriert, um das Volumen zu erhalten, welches in diesem Zeitraum im Gassystem ausgetauscht wird.

Es ergibt sich ein getauschtes Volumen von etwa

$$V_{\text{Austausch}} = \int_{816 \text{ h}}^{830 \text{ h}} f(t) dt \approx 38,94 \text{ l.}$$

Das Gassystem Volumen muss also etwa 9 mal getauscht werden, damit ein Großteil des Gases ausgetauscht ist.

Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte

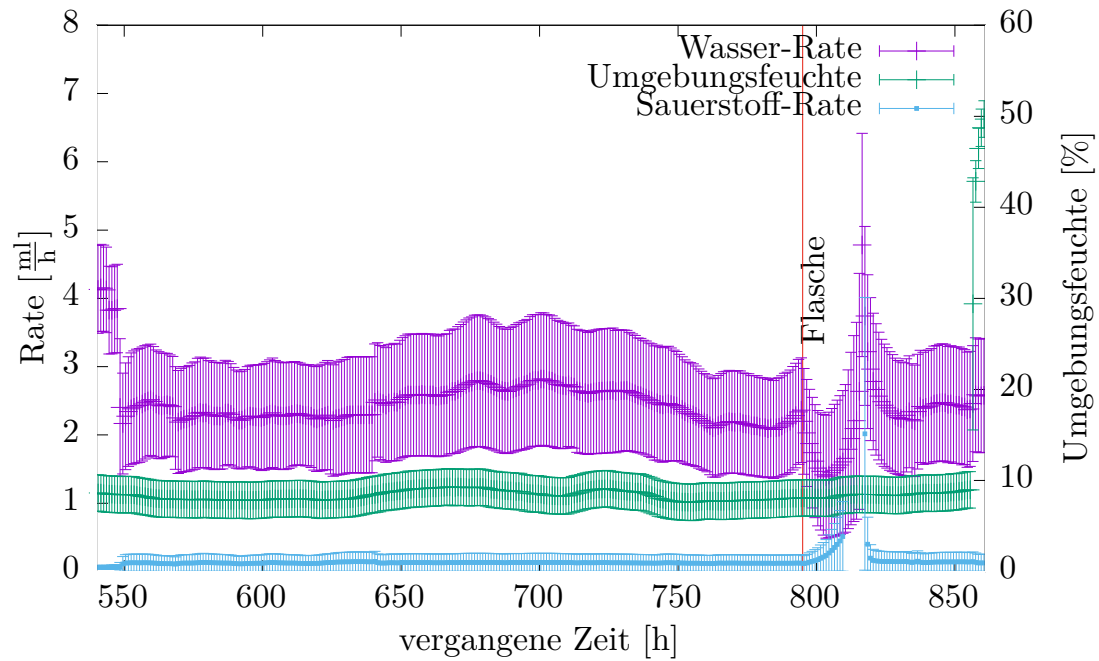


Abbildung 3.33: Aufgetragen sind die Raten von Feuchte und Sauerstoff auf die Zeit. Ebenfalls dargestellt ist die zeitliche Entwicklung der Umgebungsfeuchte. Bei „Flasche“ wird die Sagox-Flasche gewechselt. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

Auch in diesem Messabschnitt kann eine Abhängigkeit zwischen Rate und umgebender Feuchte beobachtet werden. Wie in Abb. 3.33 zu erkennen, steigt zwischen ca. 630 h und 660 h die Umgebungsfeuchte unter der Haube leicht an. Etwa im selben Zeitraum ist ein Anstieg der Rate zu beobachten. Bisher gibt es also für alle beobachteten Umgebungsfeuchte-Bereiche eine Abhängigkeit der Rate von jener.

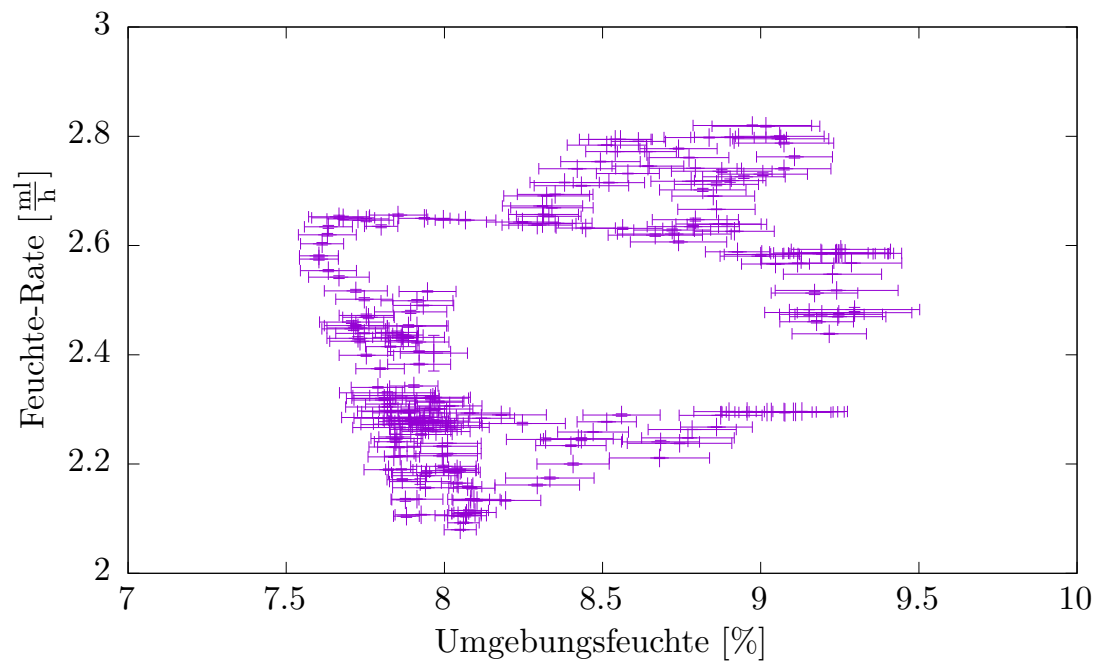


Abbildung 3.34: Gezeigt ist die Feuchte-Rate in Abhängigkeit von der umgebenden relativen Feuchte. Die Werte stammen aus einem Zeitintervall zwischen 540 h und 790 h. Sie sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

Die schon vermutete Umgebungsfeuchten-Abhängigkeit ist auch in Abb. 3.34 zu erkennen. Mit steigender Umgebungsfeuchte steigt auch bei kleinen relativen Feuchten die Wasser-Rate. Die Änderung der Feuchte ist relativ zu den anderen Messungen sehr klein. Die Änderung der Rate ist allerdings nicht zu vernachlässigen. Es steht also zu vermuten, dass die Umgebungsfeuchte hier nicht die dominante Größe ist.

Abhängigkeit von der Temperatur

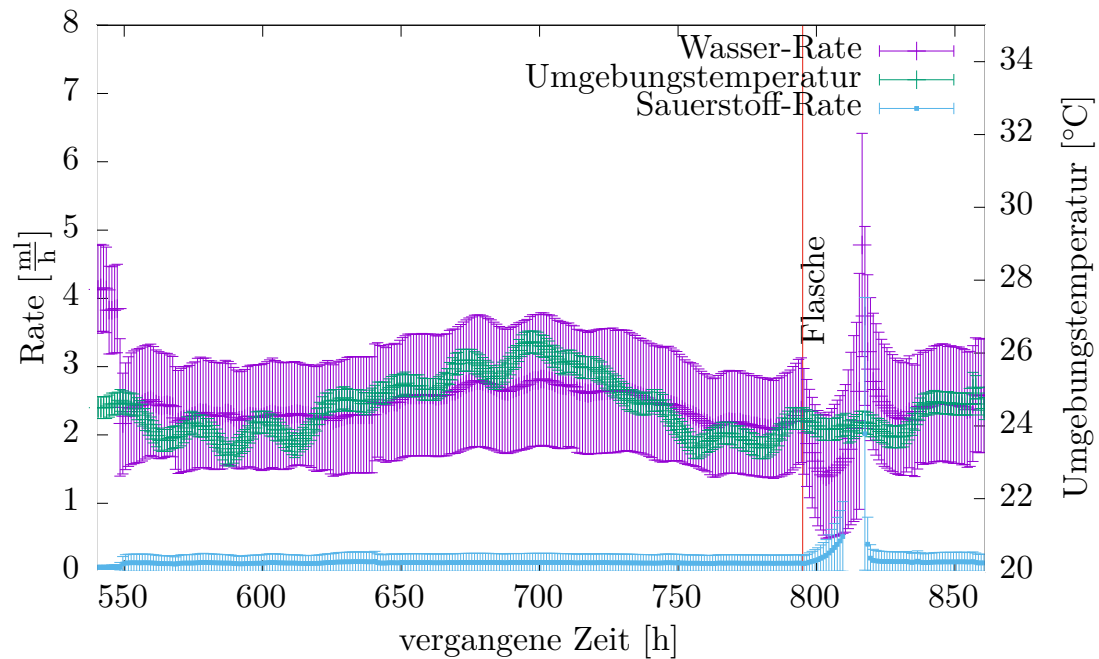


Abbildung 3.35: Dargestellt ist die Entwicklung der Rate von Sauerstoff und Wasser mit der Zeit. Ebenfalls eingezeichnet ist die Umgebungstemperatur zur jeweiligen Zeit. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

In diesem Messabschnitt wird die Temperaturabhängigkeit zum ersten Mal sehr deutlich erkennbar. Auch die Rate zeigt in Abb. 3.35 eine deutliche Temperaturabhängigkeit. Dabei ist insbesondere das Zeitintervall von 630 h bis 760 h aussagekräftig. Die Zeitverzögerung beläuft sich dabei auf wenige Stunden. Zu beachten ist auch, dass die Sauerstoff-Rate praktisch unverändert bleibt (ausgenommen ist natürlich der Wechsel der Flasche).

Ebenfalls bemerkenswert ist, dass die Rate nach Wiedereinstellung der Temperatur, wieder auf das alte Maß zurück sinkt, aber nicht tiefer. Daraus ergibt sich die Vermutung, dass die erhöhte Temperatur die Permeation bedeutend verstärkt, während das Ausgasen nahezu unverändert bleibt. Wäre nämlich das Ausgasen stark betroffen, so sollte sich nach dem verstärkten Ausgasen zwischen 630 h und 760 h ein Abfall der Rate zeigen, da das Ausgasen dann weiter fortgeschritten wäre.

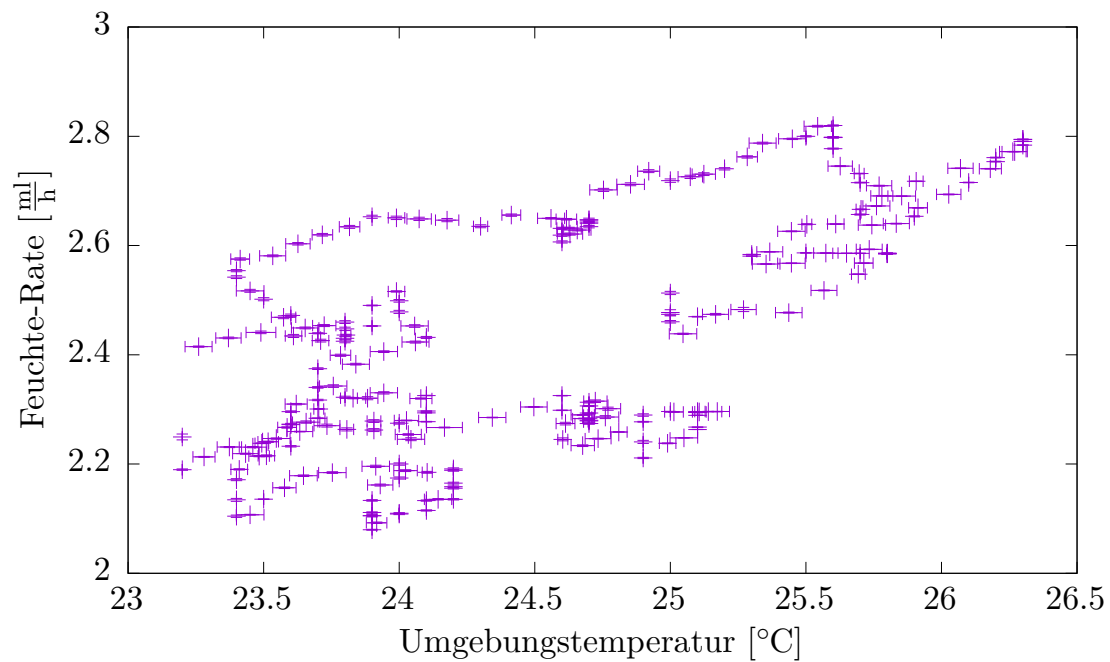


Abbildung 3.36: Hier ist die Rate aufgetragen auf die Temperatur. Die Werte stammen aus dem Zeitintervall zwischen 540 und 790 h und sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

Der zuvor schon vermutete konstruktive Zusammenhang zwischen Temperatur und Wasser-Rate ist in Abb. 3.36 deutlich zu erkennen. Das in diesem Messabschnitt abgedeckte Temperaturintervall ist mit etwa 3,5 °C auch hinreichend groß, um eine verlässliche Aussage zu treffen. Um die Art des Zusammenhangs zuverlässig zu charakterisieren, bedarf es zwar einer breiteren Temperatur-Variation, doch deutet Abb. 3.36 auf einen linearen Zusammenhang hin (zumindest in Temperaturen in der Größenordnung der Raumtemperatur).

Dieses Ergebnis entspricht qualitativ den Erwartungen, da eine größere Temperatur sich zugunsten von diffusionsartigen Prozessen auswirkt. Quantitativ ist das Ergebnis aufgrund der großen, in Abb. 3.36 nicht eingezeichneten, systematischen Unsicherheiten und der breiten Verteilung der Messpunkte nicht auszuwerten.

3.2.5 Einfluss der Umgebungsfeuchte bei fortgeschrittener Spülung

Nach ca. 862 h Spülung wird die Haube wieder angehoben und die Kammer somit wieder normaler Atmosphäre ausgesetzt.

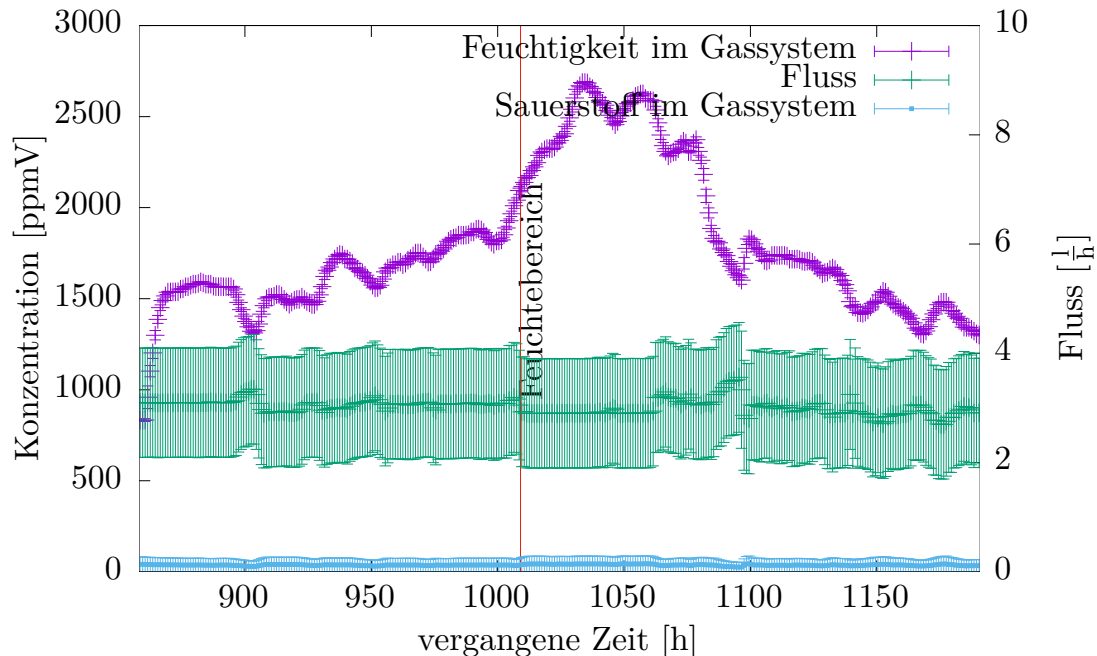


Abbildung 3.37: Gezeigt ist die Feuchte- und Sauerstoffkonzentration über die Messzeit. Auch dargestellt ist die zeitliche Entwicklung des Gasflusses. Bei „Feuchtebereich“ wird die Reichweite des Feuchtesensors von 2000 ppmV auf 5000 ppmV erhöht. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

Wie in Abb. 3.37 zu sehen, steigt die Feuchtekonzentration nach dem Anheben der Haube innerhalb weniger Stunden von ca. 800 ppmV auf ca. 1550 ppmV. Während dieses Anstiegs ist der Fluss nahezu konstant. Der weitere Anstieg der Feuchtekonzentration im Fortschreiten der Messung kann nicht durch Flussänderungen erklärt werden, welche in diesem Messabschnitt weitestgehend gering ausfallen.

Da die Umgebungsfeuchte als einzige gemessene Größe beim Anheben der Haube im großen Maße verändert wird, kann gefolgert werden, dass ihre starke Änderung zu einer Verdoppelung der Feuchte im Gassystem führt. Der kleine zeitliche Abstand, mit dem die Erhöhung der Gasfeuchte auf die Erhöhung der Umgebungsfeuchte folgt, spricht für Permeation durch die dünne Kaptonfolie. Für die Kaptonfolie als Verursacher spricht auch der große Oberflächen-Anteil, den die Kaptonfolie von der Gesamt-Innenoberfläche der Kammer ausmacht.

Gegen ein Leck im Gassystem spricht der weiterhin geringe Sauerstoffanteil um die 50 ppmV.

Am Ende der Kammer-Untersuchung nach 1196 h liegt die von der Kammer verursachte Feuchtekonzentration bei einem Fluss von $3 \frac{1}{h}$ bei $(557,34 \pm 78,59)$ ppmV. Die um den Schlauch-Einfluss korrigierte Feuchte-Rate beläuft sich auf ca. $(1,57 \pm 0,66) \frac{ml}{h}$. Dabei liegt die Temperatur bei $(20,5 \pm 0,3) ^\circ C$ und die relative Luftfeuchte bei ca. $(35,8 \pm 2,0) \%$.

Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte

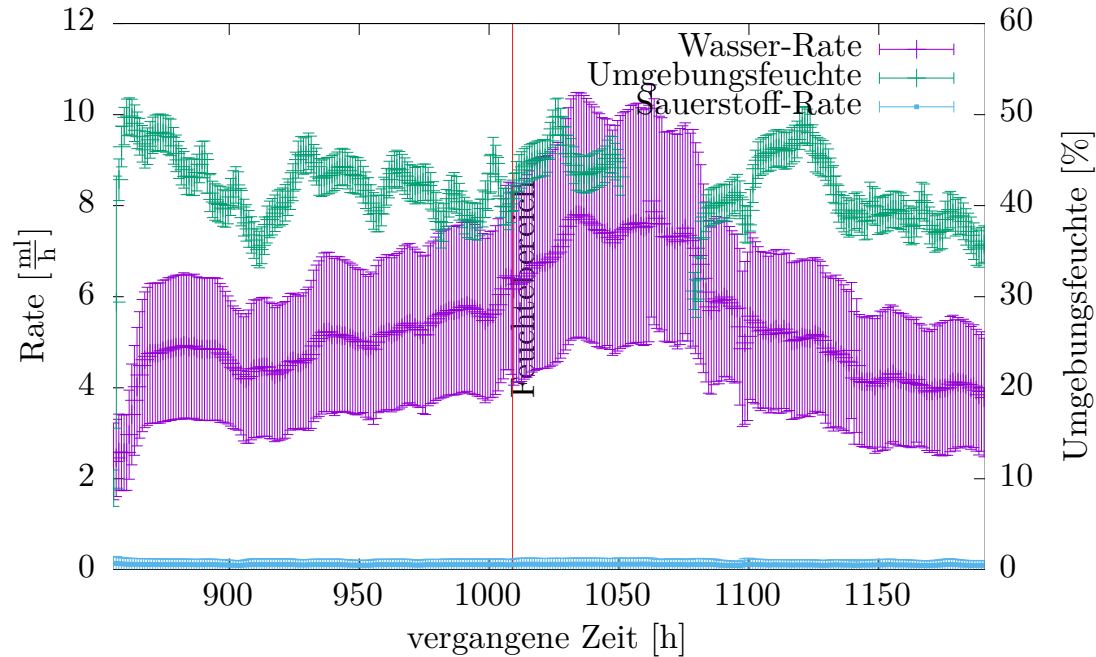


Abbildung 3.38: Dargestellt sind die Raten von Sauerstoff und Wasser auf die Zeit. Ein-gezeichnet ist auch die umgebende Feuchte. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

Es ist in Abb. 3.38 deutlich zu erkennen, dass noch immer eine Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte besteht. Nach dem Anheben der Haube steigt die Feuchte-Rate im Gas-system innerhalb weniger Stunden von etwa $(2,58 \pm 0,83) \frac{ml}{h}$ auf etwa $(4,61 \pm 1,49) \frac{ml}{h}$. Dieser „Sprung“ in der Feuchte-Rate stammt höchstwahrscheinlich aus Permeationspro-zessen, da diese stark von der umgebenden Feuchte abhängig sind.

Auch danach ist ein weiterer Anstieg zu beobachten, bis bei einer Messzeit von ca. 1040 h ein Maximum erreicht wird. Die makroskopischen Verläufe von umgebender Feuchte und Feuchte-Rate sind vergleichbar, aber einander nicht so ähnlich wie zu Anfang der Messung. Es ist nichtsdestotrotz eine Abhängigkeit zu erahnen. Manche Charakteristi-ka, wie zum Beispiel „spitze“ Einbrüche der umgebenden Feuchte, spiegeln sich in der Feuchte-Rate wider. Man könnte vermuten, dass diese kleinen Charakteristika durch das Kaptonfenster entstehen. Der makroskopische Verlauf ist jedoch nicht von der Um-gebungsfeuchte dominiert.

Zwischen 1051 h und 1079 h liegen keine Daten über die Umgebungsatmosphäre vor, da der interne Speicher des Daten-Loggers nicht mehr als 16 000 Datenpunkte aufnehmen kann.

Nach 1191 h ist bei einer Luftfeuchte von $(35,78 \pm 2,00) \%$ eine Rate von $(3,72 \pm 1,32) \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ erreicht. Nach Abzug der Feuchterate aus dem Schlauchsystem ergibt sich eine reale Feuchte-Rate von $(1,64 \pm 0,64) \frac{\text{ml}}{\text{h}}$.

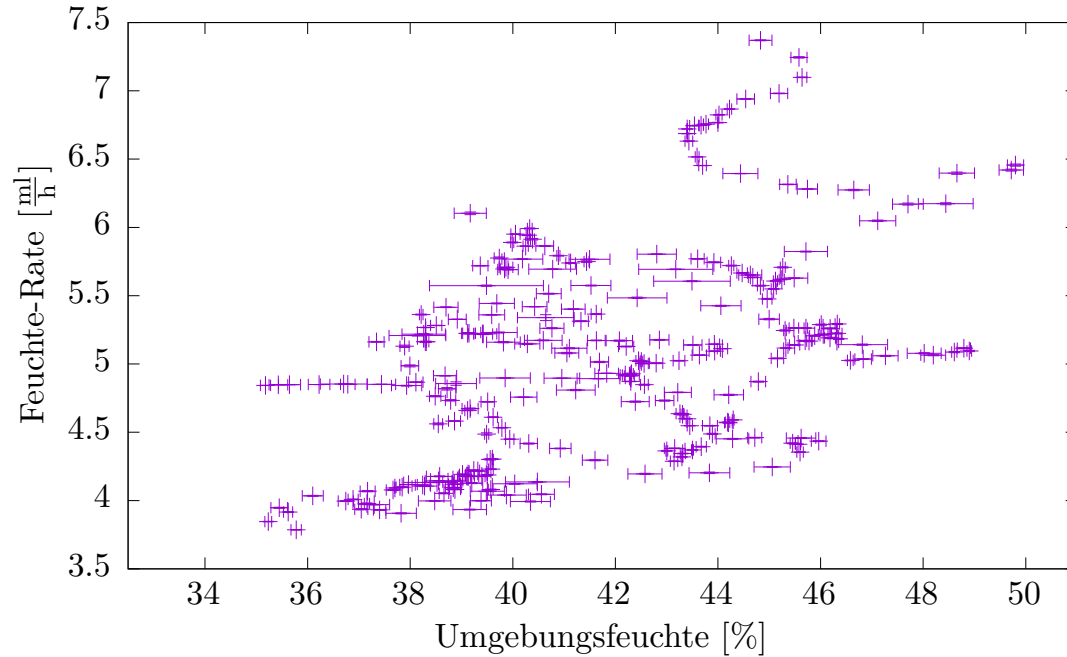


Abbildung 3.39: Die Feuchte-Rate ist hier aufgetragen auf die Umgebungsfeuchte. Die Werte stammen aus dem Zeitintervall zwischen 880 h und 1200 h. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt.

In Abb. 3.39 ist die schon bekannte Korrelation zu erkennen. Die breite Streuung der Messpunkte deutet jedoch auf eine zusätzliche Abhängigkeit von einer anderen Variablen hin.

DUPONTTM macht in [12, S.15, Tab. 10] Angaben über die Durchlässigkeit von Kapton für Sauerstoff und Wasser. Für eine Kapton-Foliendicke von 25 μm werden Durchlässigkeiten von $3800 \frac{\text{ml}}{\text{m}^2 24 \text{h MPa}}$ für Sauerstoff und $54 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 24 \text{h}}$ für Wasserdampf angegeben. Die Testbedingungen sind dabei 23 °C und 50 % RH.

Nimmt man vereinfachend an, dass es sich bei Raumluft um ein ideales Gas handelt, so ergibt sich der Partialdruck von Sauerstoff bei Normaldruck zu ungefähr 0,021 MPa. Der Partialdruck von Sauerstoff im Inneren des Gassystems ist aufgrund der geringen Sauerstoffkonzentration zu vernachlässigen. Mit der Eintrittsfenster-Fläche von etwa 0,325 m^2 ergibt sich eine Sauerstoff-Rate von $1,09 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$.

Für Wasser ist diese Rechnung etwas komplizierter. Es ergibt sich eine Feuchte-Rate von

ca. $0,731 \frac{\text{g}}{\text{h}}$. Die Umrechnung von g in ml erweist sich hier als nicht trivial, da im Idealfall die Anordnung der Wassermoleküle im Detektorgas zu beachten ist. Diese ordnen sich um das CO_2 im Gas an, da dieses an beiden Sauerstoffatomen einen Elektronenüberschuss aufweist, was die polaren Wassermoleküle anzieht. Für die Phase, in der sich das Wasser befindet, ist also keine genaue Angabe zu machen.

Aufgrund einer schlechten Datenlage zu diesem Thema wird als erste Näherung angenommen, dass das gesamte Wasser verdampft. Die molare Masse von Wasser beläuft sich auf etwa $18 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$. Damit ergibt sich eine Rate von $0,041 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$. Das molare Volumen beläuft sich bei 1,103 bar und 25°C auf $24,465 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$. Damit ergibt sich für die Wasserrate ein Wert von $993,55 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$.

Diese Rate ist größer als jede Rate, die in diesem Versuch gemessen wird. Das ist wahrscheinlich sowohl auf eine falsche Einschätzung der Phasenverteilung des Wassers, als auch das Ignorieren der 50 nm dicken Schicht Aluminium zurückzuführen. Aluminium stellt eine Barriere für Wasser und Gase dar. Bei dünnen Schichten treten allerdings Dehnungs-Risse und mikroskopisch kleine Löcher auf, welche die Barrierefunktion verschlechtern (vgl. [13]). Die Oberfläche, durch die Gase eindringen können, ist also deutlich kleiner als die komplette Fenstergröße.

Eine Rate von $993,55 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ ist größer als die maximale Menge, die durch das Spülen des Gassystems mit Sagox abgeführt werden kann. Dabei ist der Effekt, den das CO_2 auf das Wasser hat, nicht berücksichtigt. Für Klarheit könnte eine Wiederholung der Messung mit reinem Argon sorgen, da Argon als Edelgas praktisch keine Wechselwirkung mit Wasser eingeht.

Abhängigkeit von der Temperatur

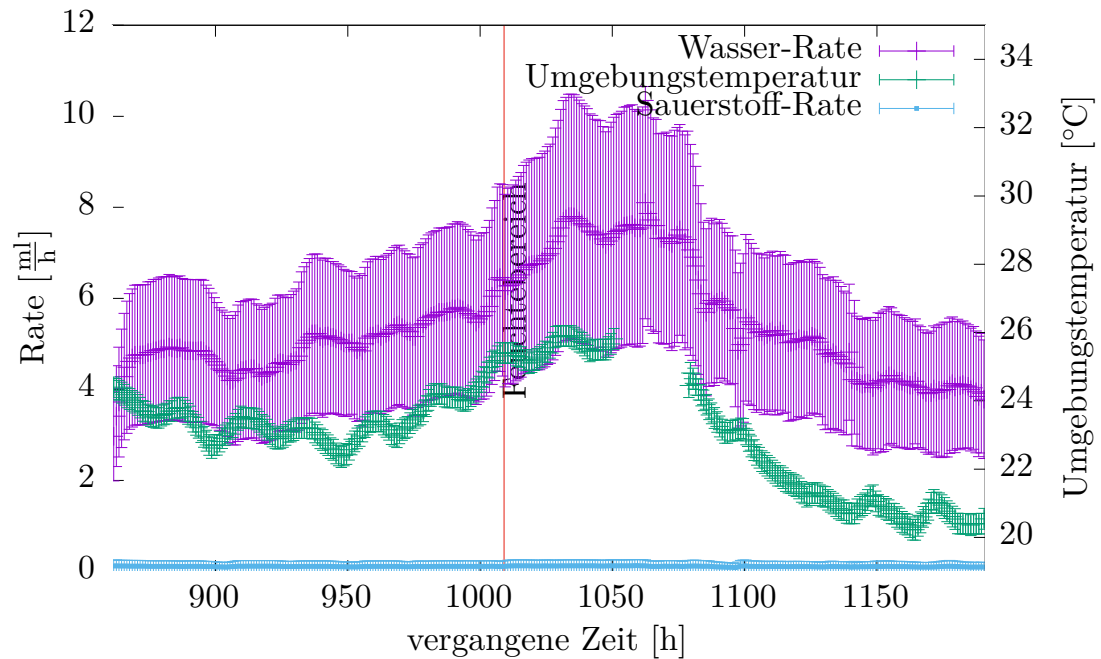


Abbildung 3.40: Dargestellt ist zeitliche Verlauf der Sauerstoff- und Wasser-Raten. Zum Vergleich ist auch die Temperatur zur jeweiligen Zeit eingezeichnet. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt. Bei „Feuchtebereich“ wird der Feuchtebereich des Messgeräts von 2000 ppmV auf 5000 ppmV vergrößert.

Abbildung 3.40 ist als weiterer Hinweis auf einen konstruktiven Zusammenhang zwischen Temperatur und Feuchte-Rate zu interpretieren. Der Verlauf der Temperatur ähnelt dem Verlauf der Feuchte-Rate sehr deutlich. Insbesondere kann jener auch als Erklärung für das spätere Sinken der Feuchte-Rate unter den Wert kurz nach der Belüftung des Versuchsvolumens betrachtet werden.

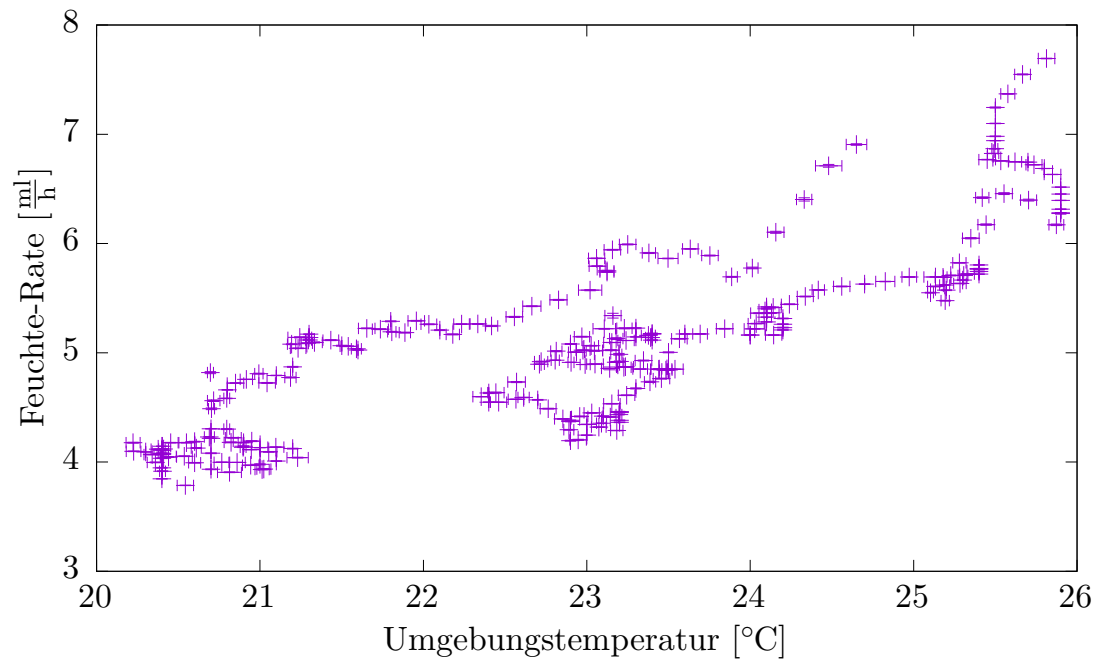


Abbildung 3.41: Aufgetragen ist die Feuchte-Rate auf die Umgebungstemperatur. Die Werte stammen aus dem Zeitraum zwischen 880 h und 1200 h und sind stundenweise gemittelt.

In Abb. 3.41 ist, wie schon in Abb. 3.36 eine deutliche, konstruktive Temperaturabhängigkeit der Rate zu erkennen. Das abgedeckte Temperaturintervall ist dabei so groß, dass eine Unabhängigkeit der Kammerfeuchte von der Temperatur praktisch auszuschließen ist. Dieses Ergebnis ist, wie schon zuvor festgestellt, theoriekonform.

3.2.6 Druckdifferenz

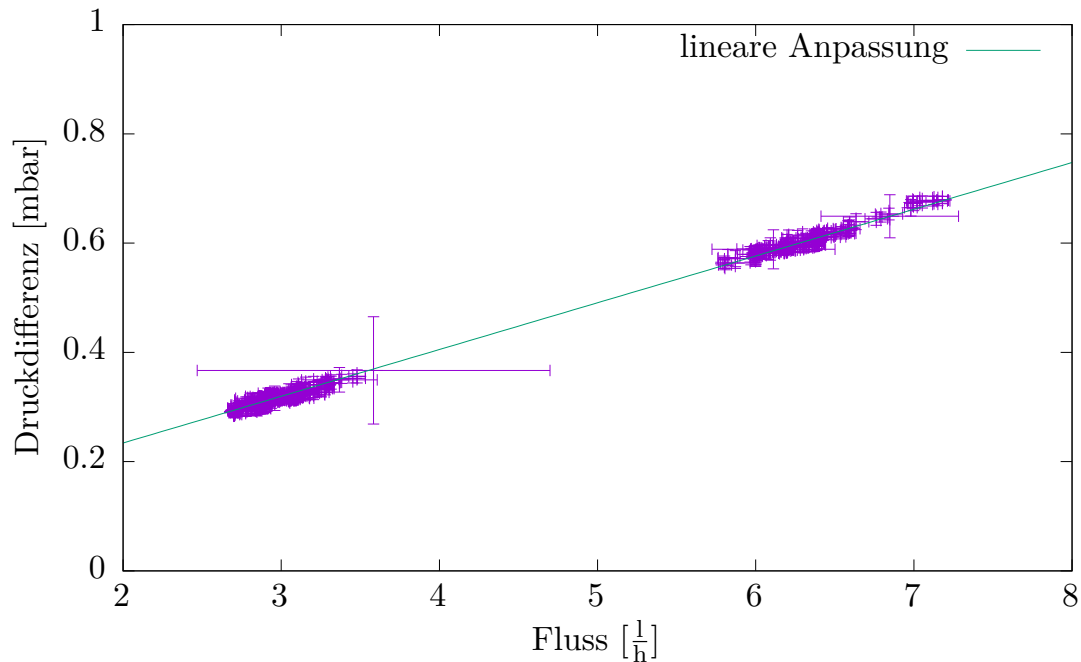


Abbildung 3.42: Zu sehen ist die Druckdifferenz zwischen Außen- und Innendruck. Die Werte sind über jeweils eine Stunde gemittelt und stammen aus der Messzeit unter der gespülten Haube vor dem Austausch der Flasche. Angepasst ist eine lineare Funktion.

Wie aus Abb. 3.42 hervorgeht, hängt der Differenzialdruck vom Fluss ab. Dieses Ergebnis ist schon in Abb. 3.10 festgehalten. Jedoch ist eine wichtige Erkenntnis, dass die Druckdifferenz zumindest für die hier betrachteten Flüsse linear verläuft.

Die in Abb. 3.42 angepasste Funktion ist eine Gerade. Die Anpassung erfolgt nach dem Modell

$$f(x) = a \cdot x + b$$

Die Anpassungsparameter ergeben sich zu

$$a = 0,0856 \pm 0,0002$$

$$b = 0,0629 \pm 0,0007$$

Weiterhin gilt es zu beachten, dass die systematischen Unsicherheiten in Abb. 3.42 nicht eingezeichnet sind.

Zusammenfassung

Ergibt sich der Großteil des Feuchteintrags des Gassystems tatsächlich aus der Durchlässigkeit des Kapton-Eintrittsfensters, wofür vor allem die oft beobachtbare Umgebungsfeuchtenabhängigkeit auf kurzen Zeitintervallen spricht, so folgt für den Gesamteintrag in das Gassystem nach Gleichungen (1.1) und (1.2) ein Wert von $(31,59 \pm 13,31) \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ in die äußeren beziehungsweise $(22,14 \pm 9,33) \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ in die zentralen Gasversorgungslinien. Dabei wird von einer Temperatur von $(20,5 \pm 0,3) ^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte von $(35,8 \pm 2,0) \%$ ausgegangen. Diesen Feuchteintrag müssten die Purifier aus dem Gassystem entfernen, wenn keine Maßnahmen zur Reduktion der Feuchte in den Kammern ergriffen werden.

Ob der Feuchteintrag und insbesondere die starke Umgebungsfeuchtenabhängigkeit durch das Kaptonfenster verursacht wird, wird nach dieser Arbeit in einer Messung überprüft, bei der nur die Atmosphäre vor jenem modifiziert wird.

Die Feuchte-Rate ist stark von der umgebenden Feuchte abhängig, wie aus den beschriebenen Untersuchungen hervorgeht. Auch lässt sich eine steigende Feuchte-Rate mit zunehmender Temperatur beobachten. Insbesondere in Abschnitt 3.2.4 und Abschnitt 3.2.5 ist dieser Zusammenhang deutlich zu erkennen. Weiterhin kann aus Abschnitt 3.2.6 geschlossen werden, dass die Druckdifferenz zwischen Außen- und Innendruck linear mit dem Fluss ansteigt.

Wäre der zuletzt in dieser Arbeit festgestellte Wert der Feuchte-Rate, der der Rate im Gleichgewicht, so müsste ein Fluss von $(110,72 \pm 46,66) \frac{1}{\text{h}}$ für die inneren beziehungsweise $(157,95 \pm 66,57) \frac{1}{\text{h}}$ für die äußeren Gas-Linien realisiert werden, um die Feuchtekonzentration unter den als Obergrenze festgelegten Wert von 200 ppmV zu halten. Es ist allerdings ein weiterer leichter Rückgang der Feuchte-Rate zu erwarten, da es sich um einen exponentiellen Abfall handelt. Eine Extrapolation des Gleichgewichtswerts ist aufgrund großer Änderungen der Umgebungsvariablen im Verlauf des Versuchs nicht möglich, da jene die Feuchte-Rate in einem nicht quantifiziertem Maß beeinflussen.

Diese Flüsse hätten bei der aktuellen Kammergeometrie eine Druckdifferenz von etwa 13 mbar für die äußeren beziehungsweise 9,54 mbar für die inneren Gasversorgungslinien zur Folge. Allerdings wird gerade daran gearbeitet, konstruktiv den Flusswiderstand von Ein- und Auslass der Kammer zu verringern, sodass dieser Wert für den späteren Detektor nicht aussagekräftig ist. Trotzdem ist er erwähnt, da er einen Eindruck von der Größenordnung des Problems gibt.

Eine weitere Möglichkeit, die Feuchtekonzentration in den Kammern zu reduzieren, ist eine Vergrößerung der Dicke der Aluminiumbeschichtung am Eintrittsfenster. Eine Vergrößerung der Schichtdicke hätte allerdings negativen Einfluss auf das Material-Budget des Detektors. Zudem könnten TR-Photonen in der Schicht wechselwirken, was ebenfalls einen negativen Effekt auf den Detektor darstellt.

Durch Reduktion der umgebenden Feuchte ist ebenfalls eine Reduktion der Feuchte im Gassystem zu erwarten. Auch durch Senkung der Temperatur wäre eine Reduktion der Feuchte möglich. Diese Reduktionen könnten durch entsprechende Einstellungen an der Klimaanlage realisiert werden. Ihr Einfluss auf die Hochspannungsleitungen an den Kammern und die Kühlleistung und Wärmeabfuhr von elektrischen Bauteilen ist dabei aber mutmaßlich auch ein Faktor, der nicht außer Betracht gelassen werden darf.

Literaturverzeichnis

- [1] Internetseite der GSI: <https://www.gsi.de/forschungbeschleuniger/fair.htm>
Informationen zu FAIR von der GSI, abgerufen 16:53 Uhr, 20. September 2018
- [2] The TRD Working Group: *The Transition Radiation Detector of the CBM Experiment at FAIR*.
Technical Design Report CBM. In Veröffentlichung
- [3] JCGM: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)
<http://www.iso.org/sites/JCGM/GUM/JCGM100/C045315e-html/C045315e.html>
27. September 2018
- [4] Jochen Schnapka: *Doppelspurenerkennung unter Verwendung der Kathodenauslese am ZEUS-Übergangsstrahlungsdetektor*.
Diplomarbeit, Universität Bonn, Juli 1998
- [5] GE Measurement & Control Solutions: *Moisture Monitor Series 35 Single-Channel Hygrometer*.
Gebrauchsanweisung für den GE M35 Feuchtesensor. März 2011
- [6] PeakTech Prüf- und Messtechnik: *Datalogger: Temperature & Humidity 5185 DC-Voltage 5186 K-Type Temperature 5187 Bedienungsanleitung/Operation Manual*.
Bedienungsanleitung für den Peaktech 5185 Datenlogger. Dezember 2017
- [7] Katharina Maria Adamow: *Einfluss von Wasser auf die Kohlenstofffaser/Epoxid-Polymermatrix Wechselwirkung*.
Dissertation, Universität Bremen. Januar 2014
- [8] Max Wutz; Karl Jousten (Hrsg.): *Wutz Handbuch Vakuumtechnik Band I*
Achte Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2004
- [9] Aalborg Instruments & Controls: *Operating Manual GFM Mass Flow Meters*
Bedienungsanleitung für Aalborg Massen-Flussmessgeräte. Februar 2018
- [10] H. Domininghaus, P. Elsner (Hrsg.), P. Eyerer (Hrsg.), T. Hirth (Hrsg.):
Domininghaus – Kunststoffe
Eigenschaften und Anwendungen von Kunststoffen. Siebte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- [11] M. Wutz, H. Adam, W. Walcher: *Handbuch Vakuumtechnik*
Theorie und Praxis der Vakuumtechnik. Sechste Auflage, Vieweg, Braunschweig, 1997

- [12] DupontTM: *DupontTM Kapton® Summary of Properties*
Eigenschaften von Kapton, 2017
- [13] L. Murray: *The Impact of Foil Pinholes and Flex Cracks on the Moisture and Oxygen Barrier of Flexible Packaging*
Alcan Packaging, Neenah Technical Center, 2006

Anhang

Danksagungen

Ich bedanke mich bei Professor Anton Andronic und Privatdozent Christian Klein-Bösing für die Betreuung meiner Arbeit. In diesem Zusammenhang sind auch Philipp Kähler und Martin Kohn zu nennen, die mir bei etlichen Gelegenheiten mit Rat und Tat beigestanden haben. Bedanken möchte ich mich auch bei Felix Fidorra für oft unermüdlich geleistete Hilfe und das Vermitteln der Grundlagen.

Zuletzt möchte ich den Menschen aus meinem privaten Umfeld danken, die mich zu jeder Zeit auf jede ihnen mögliche Weise unterstützt haben. Dazu zählt allen voran meine Familie, insbesondere meine Eltern und mein Bruder, der Panda. Auch meiner Freundin Caro bin ich für oft geleistete moralische Unterstützung großen Dank schuldig. Ähnliches gilt für meine Freunde aus dem Studium, deren Hilfsbereitschaft und Gesellschaft ich seit dem Anfang meiner physikalischen Laufbahn genieße und schätze.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über den Feuchteeintrag ins Gassystem des CBM-TRDs selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

Münster, den 29. September 2018

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

Münster, den 29. September 2018