

Bachelorarbeit

**Taupunktmessungen an
Übergangsstrahlungsdetektoren des
ALICE-Experimentes**

Dew Point Measurement for Transition Radiation Detectors of ALICE

Patrik Herud

März 2015

**Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Institut für Kernphysik**

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Einleitung | 5 |
| 2 Das ALICE-Experiment | 7 |
| 2.1 Transition-Radiation-Detektor | 8 |
| 2.1.1 Übergangstrahlung | 8 |
| 2.1.2 Aufbau einer Kammer | 8 |
| 2.2 Quark-Gluon-Plasma | 10 |
| 3 Chilled Mirror Hygrometer | 11 |
| 3.1 Optical-Chilled-Mirror Methode | 11 |
| 3.1.1 Automatic-Balance-Cycle | 12 |
| 3.2 Anzeige | 12 |
| 3.3 Arbeitsprozesse | 13 |
| 3.4 Messgrößen | 13 |
| 3.5 Sensoren | 13 |
| 4 Physikalische Grundlagen | 15 |
| 4.1 Ideales Gas-Dampf-Gemisch | 15 |
| 4.1.1 Sättigung und Dampfdruckkurve | 16 |
| 4.1.2 Magnus-Formel | 17 |
| 4.2 Berechnung der relativen Feuchtigkeit | 17 |
| 4.2.1 Berechnung der absoluten Feuchtigkeit | 18 |
| 5 Kalibrierung des Temperatur- und Feuchtigkeitssensor | 20 |
| 6 Messungen mit dem Hygrometer | 22 |
| 6.1 Notwendigkeit des ABC's und optimale Länge des Intervalls | 22 |
| 6.1.1 Ein Stunden Intervall | 23 |
| 6.1.2 Zwei Stunden Intervall | 25 |
| 6.1.3 Vier Stunden Intervall | 28 |
| 6.1.4 Sechs Stunden Intervall | 30 |
| 6.1.5 Zusammenfassung der Intervallmessungen | 31 |
| 6.2 Messungen am Supermodul | 32 |
| 6.3 Messung einer Kammer eines Moduls | 36 |
| 6.3.1 Durchspülen der Kammer mit reinem Gas | 36 |
| 6.3.2 Messung mit einem Fluss von 0,14 : 15 | 37 |
| 6.3.3 Messung mit einem Fluss von 0,28 : 10 | 38 |
| 6.3.4 Messung mit einem Fluss von 0,42 : 10 | 39 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6.3.5 | Messung mit einem Fluss von $0,84 : 10$ | 40 |
| 6.3.6 | Messung mit einem Fluss von $1,4 : 10$ | 41 |
| 7 | Diskussion der Messergebnisse | 45 |
| 8 | Anhang | 47 |
| 9 | Literaturverzeichnis | 48 |

1 Einleitung

Als Taupunkt T_D wird die Temperatur definiert, bei der die relative Feuchtigkeit eines Gases 100 % ist [DWd14]. Somit ist das Gas mit Wasserdampf gesättigt. Wenn ein Gasgemisch bei gleich bleibendem Druck diese Temperatur unterschreitet, beginnt Wasser aus dem Gas an Oberflächen zu kondensieren. Der Taupunkt ist abhängig von der relativen Feuchtigkeit des Gases, ist mehr Wasserdampf im Gas eingeschlossen, dann ist der Taupunkt höher.

Der Taupunkt spielt bei verschiedenen alltäglichen Phänomenen eine wichtige Rolle. Nebel und Tau werden gebildet, weil Luft mit hoher relativer Feuchtigkeit auf den abgekühlten Boden trifft, dabei kondensiert der Wasserdampf in der Luft. Nach dem Duschen bei höheren Temperaturen kondensiert Wasser an Oberflächen, wie z.B. Spiegeln, da diese eine deutlich niedrigere Temperatur haben und sich durch das warme Wasser die relative Feuchtigkeit in der Luft erhöht hat. In der Meteorologie wird der Taupunkt als Maß für Schwüle empfunden. Wenn der Taupunkt der Luft 16 °C übersteigt spricht man von schwüler Luft [Men13]. Der Taupunkt ist ebenso für die Bildung und Auflösung von Wolken verantwortlich. Mit Wasserdampf angereicherte Luft wird an der Erdoberfläche erwärmt und steigt nach oben auf. Die Luft kühlt sich auf dem Weg nach oben ab, die absolute Feuchtigkeit bleibt aber gleich. Ab einer gewissen Höhe beginnt der Wasserdampf an Kondensationskeimen in der Luft zu kondensieren, dadurch bilden sich Wolken [For08]. Auch Luftentfeuchter funktionieren durch das Ausnutzen des Taupunktes, Luft wird innerhalb des Entfeuchters unter den Taupunkt gekühlt, dadurch kondensiert der Wasserdampf in dieser. Das gewonnene Wasser wird weg geleitet und die herausströmende Luft wird in den Raum geleitet, je nach Luftentfeuchter wird die Luft im Raum zusätzlich noch erwärmt um die relative Feuchtigkeit weiter zu verringern [LuR12]. Dieses Prinzip ist wichtig um Schimmel vorzubeugen, welcher ab einer relativen Feuchtigkeit von 70 % entstehen kann.

Auch in der Physik ist der Taupunkt für unterschiedliche Versuche wichtig. Die Driftgeschwindigkeit von verschiedenen Teilchen in Gasdetektoren ist unter anderem abhängig von der absoluten Feuchtigkeit der Gase in den Detektoren. Außerdem wurden bei hohen Luftfeuchtigkeiten bei Hochspannungstests an Übergangsstrahlungsdetektoren des ALICE, welche in Münster in Supermodule verbaut werden, Stromflüsse an den Anoden festgestellt. Dieses Phänomen soll anhand von verschiedenen Messungen detaillierter untersucht werden.

Für die Messungen des Taupunktes wird ein Hygrometer von der Firma Edgetech genutzt, welcher mit Hilfe der OCM-Methode (Optical Chilled Mirror) den Taupunkt ermittelt. Gleichzeitig wird die Temperatur in der Luft gemessen um zusammenhängende Aussagen über den Taupunkt und die Umgebungstemperatur zu treffen. Für diese Messungen wird ein Feuchte- und Temperaturfühler verwendet. Zunächst wurde anhand von verschiedenen Gasen und verschiedenen Einstellungen am Dewmaster der ABC (Automatic Balance Cycle) untersucht, um die beste Einstellungsmöglichkeit für das Gerät zu finden. Danach wurde eine Kammer des TRD mit Gas befüllt und angeschlossen um mit Hilfe der Messungen herauszufinden, wie die Feuchtigkeit und der Taupunkt des Gases die Hochspannung beeinflussen und ab welcher Feuchtigkeit erstmals Ströme messbar sind.

2 Das ALICE-Experiment

Das ALICE-Experiment[ALI12], welches am LHC (Large Hadron Colider) am CERN durchgeführt wird, dient zur Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas, ein Zustand, in dem sich das Universum in den ersten Sekundenbruchteilen $t < 10^{-6}$ s nach dem Urknall befand. In diesem Zustand hatte das Universum eine hohe Dichte zwischen $1,3 \cdot 10^{15} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und $2,5 \cdot 10^{15} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und Temperatur $T > 10^{12}$ K [Spe14], diese sollen am LHC durch Kollision von Blei-Kernen erreicht werden. Um das Experiment durchführen zu können arbeiten rund 1550 Physiker und Studierende von 151 Instituten aus 37 Ländern der Welt (stand: November 2014) daran. Im speziellen befasst sich diese Arbeit mit Versuchen an dem Transition Radiation Detector (TRD), der im ALICE Detektor hauptsächlich zur Separation von Elektronen und Pionen genutzt wird. Der zentrale Aufbau des ALICE Experiments ist jeweils 16 m hoch und breit, hat eine Länge von 26 m und wiegt ungefähr 10000 t. Die Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Aufbau des Detektorsystems mit den unterschiedlichen einzelnen Detektoren.

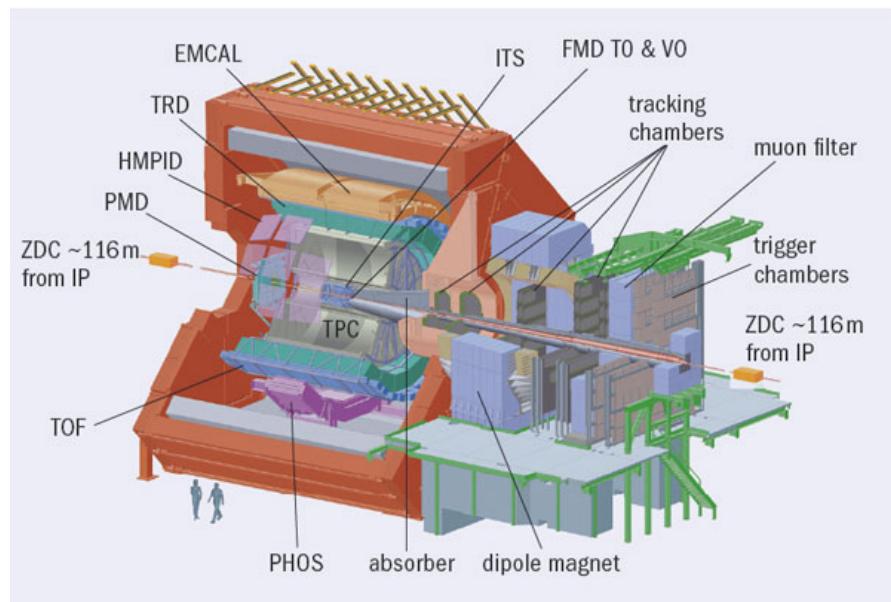


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des ALICE-Detektorsystems [CeC08].

Der ALICE Detektor besteht aus verschiedenen Detektoren, welche unterschiedliche Funktionen durchführen. Im Folgenden wird nur der TRD behandelt, da an diesem die Versuche durchgeführt wurden.

2.1 Transition-Radiation-Detektor

Der TRD [TDR10] besteht aus 18 Supermodulen, welche aus jeweils sechs Lagen von fünf Kammern bestehen. Diese Supermodule werden ringförmig um den Kollisionspunkt angeordnet um den gesamten Azimutalwinkel der Kollision zu erfassen. Anhand der Aussendung von Übergangsstrahlung lassen sich durch den TRD Elektronen und Pionen separieren.

2.1.1 Übergangsstrahlung

Die Separation von Elektronen und Pionen gelingt im TRD durch Übergangsstrahlung [Jac02]. Diese Übergangsstrahlung entsteht, wenn geladene, relativistische Teilchen mit konstanter Geschwindigkeit eine Grenzschicht passieren, die zwei Medien mit unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen ϵ voneinander trennt. Die Intensität der Übergangsstrahlung ist dabei für eine Grenzschicht proportional abhängig vom Lorentzfaktor $\gamma = \sqrt{1 + \left(\frac{p}{m \cdot c}\right)^2}$. Die Massenverhältnisse ($\frac{m_\pi}{m_e} \approx 280$) von Elektronen und Pionen fallen stärker ins Gewicht, als Impulsunterschiede der Teilchen bei einer pp- oder PbPb-Kollision. Daher hat ein Elektron üblicherweise einen deutlich größeren Lorentzfaktor als ein Pion und erzeugt mehr Übergangsstrahlung im Radiatormaterial des Detektors. Die Emissionswahrscheinlichkeit von Photonen ist bei einer Grenzschicht allerdings sehr gering ($\alpha \approx \frac{1}{137}$), daher werden beim TRD mehrere Grenzschichten durch Fasermatten und Schaumstoff gebildet. Dieses Gebilde wird als Radiator bezeichnet.

2.1.2 Aufbau einer Kammer

Bei den verwendeten Kammern handelt es sich um Vieldrahtproportionalkammern [TDR10]. Die Kammern sind so aufgebaut, dass der Radiator den Boden bildet, mit einer Dicke von 48 mm. Hinter dem Radiator beginnt die Driftkammer mit einer Länge von 37 mm (vgl. Abb. 2.2). Diese Kammer ist mit einem Xenon-, Kohlenstoffdioxid-Gemisch gefüllt (Xe 85%, CO_2 15%), wobei das Xenon als Detektorgas und das Kohlenstoffdioxid als Löschgas genutzt wird. Direkt auf dem Radiator liegt die Driftelektrode. Diese hat ein negatives Potenzial von $U_d = -2,1$ kV. 7 mm unter dem Deckel der Kammer sind Kathodendrähte eingespannt. Die Kathodendrähte sind auf geerdetem Potenzial. Hinter den Kathodendrähten beginnt die Verstärkungszone, in der geladene Teilchen weiter zu Anodendrähten hin beschleunigt werden. Die Anodenspannung beträgt im laufenden Betrieb $U_a = 1,5$ kV. Die Kammer nach oben abschließend befinden sich noch weitere Kathodenpads, die erneut geerdet sind (vgl. Abb. 2.3). Die einfallenden Teilchen ionisieren auf dem Weg durch den Detektor einige Xenon Atome. Die Ionen driften zur Driftelektrode, die Elektronen Richtung Kathodendrähte. Hinter den Kathodendrähten beginnt der Verstärkungsbereich. Hier werden weitere Elektronen-Ionen-Paare erzeugt. Die Elektronen driften zu den Anodendrähten, die Ionen weiter zu den Kathodenpads. Auf diesem Weg erzeugen die Elektronen Entladungslawinen. Die hierbei erzeugten Elektronen werden zu den Kathodenpads beschleunigt. Auch hierbei werden Entladungslawinen erzeugt und

das Signal was an der Kathode ankommt wird verstrt. Die bergangsphotonen können ebenso die Atome ionisieren und somit weitere Ladungslawinen auslösen. Dadurch entsteht im Mittelwert der Messungen ein zusätzlicher Signalbeitrag, der den Photonen zugeordnet werden kann. Den Abschluss der Kammer bildet eine 20 mm dicke Karbon Platte, auf welcher die Elektronik zum Auslesen der Kammer befestigt ist. In den durchgeführten Versuchen wurde die Driftspannung auf $U_d = -2,2 \text{ kV}$ und die Anodenspannung auf $U_a = 1,5 \text{ kV}$ eingestellt. Außerdem wurde statt Xenon Argon als Detektorgas verwendet, da Argon ähnliche Eigenschaften besitzt wie Xenon, jedoch wesentlich günstiger ist. Das Verhältnis der Gase wurde auf Ar 82 % und CO_2 18 % eingestellt.

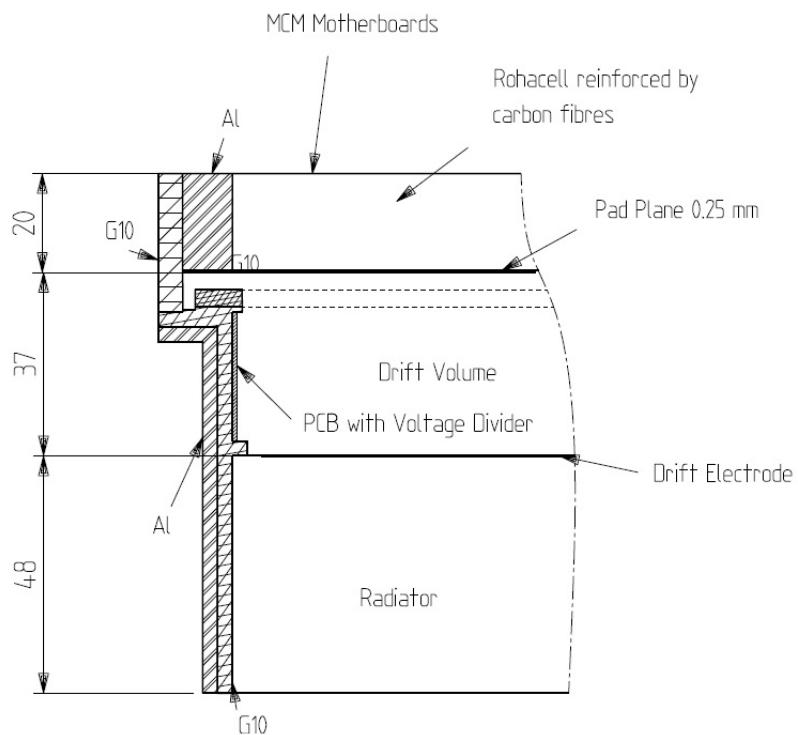


Abbildung 2.2: Mechanischer Aufbau der Kammer mit Grbenangaben[TDR10].

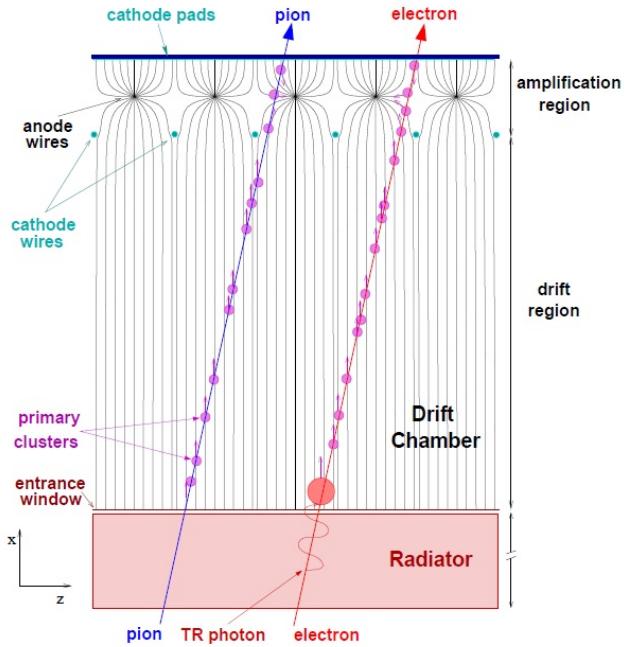


Abbildung 2.3: Physikalischer Aufbau der Driftkammer[IOP08].

2.2 Quark-Gluon-Plasma

Ein Quark-Gluonen-Plasma beschreibt einen Zustand, in dem sich die Quarks und Gluonen eines Systems in einem ungebundenen Zustand befinden. In diesem Zustand befand sich das Universum unmittelbar nach dem Urknall ($t < 10^{-6}$ s). Dieser Zustand war nur möglich, da die gesamte Materie- und Energie des Universums konzentriert war und somit eine hohe Dichte (zwischen $1,3 \cdot 10^{15} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und $2,5 \cdot 10^{15} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) hatte, was wiederum eine hohe Temperatur $T > 10^{12}$ K bedeutet [Spe14]. Nur durch diese hohe Dichte und Energiedichte ist es möglich, dass sich die Gluonen und Quarks in einem quasi-freien Zustand befinden. Durch die Ausdehnung des Universums blieb dieser Zustand nur kurz erhalten, da die Dichte und Temperatur sehr schnell abgefallen ist. Um diese Voraussetzungen auf der Erde zu erfüllen benötigt man große Teilchenbeschleuniger, wie z.B. den LHC. Im LHC werden Kollisionen von Blei-Kernen durchgeführt. Diese eignen sich besonders gut, da Blei die schwersten stabilen Isotope hat ($N = 208$). Die Blei-Kerne werden in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, durch die Kollision der Kerne werden somit hohe Materie- und Energiedichten erreicht, genügend, damit Quarks und Gluonen entkoppeln und für kurze Zeit ein Quark-Gluonen-Plasma bilden. Durch Ausdehnung und Abkühlung aufgrund des Drucks innerhalb des Plasmas gehen die Quarks und Gluonen wieder in das Confinement über, d.h. sie sind wieder in Nukleonen gebunden.

3 Chilled Mirror Hygrometer

Das im Versuch verwendete Hygrometer ist der Dewmaster von der Firma Edgetech [Edg1], welches mit Hilfe eines Optical-Chilled-Mirror Dew Point Sensors den Taupunkt von verschiedenen Gasen bestimmen kann. Durch weitere Messung des Drucks und der Temperatur ist es möglich verschiedene Größen zu bestimmen, die von diesen drei Grundgrößen abhängen. In diesem Versuch ist an das Hygrometer lediglich ein Taupunktsensor angeschlossen. Für weitere Messungen wurde zusätzlich die Temperatur über ein externes Thermometer aufgenommen und somit aus Temperatur und Taupunkt die relative Feuchtigkeit bestimmt.

3.1 Optical-Chilled-Mirror Methode

Bei dieser Messung wird eine LED auf einen Spiegel ausgerichtet. Der reflektierte Strahl wird hinter dem Spiegel auf einen Photodetektor gelenkt und dort detektiert. Der Spiegel ist direkt mit einem Peltier-Element verbunden, sodass die Temperatur des Spiegels verändert werden kann. Strömt nun ein Gas an dem Spiegel vorbei wird dieser so lange gekühlt, bis sich Tautropfen auf der Spiegeloberfläche ansammeln. Durch die Tropfen wird der Strahl der LED gebrochen und trifft nicht mit der vollen Intensität auf die Photodiode. Die Temperatur, die der Spiegel nun besitzt ist die Tautemperatur des Gases.

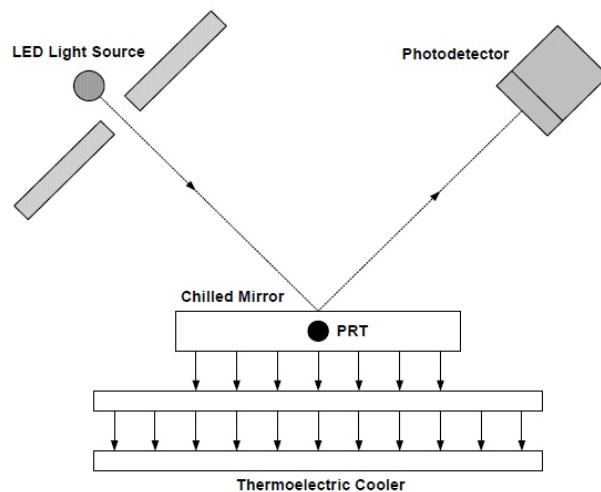


Abbildung 3.1: Optical-Chilled-Mirror Methode schematisch dargestellt [Edg1].

3.1.1 Automatic-Balance-Cycle

Wenn der Dewmaster über einen längeren Zeitraum benutzt wird kann sich Staub oder ähnliches auf der Spiegeloberfläche ansammeln. Dadurch kann es Fehler in der Taupunktmessung geben, da das Licht der LED auch an Störpartikeln gebrochen werden kann. Um dies zu verhindern gibt es im Dewmaster eine Funktion, welche den Spiegel so lange erwärmt, bis das Licht wieder ungebrochen zu sehen ist. Diese Funktion heißt Automatic-Balance-Cycle (ABC). Dabei kann eine Startzeit und ein Intervall zur Wiederholung eingestellt werden. Im ersten Versuchsabschnitt wird die Notwendigkeit und die optimale Dauer für das Erwärmen untersucht. Dazu wurden verschiedene Intervalle eingestellt und deren Einfluss auf die Messung des Taupunktes untersucht. Mit der ABC-Hold Funktion lassen sich die gemessenen Werte während eines ABC-Prozesses ignorieren, erst wenn der Dewmaster beginnt den Taupunkt erneut zu suchen werden wieder Werte übermittelt.

3.2 Anzeige

Die Anzeige des Dewmasters hat verschiedene Möglichkeiten der Einstellung. Zunächst kann im oberen Bereich das aktuelle Datum und die Uhrzeit eingestellt werden (1). Rechts daneben ist ein Platz um die verschiedenen Arbeitsprozesse des Dewmasters anzuzeigen (2). Die Arbeitsprozesse sind folgende: MAX HEAT, MAX COOL, ABC:HEAT, ABC:STABLE, SEEKING DP, SERVOLOCK und CLEAN MIRROR. Die verschiedenen Arbeitsprozesse werden in Abschnitt 3.3 diskutiert. Im mittleren Bereich (3) kann aus acht verschiedenen Größen ausgewählt werden, welche drei angezeigt werden können. Die acht Größen sind der Taupunkt (DP), die Umgebungstemperatur (AT), die relative Feuchtigkeit (RH), die Anzahl der Wassermoleküle (PPMv), die Kühlgrenztemperatur (WB), das Verhältnis von Wasser zu Luft (GR), der absolute Druck des Gases (PSIA) und der relative Druck des Gases im Bezug auf den Atmosphärendruck (PSIG) und werden in 3.4 diskutiert. Für die Messungen, die durchgeführt wurden ist allerdings nur DP (Taupunkt) wichtig. Der untere Abschnitt (4) des Dewmasters ist eine Leiste, welche den aktuellen Taugehalt auf der Spiegeloberfläche aufzeigt. Dabei sind die ausgefüllten Kästchen der mit Tau bedeckte Teil. Für die Messungen sollte der Tau-Anteil ungefähr zwei drittel der Leiste einnehmen.

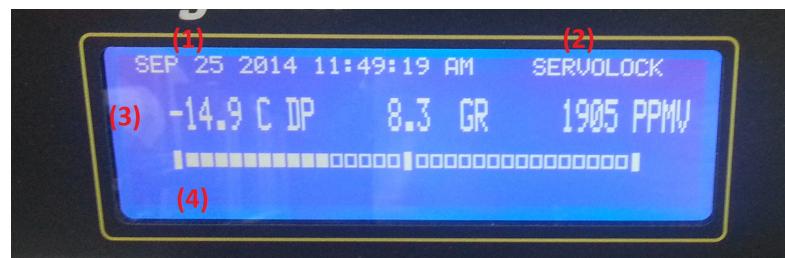


Abbildung 3.2: Anzeige des Dewmasters (1) Datumsanzeige, (2) Arbeitsprozess, (3) Messgrößen, (4) Spiegeloberfläche.

3.3 Arbeitsprozesse

Der Dewmaster kann sich in verschiedenen Arbeitsprozessen befinden, während er eingeschaltet ist. Diese Prozesse werden während der jeweiligen Durchführung angezeigt. Im Prozess MAX HEAT, bzw. MAX COOL wird der Spiegel des Sensors maximal erwärmt, bzw. maximal abgekühlt. Dieser Prozess kann nur manuell eingeschaltet werden. Der Arbeitsprozess ABC:HEAT erwärmt den Spiegel während des ABC-Prozesses (siehe Kap. 3.1.1) ist dieser Prozess abgelaufen schaltet der Dewmaster zunächst auf ABC:STABLE um. Kurz darauf schaltet der Dewmaster auf SEEKING DP und beginnt damit den Taupunkt zu suchen. Wenn der Dewmaster den Taupunkt gefunden hat schaltet er auf SERVOLOCK um. Nun kann eine Messung durchgeführt werden. Die letzte Anzeigemöglichkeit ist CLEAN MIRROR., dadurch zeigt der Dewmaster an, dass eine manuelle Säuberung des Spiegels nötig ist.

3.4 Messgrößen

Der Dewmaster kann verschiedene Messgrößen ermitteln und anzeigen. Die Größe DP ist der Taupunkt, dieser wird vom Dewmaster mit Hilfe der externen Sensoren ermittelt und kann direkt angezeigt werden. Die Größe AT ist die Umgebungstemperatur. Die Temperatur kann nur angezeigt werden, wenn ein entsprechendes Modul am Dewmaster angebracht ist. Mit Hilfe der Temperatur und dem Taupunkt lässt sich die relative Luftfeuchtigkeit bestimmen RH. Die Größe PPMv ist die Anzahl der Wassermoleküle auf eine Millionen Moleküle. Diese Größe hängt von der relativen Feuchtigkeit ab. Die WB ist die Kühlgrenztemperatur, diese Temperatur ist die tiefste Temperatur, welche durch Verdunstungskühlung erreicht werden kann. Die Kühlgrenztemperatur hängt von der relativen Feuchtigkeit ab. GR ist das Verhältnis von Wasser zu Luft in den Maßeinheiten Grains/lb. Dieses Verhältnis kann ebenfalls aus der relativen Feuchtigkeit bestimmt werden. Die Größen PSIA und PSIG sind jeweils verschiedene Angaben für den Druck, den das Gas hat. PSIA ist dabei der absolute Druck des Gases in [lb/inch²] (pounds-force per square inch) und PSIG ist der Druck relativ zum Druck der Atmosphäre. Wie bereits erwähnt ist für die durchgeführte Messung nur der Taupunkt (DP) wichtig bzw. messbar, da alle weiteren Größen von der Temperatur oder dem Druck abhängen, was von dem Gerät nicht direkt gemessen werden kann, da die verschiedenen Sensoren für dieses Gerät nicht vorhanden waren.

3.5 Sensoren

Der Dewmaster kann mit drei verschiedenen Arten von Sensoren für die Taupunkt-messung ausgestattet werden. Die Sensoren unterscheiden sich nur in den vorgesehenen Temperaturbereichen. Der Messbereich des S1 Sensors beginnt bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, des S2 Sensors bei $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und der des S3-Sensors bei $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Messbereiche enden alle bei $95\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Sensoren haben einen festen Kühlmantel und können noch separat gekühlt werden um bessere Ergebnisse bei niedrigen Temperaturen zu erhalten. Der verwendete Sensor in

diesem Versuch ist der S3-Sensor mit zusätzlicher Außenkühlung.



Abbildung 3.3: S3-Sensor mit zusätzlicher Kühlung über zwei Ventilatoren.

4 Physikalische Grundlagen

4.1 Ideales Gas-Dampf-Gemisch

In diesem Versuch werden verschiedene Gas-Dampf-Gemische verwendet. Als Gas-Dampf-Gemisch versteht man Mischungen von mindestens zwei Gasen mit unterschiedlichen Tautemperaturen, sodass eines der Gase kondensieren kann, während das andere unverändert besteht [CeH99]. Das kondensierbare Gas (in den meisten Fällen Wasserdampf) wird dabei als Dampf bezeichnet, während das andere Gas (in diesem Fall CO_2 oder CO_2 -Ar-Gemische) als Gas bezeichnet wird und im folgenden als ideales Gas behandelt wird.

Um ein Gas-Dampf-Gemisch zu beschreiben betrachtet man zunächst die vorkommenden Drücke. Der Druck des Gemisches p setzt sich zusammen aus der Summe der Partialdrücke p_k der unterschiedlichen Komponenten k :

$$p = \sum_{i=1}^k p_i. \quad (4.1)$$

Betrachtet man zunächst alle Komponenten als ideale Gase, so lässt sich unter einsetzen der idealen Gasgleichung 4.2:

$$pV = \frac{m}{M}RT = mR_sT, \quad (4.2)$$

in die Gleichung 4.1 ein Zusammenhang zwischen dem Druck p und der Temperatur T des Gases herstellen. Dabei ist R die universelle Gaskonstante, $R_{s,k} = \frac{R}{M_k}$ die spezifische Gaskonstante für die einzelnen Komponenten k , m_k die Masse der Komponenten und V das Volumen. Daraus ergibt sich:

$$p = \sum_{i=1}^k m_i \frac{R_{s,i}}{V} T. \quad (4.3)$$

Für ein Gas-Dampf-Gemisch, welches aus zwei Komponenten (CO_2 und H_2O) besteht wird der Druck des Gemisches demnach beschrieben durch

$$p = p_{CO_2} + p_{H_2O} = m_{CO_2} \frac{R_{CO_2}}{V} T + m_{H_2O} \frac{R_{H_2O}}{V} T \quad (4.4)$$

4.1.1 Sättigung und Dampfdruckkurve

Entscheidend für die Eigenschaften eines Gas-Dampf-Gemisches ist der Taupunkt des Dampfes. An diesem Punkt ist das Gas-Dampf-Gemisch mit Dampf gesättigt. Um diesen Sättigungszustand zu erreichen gibt es zwei Möglichkeiten, zum einen besteht die Möglichkeit ein ungesättigtes Gemisch isotherm mit Dampf anzureichern, also die Masse des Dampfes zu erhöhen, bis der Dampfdruck maximal wird. Die zweite Möglichkeit ist eine isobare Abkühlung des Gas-Dampf-Gemisches. Wenn also eine isotherme oder isobare die Dampfdruckkurve schneiden ($p_{H_2O} = p_{W_s}$) beginnt der Dampf in dem Gemisch zu kondensieren. Somit hat jeder Zustand eines ungesättigten Gas-Dampf-Gemisches einen spezifischen Taupunkt T_D , der vom Sättigungsdampfdruck abhängig ist. Jeder Sättigungswert wird durch die Dampfdruckkurve beschrieben, die Abhängig ist vom Sättigungsdampfdruck p_{W_s} und der Temperatur T (siehe Abb. 4.1 [Bae05]).

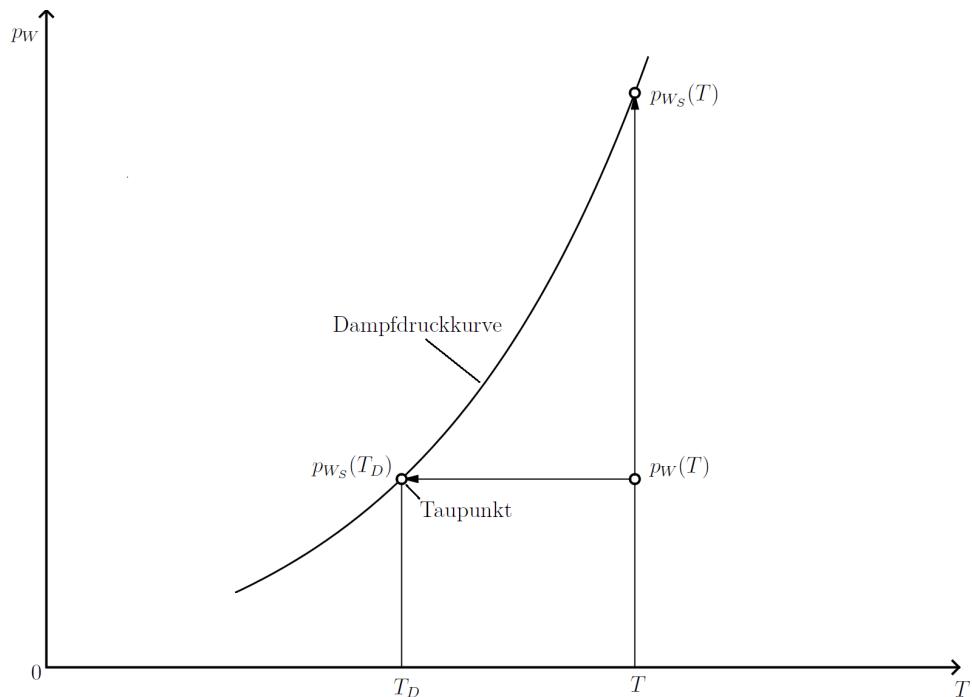


Abbildung 4.1: Dampfdruckkurve eines Gas-Dampf-Gemisches mit Taupunkt [Ham12].

Dieser Taupunkt wird demnach in der Theorie durch Sättigung eines Gas-Dampf-Gemisches erreicht und hängt vom Dampfdruck des Gemisches, und somit von der Temperatur und der Masse an Dampf, ab. Der Taupunkt ist experimentell definiert als jener Punkt, an dem der Dampf zu kondensieren beginnt, daraus ergibt sich, dass der Taupunkt immer kleiner-gleich der Umgebungstemperatur ($T_D \leq T$) ist.

4.1.2 Magnus-Formel

Der Sättigungsdampfdruck kann durch verschiedene Formeln, die alle empirisch bestimmt wurden, berechnet werden. In diesem Versuch wird lediglich die Magnus Formel [Son90] für die Auswertung benutzt, da diese im Vergleich zu anderen Formeln die geringste Messunsicherheit hat [Ham12]. Die Magnusformel hat die Form:

$$p_{W_s}(T) = K_1 \cdot \exp\left(\frac{K_2 \cdot T}{K_3 + T}\right). \quad (4.5)$$

Dabei ist p_{W_s} der Sättigungsdampfdruck und T die Temperatur. Die konstanten K_1 bis K_3 sind empirisch bestimmte konstanten mit den Werten $K_1 = 6,112 \text{ hPa}$, $K_2 = 17,62$ und $K_3 = 243,12^\circ\text{C}$ für Wasser im Temperaturbereich von $-45^\circ\text{C} \leq T \leq 60^\circ\text{C}$. Die Temperatur T ist in Celsius anzugeben.

Entscheidend für die Messungen in diesem Versuch ist nicht der Sättigungsdampfdruck, sondern die relative und absolute Feuchtigkeit eines Gas-Dampf-Gemisches in einem Gasdetektor.

4.2 Berechnung der relativen Feuchtigkeit

Die relative Feuchtigkeit ϕ eines Gas-Dampf-Gemisches ist definiert durch das Verhältnis x der Masse an Dampf m_D zur Masse an Gas m_G :

$$x = \frac{m_D}{m_G}. \quad (4.6)$$

Der Partialdruck einer Komponente eines Gemisches ist definiert durch den Druck, der Komponente bei gleicher Temperatur und Volumen des Gemisches. Geht man davon aus, das die Komponenten ideale Gase sind, so erhält man mit 4.2:

$$\frac{V}{T} = \frac{m_D R}{M_D p_D} = \frac{m_G R}{M_G p_G} \quad (4.7)$$

$$\frac{p_D}{p_G} = \frac{m_D}{m_G} \cdot \frac{M_G}{M_D}. \quad (4.8)$$

Ersetzt man mit 4.6 und $y = \frac{M_D}{M_G}$ die Verhältnisse und ersetzt man den Druck des Gases mit $p_G = p - p_D$ so erhält man nach umformen für den Dampfdruck p_D :

$$p_D = \frac{x}{y + x} \cdot p. \quad (4.9)$$

Die relative Feuchtigkeit ϕ lässt sich bestimmen aus dem Verhältnis des Dampfdrucks

p_D zum Sättigungsdampfdruck p_{W_s} :

$$\phi(T) = \frac{p_D}{p_{W_s}(T)}. \quad (4.10)$$

Am Taupunkt ist die relative Feuchtigkeit $\phi = 1$:

$$\phi(T_D) = \frac{p_D}{p_{W_s}(T_D)} = 1. \quad (4.11)$$

Dividiert man nun 4.10 durch 4.11, so ergibt sich:

$$\phi(T) = \frac{p_{W_s}(T_D)}{p_{W_s}(T)}. \quad (4.12)$$

Durch Anwendung der Magnus-Formel 4.5 für $p_{W_s}(T)$ und $p_{W_s}(T_D)$ erhält man eine Formel für die relative Feuchtigkeit, die nur von der Temperatur T und dem Taupunkt T_D abhängig ist.

$$\phi(T, T_D) = \exp \left(\frac{K_2 K_3 \cdot (T_D - T)}{(K_3 + T_D) \cdot (K_3 + T)} \right) \quad (4.13)$$

$$(4.14)$$

4.2.1 Berechnung der absoluten Feuchtigkeit

Die absolute Feuchtigkeit ρ_w in einem Gas-Dampf-Gemisch hängt von der Temperatur T und der relativen Feuchtigkeit ϕ ab. Da beim Taupunkt T_D die relative Feuchtigkeit $\phi = 1$ ist, lässt sich die absolute Feuchtigkeit auch nur durch den Taupunkt ermitteln. In beiden Fällen errechnet man die absolute Feuchtigkeit über die ideale Gasgleichung 4.2:

$$p(T_D)V = \frac{m}{M}RT_D \quad (4.15)$$

$$\frac{m}{V} = \rho_w = \frac{M}{R} \frac{p(T_D)}{T_D} \quad (4.16)$$

$$\rho_w = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{p_{W_s}}{T_D}. \quad (4.17)$$

Demnach erhält man die absolute Feuchtigkeit, wenn man die inverse Spezifische Gaskonstante $R_s = \frac{R}{M}$ mit dem Quotienten vom Sättigungsdampfdruck p_{W_s} und Taupunkt T_D multipliziert. Die inverse spezifische Gaskonstante für Wasser hat den Wert $\frac{1}{R_s} = 2,164 \frac{\text{gK}}{\text{J}} [\text{ChL1}]$. Zur Berechnung des Sättigungsdampfdruck kann die Formel 4.5 verwendet werden. Die Temperatur T_D ist die Raumtemperatur in Kelvin.

Um aus der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit die absolute Feuchtigkeit zu bestimmen kann die Formel 4.17 ebenfalls verwendet werden. Beim Taupunkt ist der Dampfdruck maximal, das liegt daran, dass die relative Feuchtigkeit hier $\phi = 1$ ist. Will man demnach die absolute Feuchtigkeit aus Temperatur und Taupunkt bestimmen lässt sich die Formel einfach umformen zu:

$$\rho_w = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{p_{W_s}}{T_D} \quad (4.18)$$

$$\rho_w = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{\phi \cdot p_{W_s(T)}}{T} \quad (4.19)$$

5 Kalibrierung des Temperatur- und Feuchtigkeitssensor

Der verwendete Temperatur und Feuchtigkeitssensor muss für die folgenden Messungen zunächst kalibriert werden. Der Sensor hat einen bestimmten Bereich, in dem er die Werte der Temperatur und Feuchtigkeit jeweils über ein Stromsignal (4 – 20 mA) und einen Analog-Digital-Wandler an einen Computer weiter gibt. Durch Auslesen der Werte kann am Computer die Temperatur und Feuchtigkeit zurückgerechnet werden, insofern die richtige Funktion eingestellt ist. Dafür wurde zunächst der Sensor installiert und neben diesem ein externes Hygrometer gestellt, um die Werte für Temperatur und Feuchtigkeit direkt ablesen zu können. Bei unterschiedlichen Temperaturen und Feuchtigkeiten wurde im Anschluss sowohl der Wert des Rechners, welcher anhand einer voreingestellten Funktion berechnet wurde, als auch der Wert des Hygrometers notiert um eine Funktion zu ermitteln, welche die Werte verknüpft. Die ermittelten Werte wurden in zwei Graphen aufgetragen und eine Ausgleichsgrade für die Punkte ermittelt (siehe Abb. 5.1, 5.2).

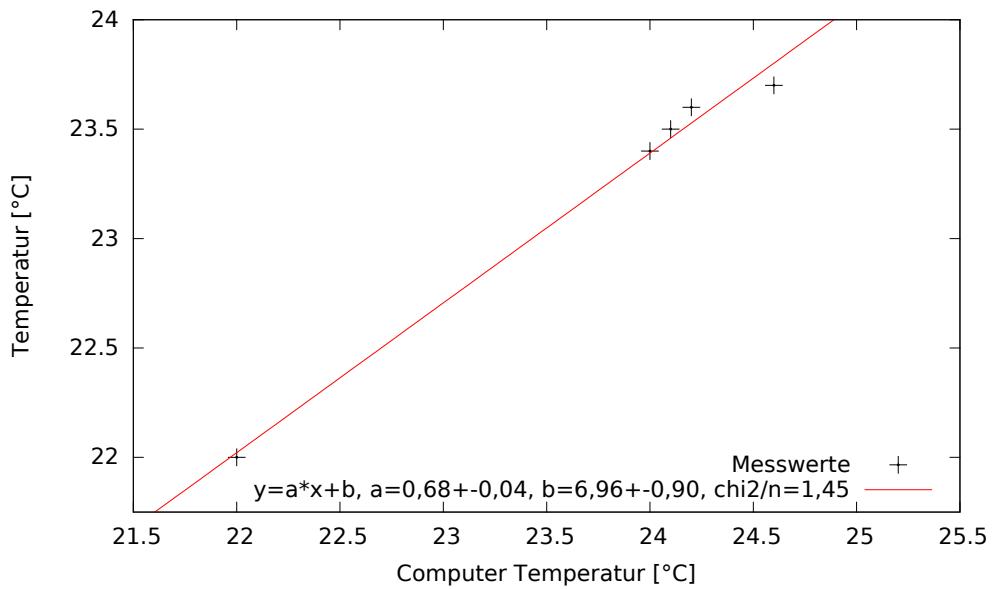


Abbildung 5.1: Temperatur am externen Hygrometer im Zusammenhang mit der Temperatur des Sensors mit einer Ausgleichsgrade zur Umrechnung der Werte. $y = a \cdot x + b$ mit $a = (0,68 \pm 0,04)$ und $b = (6,96 \pm 0,90)$ °C mit einer Genauigkeit, normiert auf die Freiheitsgrade, von $\frac{\chi^2}{n} = 1,45$.

In Abbildung 5.1 ist die Ausgleichsgrade der Temperatur dargestellt. Die Werte für die Ausgleichsgrade sind $a = (0,68 \pm 0,04)$ und $b = (6,96 \pm 0,90)^\circ\text{C}$ und wurden mit dem Programm Gnuplot mit einem least-square-fit ermittelt.

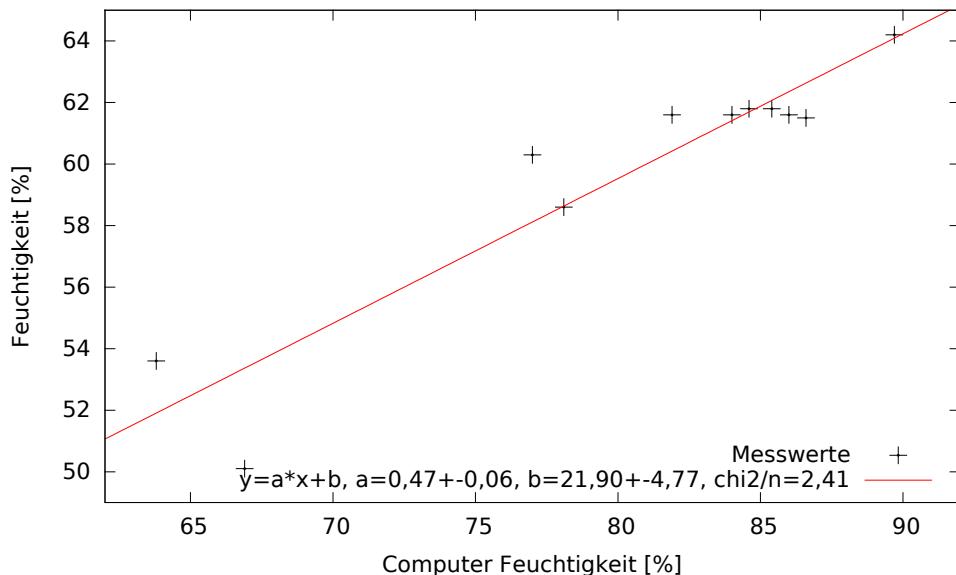


Abbildung 5.2: Feuchtigkeit am externen Hygrometer im Zusammenhang mit der Feuchtigkeit des Sensors mit einer Ausgleichsgrade zur Umrechnung der Werte. $y = a \cdot x + b$ mit $a = (0,47 \pm 0,06)$ und $b = (21,90 \pm 4,77) \%$ mit einer Genauigkeit, normiert auf die Freiheitsgrade, von $\frac{\chi^2}{n} = 2,41$.

Abbildung 5.2 zeigt die Ausgleichsgrade der Feuchtigkeit. Als Konstanten der Gerade wurden die Werte $a = (0,47 \pm 0,06)$ und $b = (21,90 \pm 4,77) \%$ mit dem Programm Gnuplot über einen least-square-fit ermittelt. Die Umrechnungsfunktion wurde mit den Werten der Ausgleichsgrade korrigiert, damit für die folgenden Messungen Temperatur und Feuchtigkeit mit Hilfe des Rechners ermittelt werden können.

6 Messungen mit dem Hygrometer

Für die Messungen werden verschiedene Gase verwendet, entweder CO_2 oder ein Gemisch aus CO_2 und Ar . Das Gas wird in den meisten Messungen zu einem Teil durch einen Bubbler geleitet, um dieses mit Feuchtigkeit anzureichern. Durch manuelle Veränderungen des Gasflusses durch den Bubbler können unterschiedliche Feuchtigkeiten erreicht werden. Die Feuchtigkeit wird in den Messungen durch Verhältnis von Gas, welches durch den Bubbler gegangen ist, zu der Gesamtmenge des Gases angegeben (z.B. $0,2 : 10$, bedeutet, das $0,2 \frac{1}{h}$ Gas durch den Bubbler geleitet, bei einem Gesamtfluss durch die Apparatur von $10 \frac{1}{h}$). Um die Flüsse zu messen wurde einmal ein Flussmeter genutzt, welches auf Kohlenstoffdioxid geeicht wurde, dieses Flussmeter wurde an den Anfang der Messung geschaltet. Damit konnte gemessen werden, wie viel Gas insgesamt in den Aufbau gelassen wurde. Die durch den Bubbler geleitete Gasmenge wird mit einem Flussmeter gemessen, welches auf Luft geeicht wurde. Demnach muss dieser Fluss noch umgerechnet werden, um den exakten Fluss zu berechnen. Dafür wurde angenommen, dass es sich bei den verwendeten Gasen um Kohlenstoffdioxid handelt. Der Umrechnungsfaktor wurde mit Hilfe der Abbildung 8.1 ermittelt und beträgt für die Messungen $u = 0,7$. Demnach wird der gemessene Fluss durch den Bubbler mit dem Umrechnungsfaktor multipliziert um den realen Fluss zu erhalten. Im folgenden sind alle Werte für die verschiedenen Durchflussraten bereits umgerechnet.

6.1 Notwendigkeit des ABC's und optimale Länge des Intervalls

Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben wurde, kann der Spiegel des Hygrometers automatisch aufgeheizt werden, um die Oberfläche zu reinigen und somit konstant gute Messungen zu erhalten. In der ersten Messreihe wurde der Einfluss dieses ABC-Zyklus auf die Messergebnisse untersucht. Insbesondere wurde überprüft, in welchen zeitlichen Intervallen das Aufheizen des Spiegels Sinn macht. Der ABC Prozess ist sinnvoll bei längeren Messungen, da sich mit der Zeit Schmutz auf dem Spiegel ablagert und somit das Licht gebrochen wird, wodurch möglicherweise ein falscher Taupunkt ermittelt wird. Daher ist es sinnvoll zu beobachten, ab welchen Zeitintervallen der ABC Prozess einen Effekt auf die Messungen hat, wenn beispielsweise der Taupunkt nach einem Zyklus unter dem vorher gemessenen Taupunkt liegt. Da bei einer Messung mit kleinen zeitlichen Intervallen Störungen durch den ABC Prozess auftreten ist es ebenfalls sinnvoll eine zeitliche Unterkante für das Intervall zu ermitteln. Diese Störungen sind zum einen weiter aufgenommene Werte kurz nach dem Prozess, beim erneuten Aufheizen des Spiegels, oder ein längeres zeitliches Intervall, bis der Taupunkt ermittelt ist.

6.1.1 Ein Stunden Intervall

Zunächst wurde eine Messung mit einem Intervall von einer Stunde für das Aufheizen gewählt. Außerdem wurde die Funktion ABC Hold deaktiviert, sodass bei den Messungen auch die Aufheizphasen gemessen wurden. Die Ergebnisse einer Messung über fünf Tage sind in Abb. 6.1 zu sehen, ein kleinerer Ausschnitt der Messung (etwa ein Tag) wird in Abb. 6.2 gezeigt. Das verwendete Gas war ein Gemisch aus 82 % Ar und 18 % CO_2 . Das Gas wurde im Verhältnis 0,14 : 10 durch den Aufbau geleitet.

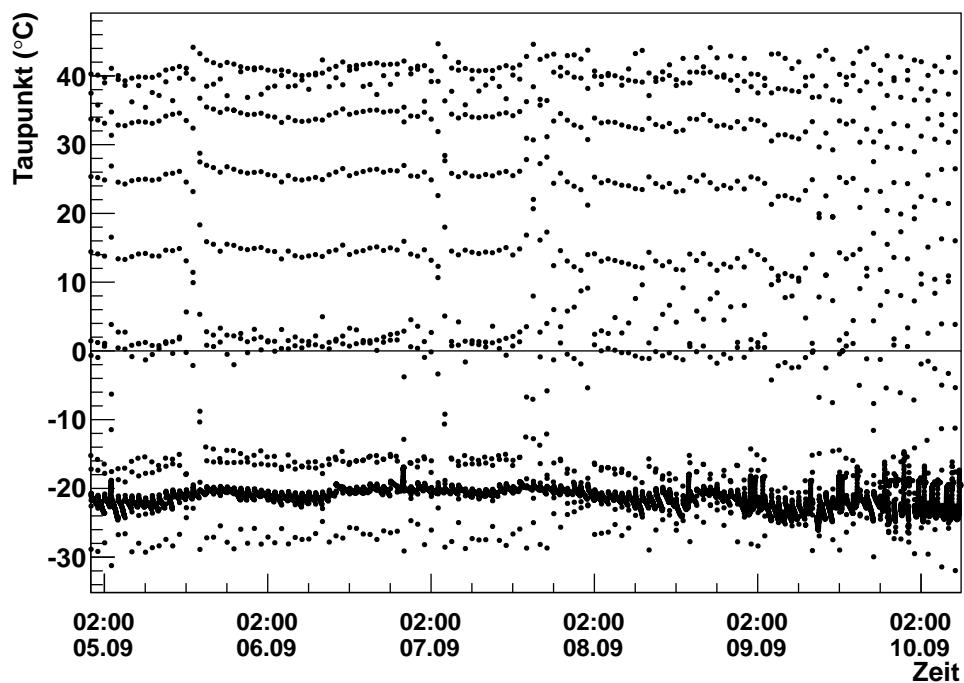


Abbildung 6.1: Messung eines $Ar - CO_2$ Gemischs im Verhältnis 82 : 18 bei einem Fluss von 0,14 : 10 mit einem ABC-Intervall von einer Stunde mit ABC Hold off über fünf Tage.

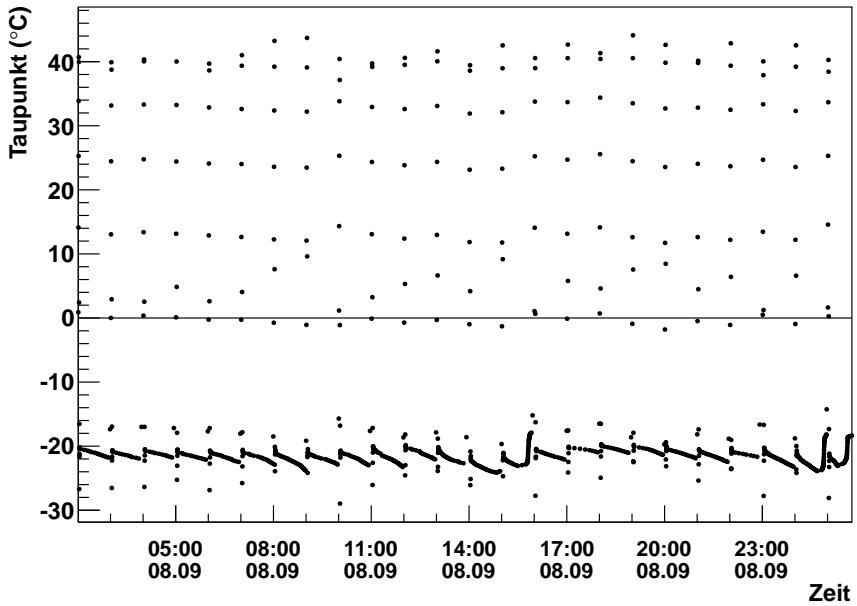


Abbildung 6.2: Messung eines $Ar - CO_2$ Gemischs im Verhältnis 82 : 18 bei einem Fluss von 0,14 : 10 mit einem ABC-Intervall von einer Stunde mit ABC Hold off über einen Tag.

In Abb. 6.1 erkennt man bei ca. $T = -21^\circ\text{C}$ den Taupunkt des Gas-Gemisches. Zusätzlich zum Taupunkt wurden auch weitere Messpunkte ermittelt, die höher als der eigentliche Taupunkt liegen. Das liegt daran, dass die Messwerte beim Aufheizen des Spiegels mit aufgenommen wurden. Daraus wurden die erhöhten Temperaturen ermittelt. Diese Beobachtung legt nahe die Funktion ABC Hold bei den kommenden Versuchen zu aktivieren. Durch diese Funktion wird der angezeigte Taupunkt während des ABC-Zyklus auf dem Niveau von vor dem Aufheizprozess gehalten und erst nach dem Aufheizprozess wieder freigegeben, sodass erst nach dem Aufheizen weitere Messwerte ermittelt werden.

Die zweite Abbildung (6.2) zeigt einen kleineren Ausschnitt der ersten Messung. In diesem Abschnitt sieht man deutlich, woher die erhöhten Punkte kommen, da sich diese immer zur vollen Stunde und somit immer zur Zeit des Aufheizprozesses ereignen. Außerdem fällt auf, dass der Taupunkt zwischen zwei Aufheizvorgängen nicht auf einem konstanten Wert bleibt, sondern stetig fällt. Das deutet darauf hin, dass das gewählte Intervall von einer Stunde zu kurz ist, damit sich das System stabilisieren kann; der eigentliche Taupunkt wird bis zum nächsten Aufheizen noch nicht erreicht.

6.1.2 Zwei Stunden Intervall

Die nachfolgenden Messungen wurden mit einem zwei Stunden Intervall des ABC durchgeführt. Außerdem wurde, wie in Abschnitt 6.1.1 festgestellt, die ABC Hold-Funktion aktiviert. Dadurch wurden nur noch die Werte aufgenommen, die für die Taupunktbestimmung relevant sind, die Aufheizphasen wurden ausgespart. In Abb. 6.3 ist eine Messung von CO_2 mit der Feuchtigkeit von 0,14 : 10 über zwei Tage dargestellt, die Abb. 6.4 zeigt eine weitere Messung mit CO_2 und der Feuchtigkeit 0,35 : 10 über drei Tage. Bei beiden Messungen wurde das ABC Intervall auf zwei Stunden gestellt.

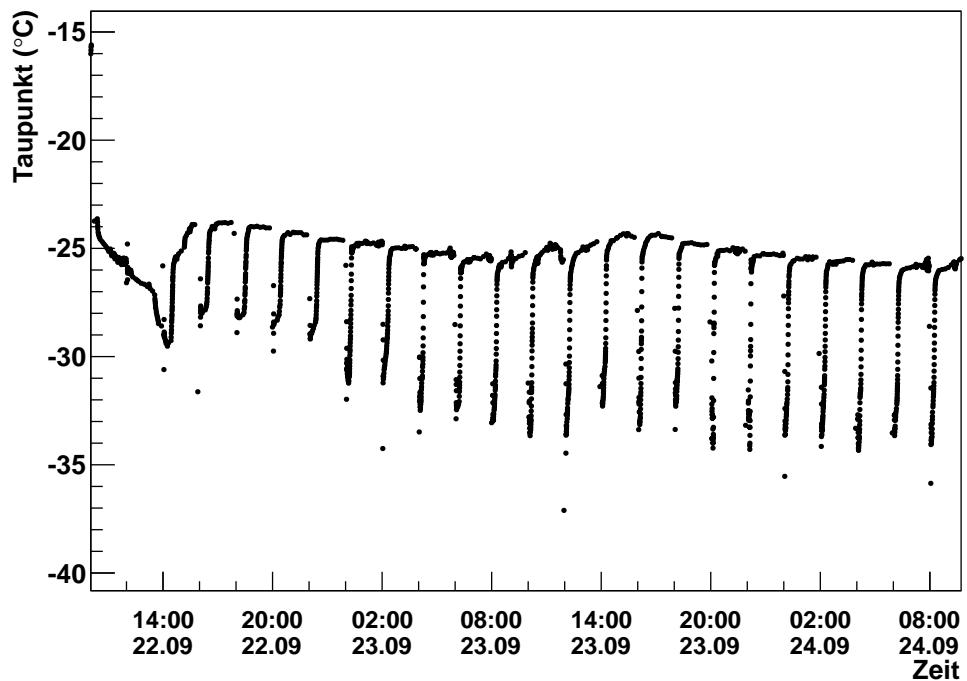


Abbildung 6.3: Messung von CO_2 bei einem Fluss von 0,14 : 10 mit einem ABC-Intervall von zwei Stunden mit ABC Hold on über zwei Tage.

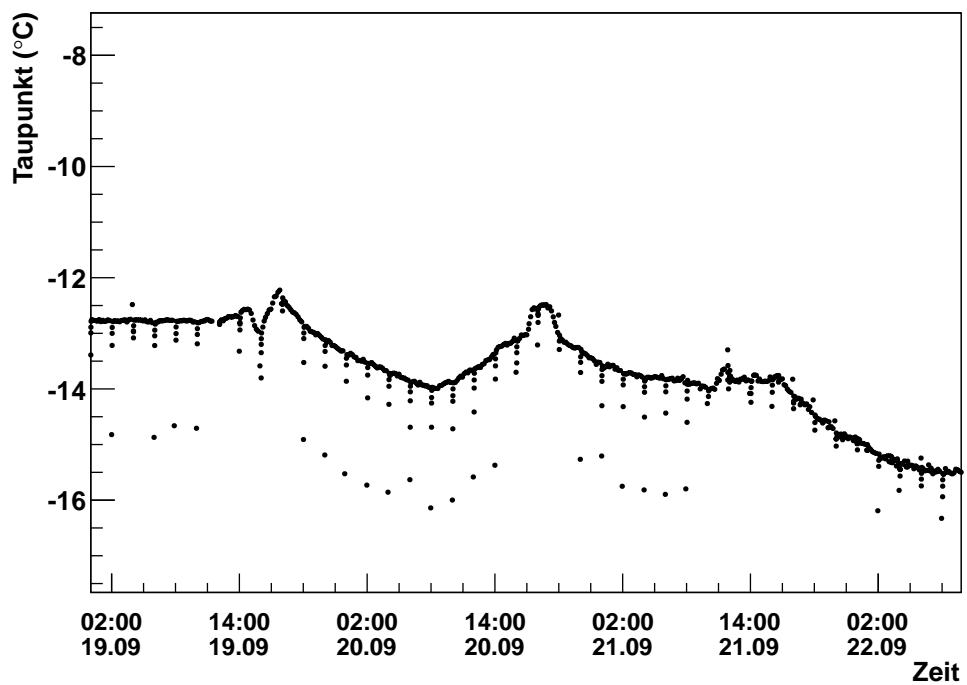


Abbildung 6.4: Messung von CO_2 bei einem Fluss von $0,35 : 10$ mit einem ABC-Intervall von zwei Stunden mit ABC Hold on über drei Tage.

Abb. 6.3 zeigt einen schwankenden Taupunkt zwischen $T = -24^\circ\text{C}$ und $T = -26^\circ\text{C}$. Im Abstand von zwei Stunden startet die Messreihe bei einer deutlich geringeren Temperatur (ca. $T = -35^\circ\text{C}$, nach dem ABC-Prozess), steigt danach schnell an und erreicht den eigentlichen Taupunkt. Um dieses Phänomen zu untersuchen wurde der Taupunkt in der Abbildung 6.5 genauer betrachtet.

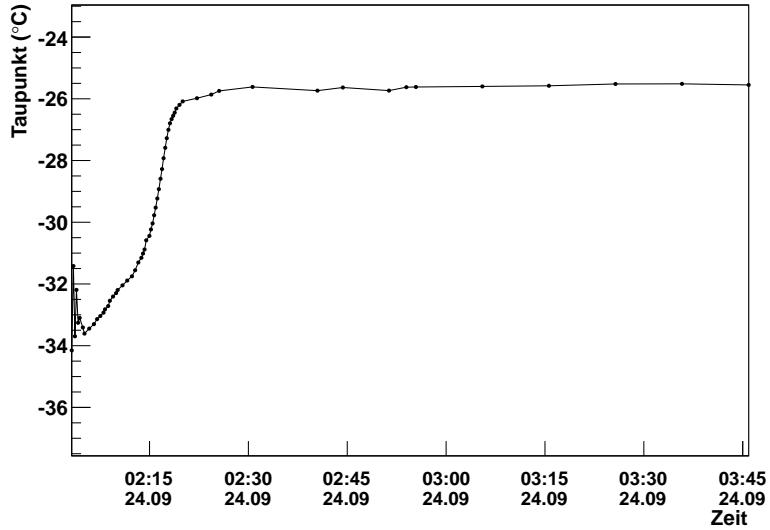


Abbildung 6.5: Verlauf des Taupunktes unmittelbar nach einem Aufheizzyklus bei der Messung von CO_2 mit einem Fluss von 0,35 : 10.

Hierbei fällt auf, dass der Taupunkt bei der Suche erneut nicht direkt getroffen wird. Stattdessen schwanken die Messpunkte ein wenig um den eigentlichen Taupunkt. Daher ist anzunehmen, dass die Art wie der Taupunkt gesucht wird mit einer gedämpften Schwingung vergleichbar ist. Durch das Aufheizen steigt der Messwert des Taupunktes auf Werte in der Größenordnung von $T_D = 40^\circ\text{C}$ an. Sobald der Taupunkt gesucht wird fällt der Wert sehr stark ab. Eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 75^\circ\text{C}$ wird beispielsweise bei der Messung von Abb. 6.3 erreicht, da der Spiegel wie in Abbildung 6.1 zunächst auf $T = 40^\circ\text{C}$ erwärmt wird und danach auf eine Temperatur von bis zu $T = -35^\circ\text{C}$ abgekühlt wird. Die Differenz des Taupunktes zum gemessenen Wert wird hierbei in diesem Versuch von ursprünglich $T_{12} = 65^\circ\text{C}$ vor dem Abkühlen auf $T_{23} = 10^\circ\text{C}$ nach dem Abkühlen verringert. Nach dem erneuten aufheizen ist die Temperaturdifferenz bereits deutlich kleiner geworden, sodass die Veränderung weniger sichtbar sind, allerdings sind sie in diesem Fall noch nicht ganz verschwunden. Erst nach weiteren Aufheiz- und Abkühlvorgängen wird der Wert des Taupunktes stabilisiert.

In der zweiten Abbildung 6.4 ist der Taupunkt mit $T = -14^\circ\text{C}$ deutlich höher, fällt allerdings zum Ende der Messung auf ungefähr $T = -16^\circ\text{C}$ ab. Der oben beschriebene Effekt tritt auch bei dieser Messung auf, allerdings fallen die Werte nach dem Abkühlen nicht so stark ab, was mit dem höheren Taupunkt und der damit verbundenen niedrigeren Differenz zu tun hat. Als Grenze, ab welcher der Effekt deutlich sichtbar wird und anfängt die Messungen zu stören konnte der Taupunkt $T_D = -20^\circ\text{C}$ ausgemacht werden.

Somit kann ein zweistündiges Intervall für Taupunkt-Messungen bis zu $T = -20^\circ\text{C}$ genutzt werden. Für tiefere Temperaturen ist allerdings ein größeres Intervall notwendig.

6.1.3 Vier Stunden Intervall

Für die nächsten Messungen wurde das ABC-Intervall auf vier Stunden angehoben. Außerdem wurde erneut ein CO_2 -Fluss von $0,14 : 10$ verwendet, da gerade bei niedrigen Temperaturen der ABC die Messungen stärker beeinflusst. Zusätzlich wurde die Raumtemperatur in dieser Messung aufgenommen. Abb. 6.6 zeigt die Messung des Taupunktes und der Raumtemperatur über einen Zeitraum von vier Tagen. Abb. 6.7 zeigt die relative Feuchtigkeit, die aus den Messungen der Umgebungstemperatur und des Taupunktes mit Hilfe der Magnus-Formel 4.13 ermittelt wurde.

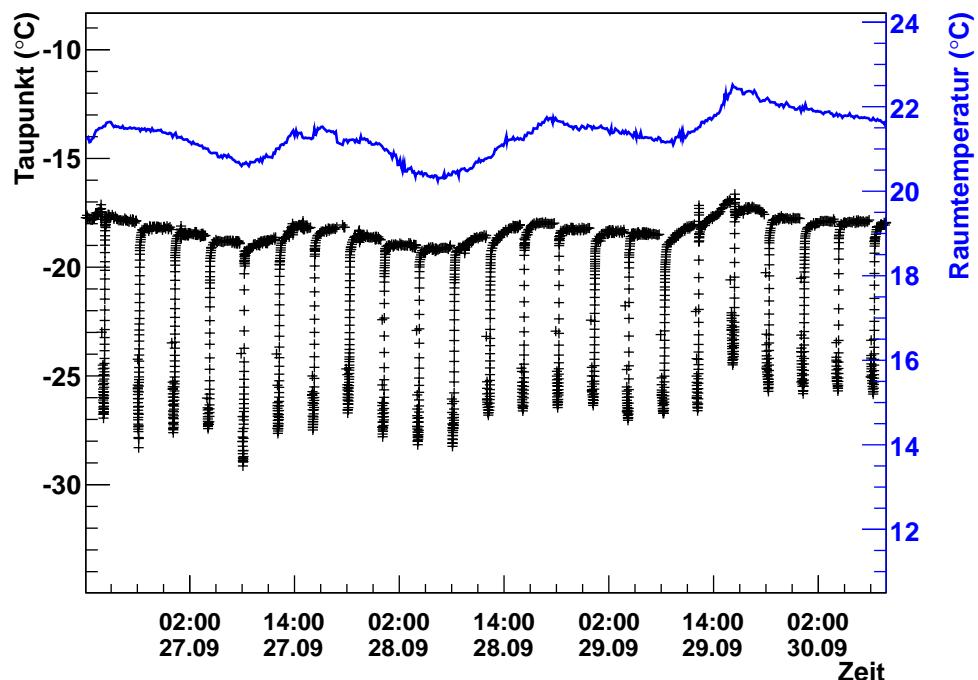


Abbildung 6.6: Messung von CO_2 bei einem Fluss von $0,14 : 10$ mit einem ABC-Intervall von vier Stunden mit ABC Hold on über vier Tage.

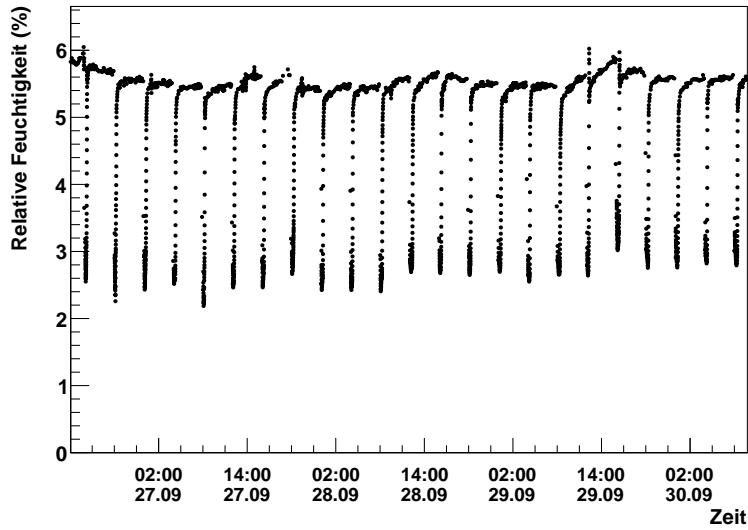


Abbildung 6.7: Berechnung der relativen Feuchtigkeit aus der Magnus-Formel 4.13 aus den Messergebnissen von Abb. 6.6 über vier Tage.

Der Taupunkt lag bei dieser Messung im Bereich von $T = -18^\circ\text{C}$, die Raumtemperatur lag im Bereich von $T = 22^\circ\text{C}$. Man sieht deutlich, dass der Taupunkt sich bei Änderung der Raumtemperatur verändert. Die Raumtemperatur stieg am 27.09 zwischen 08:00 und 14:00 leicht an. Einen ähnlichen Anstieg sieht man bei der Tautemperatur. Eine deutlich stärkere Änderung der Temperatur gab es am 29.09 zwischen 08:00 und 16:00, und ebenso in der Messung des Taupunktes, diese Änderungen sind auf die konstante Feuchtigkeit des Gases zurückzuführen. Bei der Messung des Taupunktes fällt außerdem auf, dass es vor und nach dem Aufheizprozess ab und zu kleine Änderungen des Taupunktes gibt. Das bedeutet, dass der Reinigungsprozess bei diesem Intervall sichtbar Wirkung zeigt. Allerdings ist dies nur bei wenigen Prozessen eindeutig zu beobachten.

Abbildung 6.7 zeigt die relative Feuchtigkeit des Gases während der selben Messreihe. Es fällt auf, dass die relative Feuchtigkeit nicht durchgehend konstant ist, sich allerdings nur in einem kleinen Bereich ändert. Insgesamt liegt die ermittelte relative Feuchtigkeit bei ca. $\phi = 5,5\%$. Es lässt sich auch feststellen, dass die relative Feuchtigkeit in den oben angegebenen Bereichen, in denen die Temperatur steigt, sich ebenfalls verändert. Zwischen 08:00 und 15:00 am 27.09 steigt die relative Feuchtigkeit stark an. Der selbe Effekt ist am 29.09 zwischen 08:00 und 16:00 zu erkennen. Dieser Effekt ist durch eine kleine zeitliche Verschiebung der Messungen des Taupunktes und der Raumtemperatur zurück zu führen. Die Abweichungen der berechneten relativen Feuchtigkeit liegen dabei in der Größenordnung von $\Delta\phi = 0,2\%$ und sind bei dieser Messung eher zu vernachlässigen.

6.1.4 Sechs Stunden Intervall

Aus den letzten Messungen ging hervor, dass ein vier Stunden Intervall bei niedrigen Taupunkten weiterhin die Messungen stört. Deswegen wurden die nächsten Messungen mit einem Intervall von sechs Stunden durchgeführt. Abbildung 6.8 zeigt die Taupunkt- und Raumtemperaturmessung von einem $ArCO_2$ -Gemisch im Verhältnis 82 : 18 als reines Gas um einen möglichst niedrigen Taupunkt zu erhalten. Dabei wurde die Messung nicht bei dem endgültigen Taupunkt gestartet, sondern die Startphase mit aufgenommen.

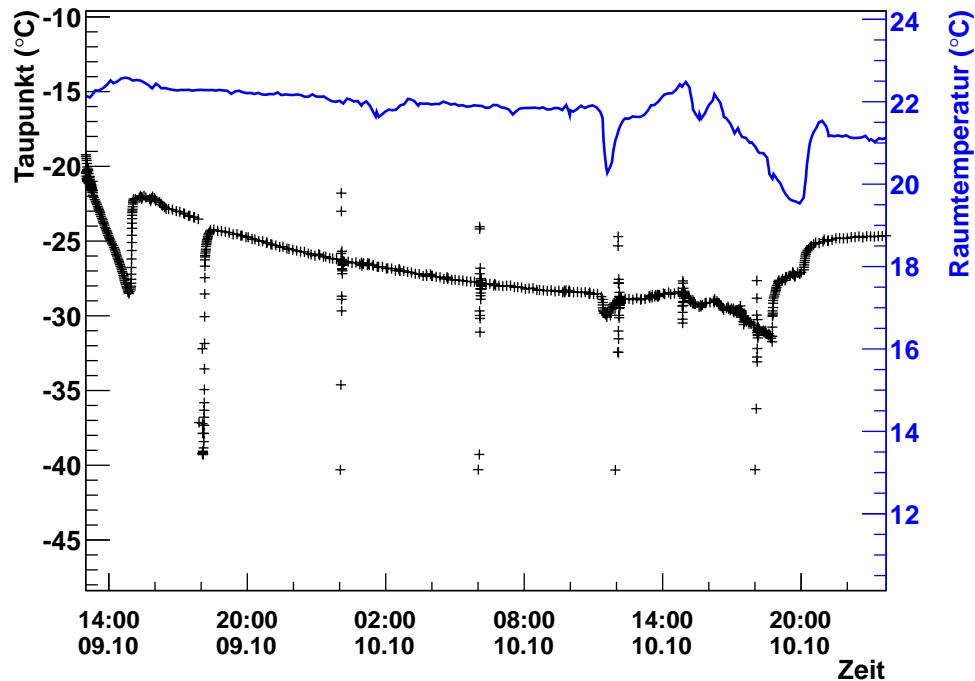


Abbildung 6.8: Messung eines $ArCO_2$ -Gemisches als reines Gas mit einem ABC-Intervall von sechs Stunden mit ABC Hold on über eineinhalb Tage.

Der Taupunkt startet bei der Messung bei einem Wert von $T = -20^{\circ}\text{C}$. der endgültige Taupunkt liegt bei $T = -26^{\circ}\text{C}$. Bei dieser Messung ist ebenfalls die Abhängigkeit von Taupunkt und Raumtemperatur deutlich zu erkennen, da die Temperatur ab dem 10.10 um 11:30 starke Änderungen aufweist, die sich in dem Taupunkt deutlich erkennen lassen. Der plötzliche Sprung des Taupunktes am 10.10 um 18:00 ist durch einen Anstieg im Durchfluss der Anordnung zu erklären. Zur Veranschaulichung der Änderung des Durchflusses zeigt die Abbildung 6.9 den Durchfluss, der bei dieser Messung eingestellt wurde.

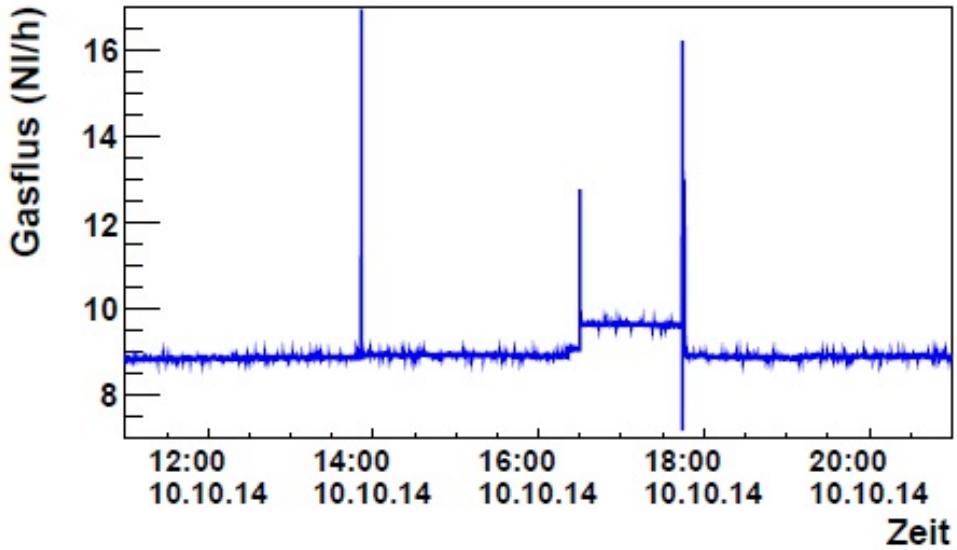


Abbildung 6.9: Gasflux der Messung von 6.8 über acht Tage.

In dieser Abbildung erkennt man deutliche Änderungen des Gasfluxes. Zu der Zeit, an der die Taupunktänderung stattfindet (10.10.2014 19:00, die Abbildung 6.9 ist um zwei Stunden verschoben) ändert sich auch der Gasflux. Dadurch ist die Veränderung in der Messung des Taupunktes zu erklären.

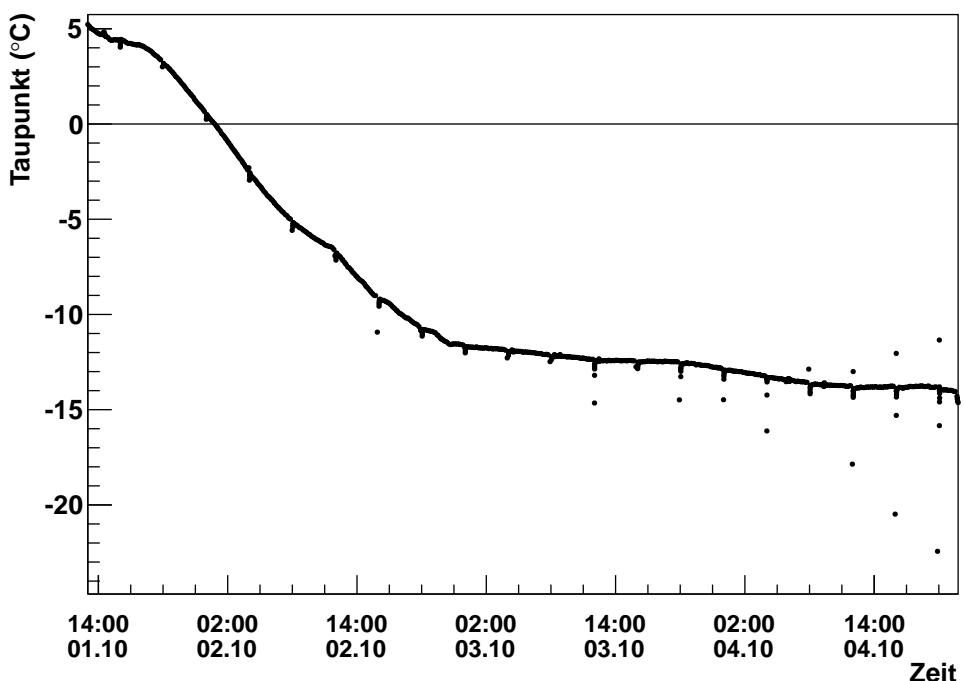
6.1.5 Zusammenfassung der Intervallmessungen

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die Messungen mit der aktivierten ABC Hold Funktion durchzuführen sind, da die Messwerte ohne diese Funktion schwer zu analysieren sind. Zusätzlich haben sich größere Intervalle für übersichtliche Messungen bewährt. Das Problem, dass der Spiegel verschmutzt und somit ein höherer Taupunkt gemessen wird ist zum ersten Mal bei einem vierstündigen Intervall aufgefallen. Allerdings waren diese Störungen im Vergleich zu der Messdauer (ein bis vier Tage) sehr kurzweilig. Außerdem waren die Änderungen auf den Taupunkt bezogen, sehr gering. Deshalb wurde sich für das sechsstündige Intervall entschieden. Bei höheren Taupunkten, im Bereich von minimal $T = -20^\circ\text{C}$, das entspricht nach der Formel zur Berechnung der absoluten Feuchtigkeit (4.17) $\rho_w = 1,08 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, kann wahlweise auch das vierstündige Intervall gewählt werden, da die gemessenen Werte beim Suchen des Taupunktes deutlich näher am eigentlichen Taupunkt liegen, als bei Temperaturen $T < -20^\circ\text{C}$ ($\rho_w < 1,08 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$).

6.2 Messungen am Supermodul

Um die sechs Lagen des Supermoduls mit Gas zu versorgen werden jeweils zwei Lagen (01, 23 und 45) miteinander verbunden, sodass das Gas bei Stack 0 der unteren Lage eingelassen wird und nach Stack 0 der oberen Lage wieder ausgelassen wird, wo es untersucht wird. Die eingebauten Kammern werden nach dem Eintreffen in Münster zunächst mit einem $ArCO_2$ -Gemisch durchspült. Während dem Verbinden der verschiedenen Kammern beim Einbau gelangen geringe Mengen von Luft in die neue Lage des Supermoduls. Daher ist die Feuchtigkeit der eingebauten Lage relativ hoch.

Nach dem Einbau der Lage 1 des Supermoduls am 01.10.2014 wurde eine Messung des Taupunktes beim Durchspülen der neu eingebauten Lage 1 durchgeführt. Zusätzlich zu dieser Messung wurde auch der Sauerstoffgehalt in ppm gemessen. Die Ergebnisse der Messung während des Durchspülens sind in Abbildung 6.10 zu sehen. Die gemessene Raumtemperatur lag zum Zeitpunkt, an dem das Supermodul angeschlossen wurde bei $T = 21,1^\circ\text{C}$ und die gemessene Luftfeuchtigkeit bei $\phi = 70,7\%$, das entspricht nach Formel 4.19 einer absoluten Feuchtigkeit von $\rho_w = 12,98 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$.



Taupunktkurve einen Knick. Die Kammern wurden mit einem Durchfluss von ca. $25 \frac{1}{h}$ (siehe Abbildung 6.11) durchgespült. Jede der fünf eingebauten Kammern hat ein ungefährs Volumen von 50l, daher sind nach den zehn Stunden alle Kammern einmal grob durchgespült. Nach ca. 33 Stunden macht die Kurve einen weiteren Knick. Hier kann man davon ausgehen, dass die Kammern vollständig durchgespült sind. Die gesamte Lage wurde zu diesem Zeitpunkt mit dem dreifachen des Gasvolumens durchgespült. Der Taupunkt, welcher an dieser Stelle erreicht wurde ist ungefähr -12°C , was einer absoluten Feuchtigkeit von $\rho_w = 2,03 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ entspricht.

Der Vergleich zwischen dem Abfall des Taupunktes und dem Sauerstoffgehalt ist in den Abbildungen 6.11 und 6.12 zu sehen.

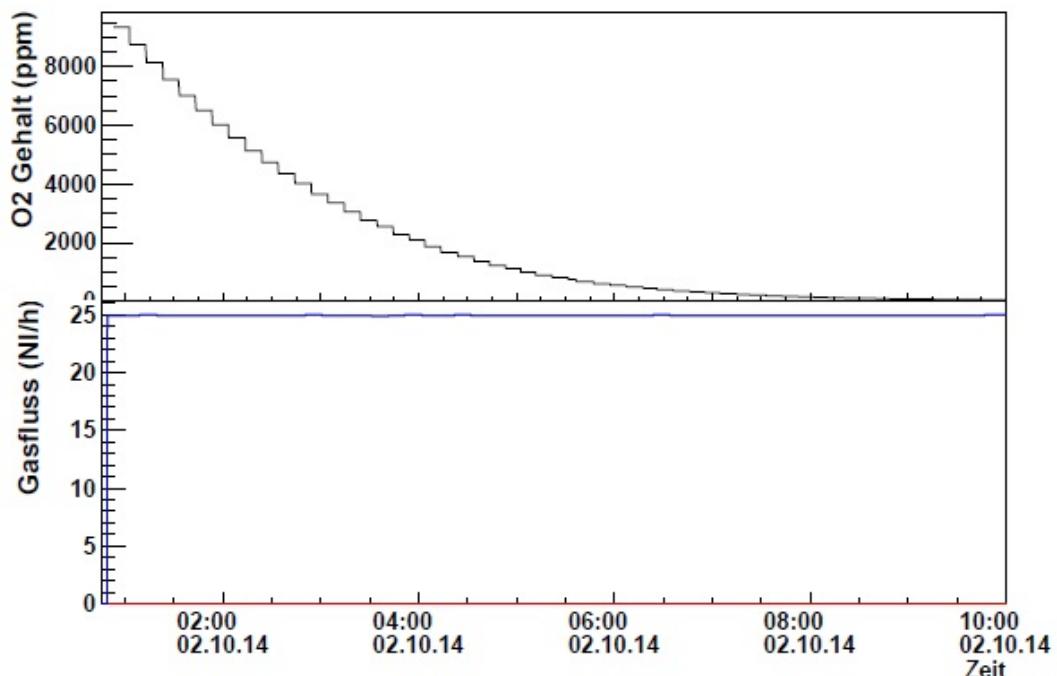


Abbildung 6.11: Sauerstoffgehalt und Gasfluss während der Messung am Supermodul über acht Stunden.

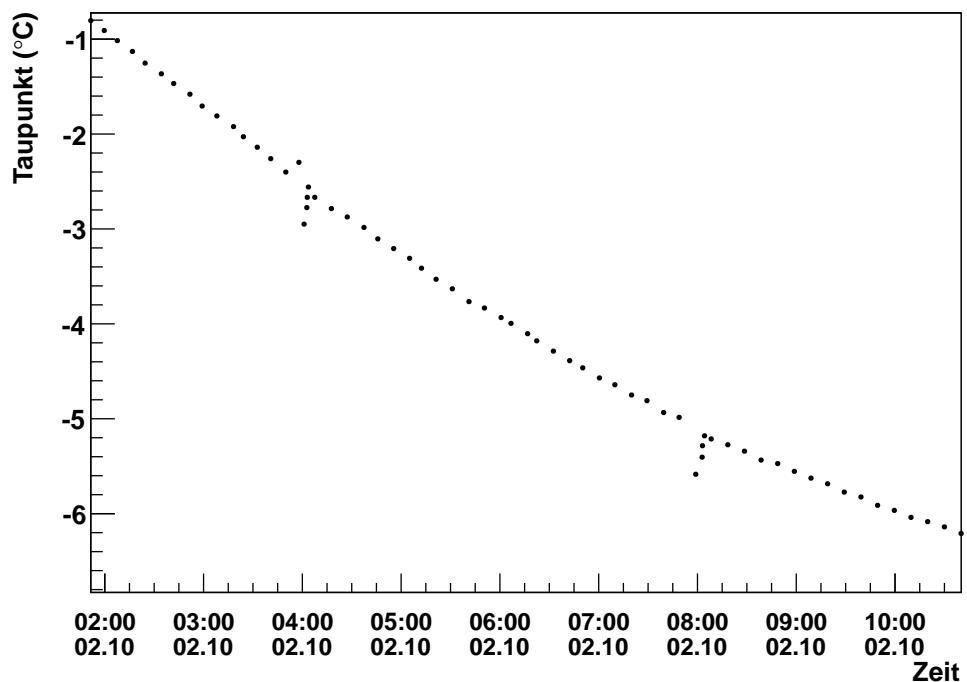


Abbildung 6.12: Messung von CO_2 als reines Gas beim durchspülen des Supermoduls mit einem ABC-Intervall von vier Stunden mit ABC Hold on über acht Stunden.

In diesen Abbildungen sieht man deutlich, dass der Sauerstoffgehalt exponentiell abnimmt, der Taupunkt allerdings annähernd linear fällt. Somit lässt sich feststellen, dass der Taupunkt nicht linear vom Sauerstoffgehalt abhängt.

Die Abbildung 6.13 zeigt den weiteren Verlauf der Messung für die weiteren Tage nachdem das Supermodul bereits komplett durchgespült wurde.

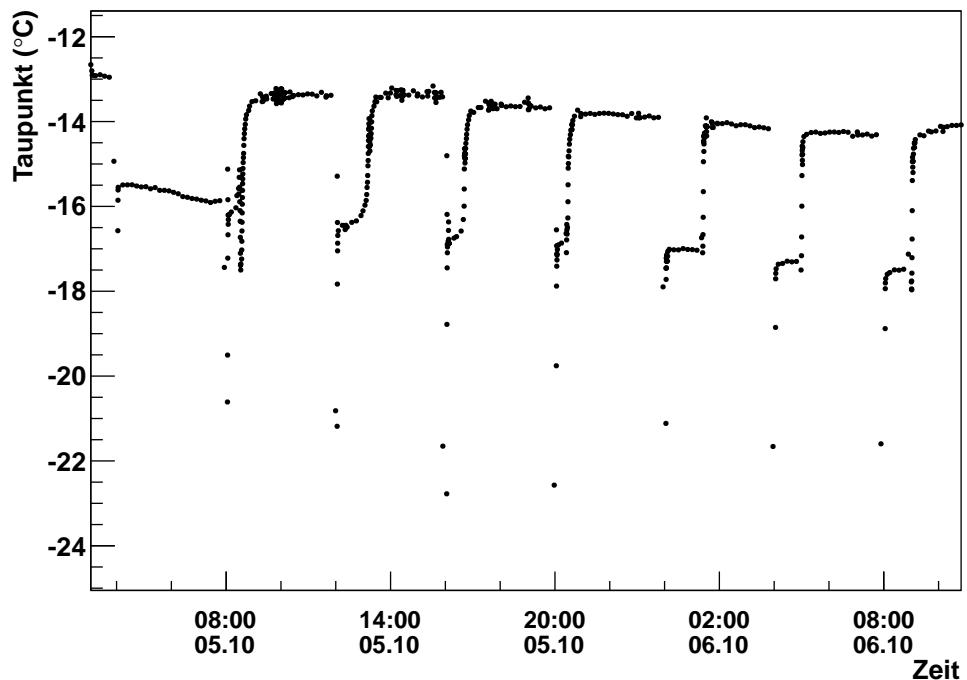


Abbildung 6.13: Messung eines $ArCO_2$ -Gemisches als reines Gas durch das Supermodul mit einem ABC-Intervall von vier Stunden mit ABC Hold on vier Tage nach dem Start der Messung über einen weiteren Tag.

In dieser Abbildung verhält sich der gemessene Taupunkt anders als in vorherigen Messungen. Nach einem ABC-Prozess bleibt der Taupunkt für eine etwas längere Zeit auf ungefähr $T = -17^\circ\text{C}$, bevor er wieder ansteigt auf die vorher gemessenen $T = -13^\circ\text{C}$. Ein möglicher Grund dafür könnte sein, dass der Gasfluss zu gering ist. Das könnte dazu führen, dass das einströmende Gas nicht feucht genug ist um den ursprünglichen Taupunkt erneut anzuzeigen. Sobald mehr Gas zum Spiegel geleitet wird steigt der Taupunkt wieder an, da die Feuchtigkeit nun ausreicht. Das könnte aufgrund von zu kleinen Schläuchen oder einem zu geringen Durchfluss gegeben sein. Durch diese erste Messung erhält man ein weiteres Maß für die Länge des ABC-Intervalls. Der ABC-Prozess, welcher am 06.10 um 00:00 startet hat den endgültigen Wert für den Taupunkt erst gegen 02:00 erreicht. Somit ist eine Differenz von zwei Stunden aufgetreten. Dadurch wäre ein Intervall von zwei Stunden unter Umständen zu kurz um erfolgreiche Messungen durchzuführen. Auch ein Intervall von vier Stunden ist dabei bereits sehr knapp bemessen.

6.3 Messung einer Kammer eines Moduls

6.3.1 Durchspülen der Kammer mit reinem Gas

Im Anschluss an die Bestimmung der optimalen Länge des Intervalls für den ABC Prozess wurde eine Kammer, welche später in das Supermodul eingebaut wurde, mit regulierten Feuchtigkeiten durchgespült und vermessen. Dafür wurde ein $ArCO_2$ -Gemisch zunächst zu einem Teil durch einen Bubbler geleitet, zum einem anderen Teil wurde das reine Gas weiter zur Kammer geleitet. Nachdem das Gasgemisch durch die Kammer gelangt ist wurde es am Auslass durch das Hygrometer geleitet um den Taupunkt zu messen. Um verschiedene Feuchtigkeiten zu erhalten konnte am Bubbler ein Fluss eingestellt werden und es wurde so lange gemessen, bis der Taupunkt annähernd konstant war. Danach wurde ein anderer Fluss eingestellt. Die Messungen wurden begonnen mit einem reinen $ArCO_2$ -Gemisch, wobei die Feuchtigkeit langsam erhöht wurde. Die Kammer ist während des gesamten Versuchs an der Hochspannung angeschlossen, um zu kontrollieren, ab wann die Feuchtigkeit ausreicht um einen Stromfluss zu erzeugen. Bei den ersten Versuchen fließt kein Anodenstrom. Abb. 6.14 zeigt die erste Messung der Kammer während und nach dem Durchspülen.

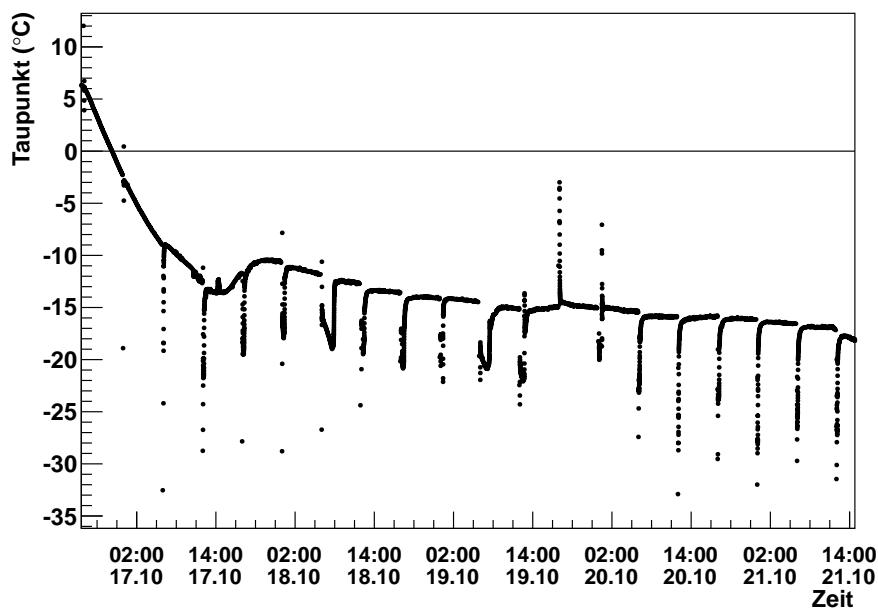


Abbildung 6.14: Messung eines $ArCO_2$ -Gemisches als reines Gas durch eine Kammer mit einem ABC-Intervall von sechs Stunden mit ABC Hold on über fünf Tage.

Um sicher zu gehen, dass die Kammer komplett durchgespült ist wurde die Messung über mehrere Tage durchgeführt. Zum Ende der Messung wurde ein Taupunkt von $T = -20^\circ\text{C}$ ermittelt, was einer relativen Feuchtigkeit von $\rho = 1,08 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ entspricht. Es ist

anzunehmen, dass der gemessene Taupunkt nicht dem eigentlichen Taupunkt des Gasgemisches entspricht, da für diese Versuche sehr lange Kunststoffleitungen verwendet wurden, was die Messung von tiefen Taupunkten erschwert. Des Weiteren genügt der verwendete Sensor nicht um sehr niedrige Taupunkte in kurzer Zeit zu erreichen, ohne dass eine weitere externe Kühlung verwendet wird. Außerdem ist die Feuchtigkeit mit $\rho = 1,08 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ auch deutlich höher als zu erwarten, da reines Argon (Reinheit: 99,996 % [Gas]) und reines Kohlenstoffdioxid (Reinheit: 99,995 % [Gas]) kaum noch Rückstände von Wasserstoff haben und demnach die Feuchtigkeit in dem Gasgemisch ungefähr $\rho = 0,00 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ sein müsste. Um den Taupunkt beim Durchspülen genauer zu ermitteln müsste man den Versuch über einen längeren Zeitraum laufen lassen. Der Taupunkt des reinen Gasgemisches ist allerdings für die durchgeführten Messungen irrelevant. Auffällig sind gerade zum Ende der Messung die kleinen Sprünge der Temperatur nach einem ABC Prozess.

6.3.2 Messung mit einem Fluss von 0,14 : 15

Am 21.10 um 15:00 wurde der Fluss auf 0,14 : 15 erhöht. Der Taupunkt hat ungefähr einen Tag benötigt um sich einzustellen, dabei ist die Temperaturdifferenz bei dieser Messung sehr klein ausgefallen. Die Ergebnisse der Messung vom 21.10 15:00 bis zum 22.10 15:00 sind in der Abbildung 6.15 dargestellt.

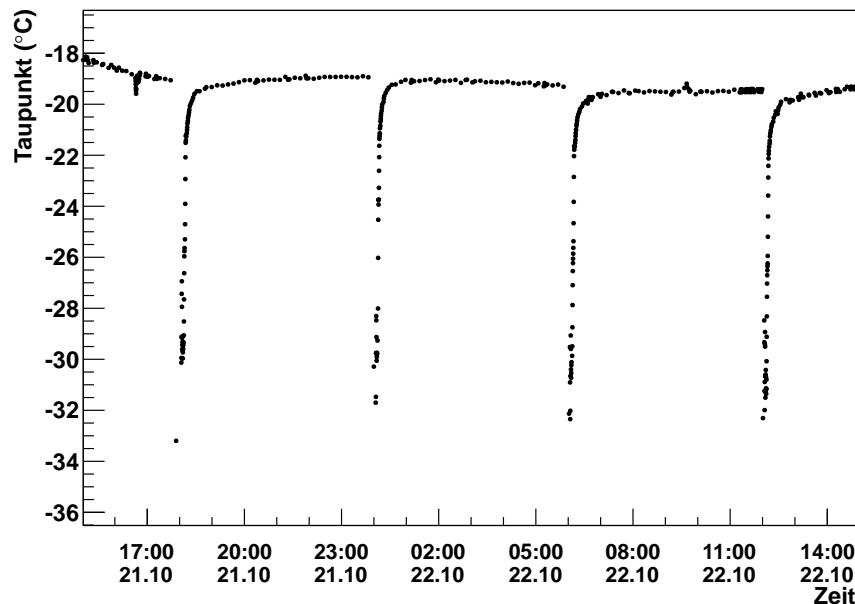


Abbildung 6.15: Messung eines $ArCO_2$ -Gemisches mit dem Fluss 0,14 : 15 durch eine Kammer mit einem ABC-Intervall von sechs Stunden mit ABC Hold on über einen Tag.

Der ermittelte Taupunkt lag bei dieser Messung bei $T = -19^\circ\text{C}$ ($\rho = 1,17 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$), wobei

der Taupunkt bei diesem Fluss erst zum Ende der Messung erreicht ist, da das Gemisch zunächst die Kammer passieren muss.

6.3.3 Messung mit einem Fluss von 0,28 : 10

Am 22.10 15:00 wurde der Fluss erneut erhöht auf 0,28 : 10. Diese deutliche Erhöhung macht sich auch in der Taupunktkurve bemerkbar. Abbildung 6.16 zeigt den weiteren Verlauf vom 22.10 15:00 bis zum 23.10 14:45.

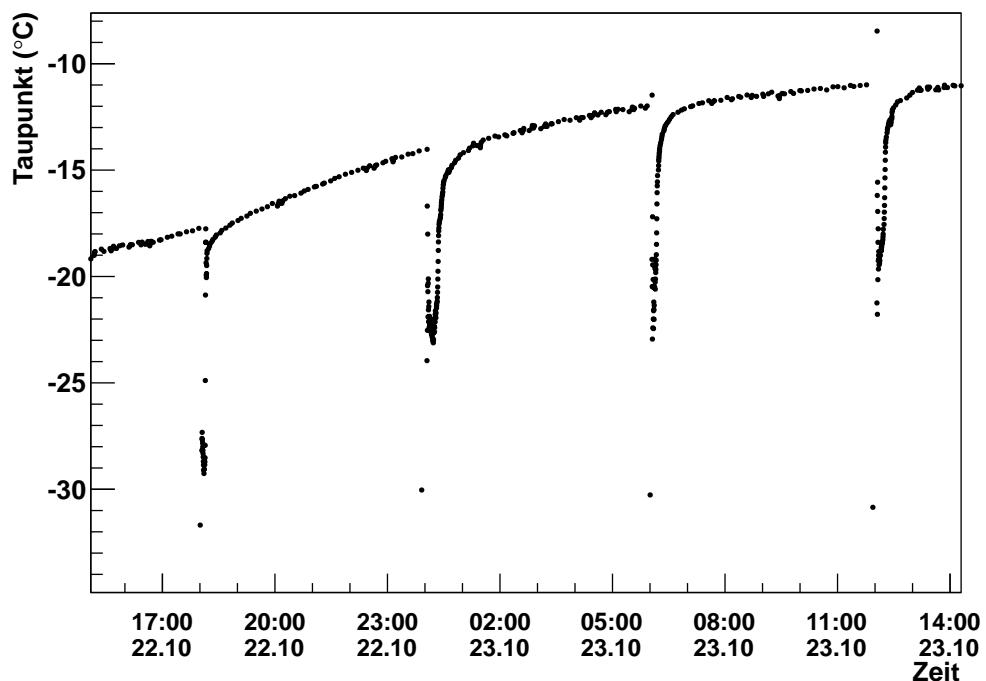


Abbildung 6.16: Messung eines $ArCO_2$ -Gemisches mit dem Fluss 0,28 : 10 durch eine Kammer mit einem ABC-Intervall von sechs Stunden mit ABC Hold on über einen Tag.

In dieser Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass der Taupunkt stark ansteigt, von den vorherigen ca. $T = -19^\circ\text{C}$ ($\rho = 1,17 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$) auf $T = -11^\circ\text{C}$ ($\rho = 2,19 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$).

6.3.4 Messung mit einem Fluss von 0,42 : 10

Eine weitere Messung wurde am Folgetag gestartet mit einem Fluss von 0,42 : 10 und in der Abbildung 6.17 dargestellt.

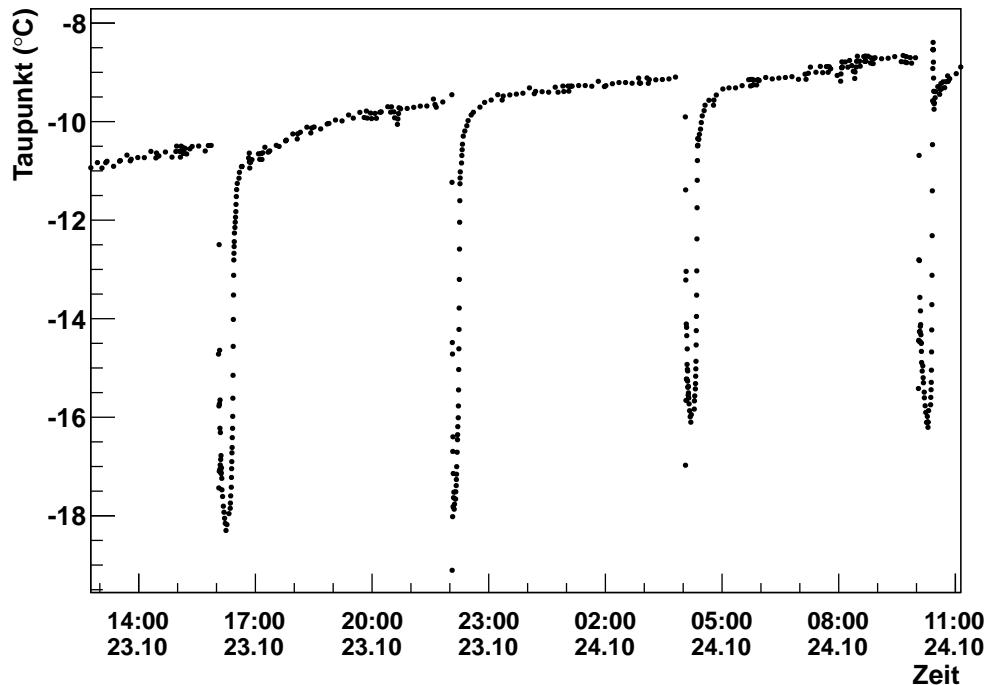


Abbildung 6.17: Messung eines $ArCO_2$ -Gemisches mit dem Fluss 0,42 : 10 durch eine Kammer mit einem ABC-Intervall von sechs Stunden mit ABC Hold on über einen Tag.

Die Messung wurde vom 23.10 14:45 bis zum 24.10 13:10 durchgeführt. Der Taupunkt ist hierbei weiter angestiegen auf ungefähr $T = -9^\circ\text{C}$ ($\rho = 2,55 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$). Außerdem erkennt man deutlich, dass der Taupunkt in kleinen Bereichen zu springen scheint. Speziell fällt dabei der Bereich am 24.10 um 8:00 auf. Hier ändert sich der Taupunkt in einem Zeitraum von zwei Stunden im Bereich von $T_{min} = -9,5^\circ\text{C}$ bis $T_{max} = -8,8^\circ\text{C}$ ($\rho = 2,45 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ bis $\rho = 2,59 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$).

6.3.5 Messung mit einem Fluss von $0,84 : 10$

Über das Wochenende vom 24.10 bis zum 26.10 wurde der Fluss erneut erhöht auf $0,84 : 10$. Die Messung ist in Abbildung 6.18 dargestellt.

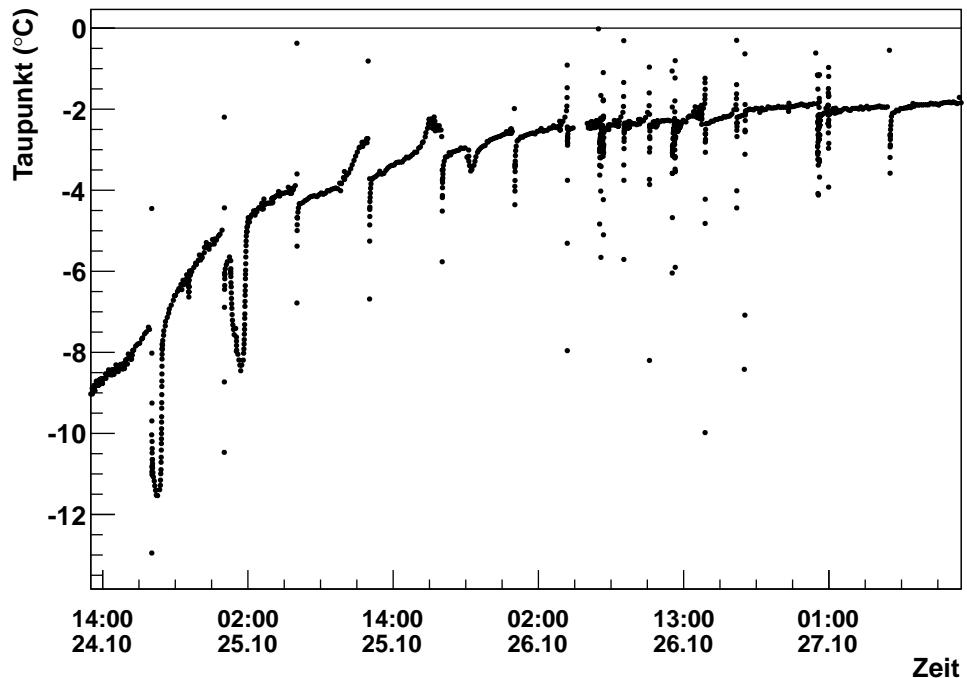


Abbildung 6.18: Messung eines $ArCO_2$ -Gemisches mit dem Fluss $0,84 : 10$ durch eine Kammer mit einem ABC-Intervall von sechs Stunden mit ABC Hold on über drei Tage.

Die Messung lief vom 24.10 13:10 bis zum 27.10 11:00. Der Taupunkt ist am ersten Tag stark angestiegen und an den nächsten zwei Tagen weiterhin langsam angestiegen, bis zu dem letztendlichen Wert von $T = -2^\circ\text{C}$ ($\rho = 4,22 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$). Im Zeitraum vom 26.10 4:00 bis zum 26.10 19:00 zeigt der Taupunkt unkontrollierte Änderungen, die eine Ähnlichkeit mit den Ausschlägen bei dem ABC Prozess haben. Auch bei dieser Messung gab es noch keinen Stromfluss an der Kammer.

6.3.6 Messung mit einem Fluss von 1,4 : 10

Am 27.10 um 11:00 wurde der Fluss ein letztes Mal erhöht auf 1,4 : 10. Die Resultate sind in Abbildung 6.19 zusammengefasst.

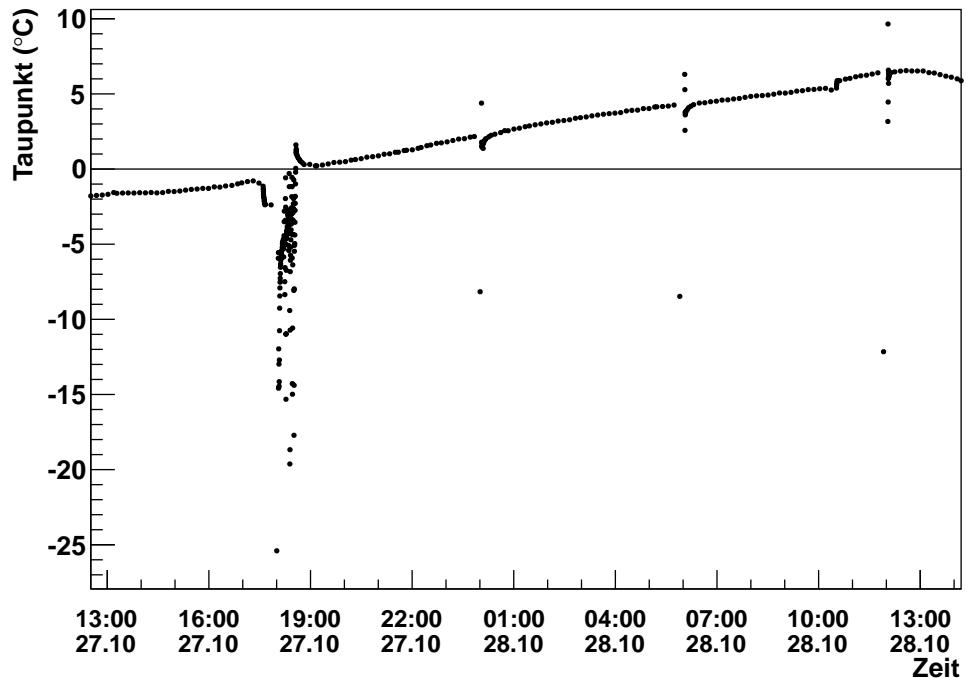


Abbildung 6.19: Messung eines $ArCO_2$ -Gemisches mit dem Fluss 1,4 : 10 durch eine Kammer mit einem ABC-Intervall von sechs Stunden mit ABC Hold on über einen Tag.

Der Taupunkt steigt zu Beginn langsam an. Am 27.10 um 18:00 gibt es eine Störung in der Messung. An dieser Stelle wurden mehrere Taupunkttemperaturen aufgenommen, die deutlich unter dem eigentlichen Taupunkt liegen. Um 19:00 steigt der Taupunkt allerdings weiter an, bis auf das Maximum von $T = 6^\circ$ ($\rho = 7,25 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$). Am 28.10 um 10:00 wurde die Messung beendet, da zum ersten mal ein Stromfluss gemessen wurde. Danach wurde der Fluss durch den Bubbler auf null gesetzt und der Gesamtfluss erhöht, um die Kammer wieder durchzuspülen. Die Hochspannung musste ebenso runter gefahren werden, da ein deutlicher Stromfluss registriert wurde. Der Fluss wurde in Abbildung 6.20 dargestellt.

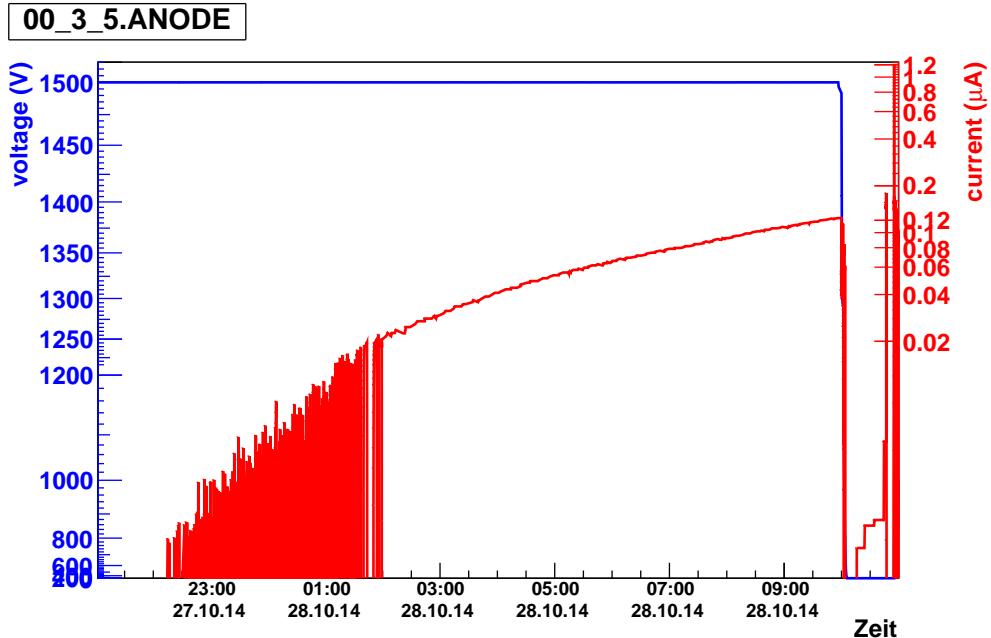


Abbildung 6.20: Spannung und Strom der Anode von der angeschlossenen Kammer, mit welcher die Versuche durchgeführt wurden.

Abbildung 6.20 zeigt die Spannung und den Strom aufgetragen gegen die Zeit. Dabei sind sowohl die Spannung, als auch der Strom in einer logarithmischen Skala dargestellt. Die Spannung ist in Blau dargestellt und blieb während der Messung konstant bei $U = 1500$ V. Der Strom ist in rot dargestellt und sollte im Normalfall konstant bei $I = 0$ nA sein. Am 27.10 um 22:30 wurde ein minimaler Strom von $I = 1$ nA gemessen 8.2, der unmittelbar wieder auf $I = 0$ nA abgefallen ist. Im weiteren Verlauf wurde immer wieder ein kurzer Stromfluss gemessen, der schnell wieder abgefallen ist, bis ungefähr 02:00 am 28.10. Ab dieser Zeit ist der Stromfluss, ohne erneut auf $I = 0$ nA abzufallen, stetig angestiegen, bis der Stromfluss am 28.10 um 10:00 bemerkt wurde und die Spannung ausgeschaltet wurde. Demnach war die Feuchtigkeit in dem Gas am 27.10 um 22:30 hoch genug, um einen Stromfluss an der Anode zu ermöglichen. Die relative Feuchtigkeit zu diesem Zeitpunkt lässt sich aus der Temperatur und dem Taupunkt ermitteln. Dabei ist zu beachten, dass der Taupunkt zeitlich verschoben ist, im Vergleich zur Strommessung, da das Gas zunächst die Kammer passieren muss, bevor es gemessen werden kann. Vergleicht man die Zeit, ab wann der Durchfluss der letzten Messung eingestellt wurde mit dem ersten Anstieg des Taupunktes in Abbildung 6.19, so fällt auf, dass der Taupunkt sich ab dem 27.10 um ca. 18:00 verändert. Der neue Durchfluss wurde am 27.10 um ca. 13:00 eingestellt. Das macht eine Differenz von ungefähr fünf Stunden, die das Gas benötigt, um durch die Kammer zu gelangen. Daher ist davon auszugehen, dass der gemessene Taupunkt im Bereich vom 27.10 um 22:30 und 28.10 um 03:30 entscheidend für die Messung der relativen und absoluten Feuchtigkeit ist. Diese Messung ist in Abbildung 6.21 dargestellt.

Des weiteren wird aus dieser Messung ersichtlich, dass der Stromfluss abhängig von der Feuchtigkeit des Gases ist. Nachdem zum ersten Mal ein Stromfluss registriert wurde ist weiterhin feuchtes Gas in die Kammer geflossen. Je feuchter das Gas in der Kammer wurde, desto mehr Strom ist kurzzeitig geflossen.

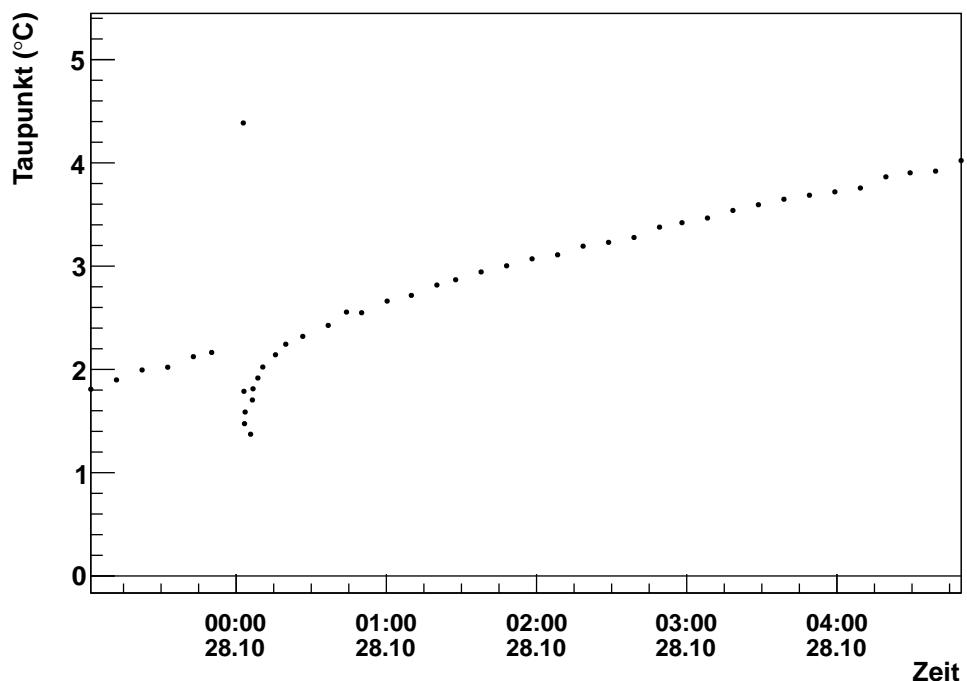


Abbildung 6.21: Messung eines $ArCO_2$ -Gemisches mit dem Fluss 1,4 : 10 durch eine Kammer mit einem ABC-Intervall von sechs Stunden mit ABC Hold on zum ungefähren Zeitpunkt des Stromanstiegs.

Aus Abbildung 6.21 lässt sich ablesen, dass der Taupunkt in der Zeit zwischen dem Beginn des Stromanstiegs und der Zeit, bis das Gas das Hygrometer erreicht hat, von $T_1 = 2^\circ\text{C}$ auf $T_2 = 3,5^\circ\text{C}$ ansteigt. Die daraus ermittelte absolute Feuchtigkeit, welche das Gas hatte liegt demnach zwischen $\rho_{w1} = 5,56 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und $\rho_{w2} = 6,15 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.

Außerdem wurde die relative Feuchtigkeit des Gases in diesem Zeitraum bestimmt und in der Abbildung 6.22 dargestellt.

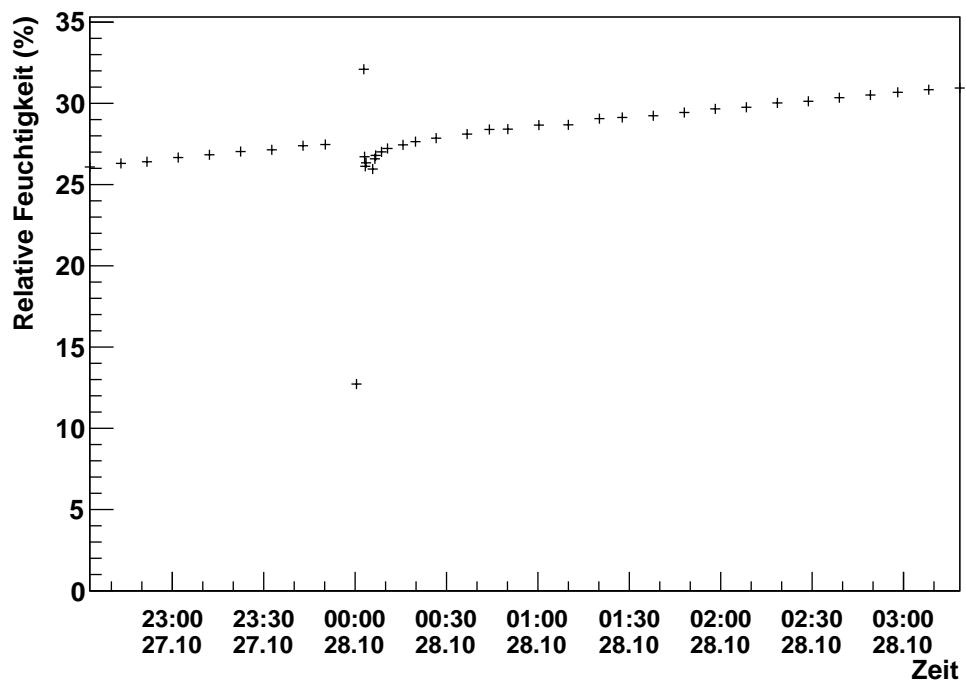


Abbildung 6.22: Relative berechnete Feuchtigkeit des Gases in der Kammer zum Zeitpunkt des Stromanstiegs.

Die relative Feuchtigkeit steigt nach Abbildung 6.22 während der Messung kontinuierlich von $\phi = 26\%$ auf $\phi = 31\%$. Demnach ist die relative Feuchtigkeit, bei der ein Anodenstrom festgestellt werden kann bei $\phi > 26\%$.

Inwiefern die ermittelten Messergebnisse allgemein übertragbar sind, wäre durch weitere Messungen an anderen Kammern zu verifizieren.

7 Diskussion der Messergebnisse

Die Ergebnisse aus der ersten Messreihe haben gezeigt, dass erfolgreiche Messungen des Taupunktes generell mit der ABC-Hold Funktion durchgeführt werden sollten, da ansonsten zu viele störende Messpunkte aufgenommen werden. Die passende Zeit für den ABC hängt von der erwarteten absoluten Feuchtigkeit ab. Für Messungen mit Feuchtigkeiten $\rho < 1,08 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, was einem Taupunkt von $T_D = -20^\circ\text{C}$ entspricht, sollte ein ABC-Intervall von sechs Stunden gewählt werden (siehe 6.1), da in diesem Temperaturbereich, bei aktiverter ABC Hold Funktion, die Temperatur nach einem ABC Prozess sehr tief abfällt und somit erneut störende Messpunkte liefert. Dabei ist allerdings zu beachten, dass Messungen bei $T_D < -20^\circ\text{C}$ aufgrund von unzureichender externer Kühlung ungenau sind (siehe Abschnitt 6.3). Bei höheren Feuchtigkeiten und somit auch höheren Taupunkten ist dieser Effekt nicht ganz so stark. In diesen Bereichen sollte ein Intervall von mindestens vier Stunden gewählt werden.

Bei der Messung am Supermodul ist aufgefallen, dass nach einigen Tagen der Taupunkt nach dem ABC Prozess zunächst auf einem niedrigeren Niveau gemessen wurde, als der Taupunkt eigentlich liegt. Dass liegt vermutlich daran, dass die Messungen mit einem geringen Durchfluss getätigt wurden. Da die Zeit teilweise bis zu zwei Stunden betrug, bevor der Taupunkt wieder auf dem richtigen Niveau lag (siehe Abs. 6.2, Abb. 6.13) ist es sinnvoll das ABC Intervall bei Messungen mit geringem Fluss auf sechs Stunden zu stellen, da ansonsten der Taupunkt vereinzelt nicht korrekt wieder gegeben werden kann.

Somit ließ sich insgesamt zeigen, dass der ABC Prozess mit einem Intervall von sechs Stunden bei effektiven Messungen einzustellen. Im Einzelfall kann das Intervall, bei hohen Flussraten und Feuchtigkeiten, die größer als $\rho < 1,08 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ ($T_D = -20^\circ\text{C}$) sind kann das Intervall auch auf vier Stunden verkürzt werden, da bei den vier Stunden Intervallen teilweise auch schon die Effekte der verschmutzten Spiegeloberfläche aufgetreten sind (siehe Abs. 6.1.3, Abb. 6.6).

Die Messungen von einer Kammer haben gezeigt, dass die Hochspannung von der Feuchtigkeit, die in der Kammer herrscht beeinflusst wird. Nachdem die Feuchtigkeit eine untere Grenze von $\rho_{w1} = 5,56 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ erreicht hatte stieg der Strom in der Kammer leicht an. Ab dieser Feuchtigkeit konnte zum ersten mal ein Anodenstrom festgestellt werden. Durch den weiteren Fluss von feuchtem Gas in die Kammer hat sich die Feuchtigkeit innerhalb der Kammer weiter erhöht, gleichzeitig ist der Anodenstrom weiter angestiegen (siehe Abs. 6.3). Die Messungen deuten aufgrund der logarithmischen Skala auf einen linearen Zusammenhang zwischen Feuchtigkeit und Anodenstrom. Diese These kann in weiteren Versuchen noch bestätigt werden.

Diese Messungen haben demnach ergeben, dass die Feuchtigkeit den Anodenstrom innerhalb der Kammer beeinflusst. Außerdem konnte eine Grenze für die Feuchtigkeit bestimmt werden, ab welcher der Stromfluss innerhalb der Kammer möglich ist. Diese Grenze ist $\rho_{w1} = 5,56 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.

Abschließend konnte in dieser Arbeit festgestellt werden, dass es eine Abhängigkeit vom den Stromfluss an der Anode und der Feuchtigkeit innerhalb einer Kammer eines Gasdetektors gibt. Das bedeutet, dass die Probleme mit dem Anodenstrom unter anderem durch die Feuchtigkeit in der Luft entstanden sind, da ein Stromfluss häufig beim Supermodulbau im Sommer bei hoher Luftfeuchtigkeit an Kammern mit offenem Gasauslass registriert wurde. Im ALICE-Detektor dürfte dieses Problem nicht mehr auftreten, da das Gassystem ein komplett geschlossenes System ist, in dem das durchfließende Gas dauerhaft gereinigt wird.

Des weiteren konnte für das verwendete Hygrometer die Einstellung des ABC Intervalls für verschiedene Messreihen überprüft werden, sodass für zukünftige Messungen das Hygrometer einfacher genutzt werden kann.

8 Anhang

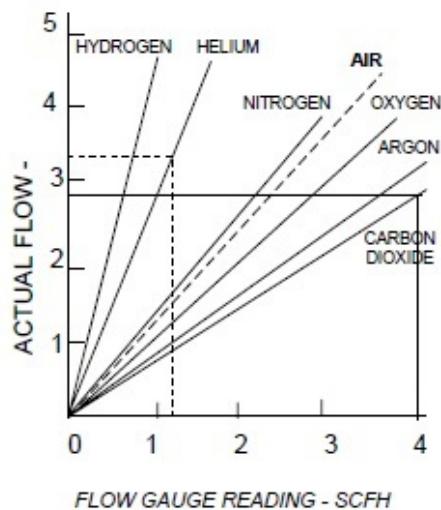


Abbildung 8.1: Durchflussraten von verschiedenen Gasen im Vergleich zu Luft. Das Verhältnis des Durchflusses von Kohlenstoffdioxid zu Luft wurde ermittelt als $u = 0,7$ [Edg1].

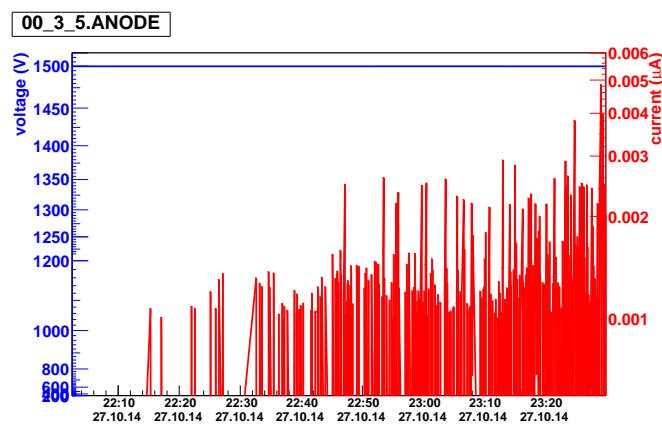


Abbildung 8.2: Stromfluss an der Kammer des Supermoduls zu Beginn des Stromanstiegs bei der Messung 6.21.

9 Literaturverzeichnis

- [ALI12] **ALICE**: *ALICE Website*, <http://aliweb.cern.ch>, zuletzt eingesehen am 26.11.2014
- [Bae05] **H. D. Baehr**: *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendung*, Springer, 2005
- [CeC08] **Cern Courier**: *ALICE: The heavy-ion challenge*, 19.09.2008
- [CeH99] **Cerbe, Hoffmann**: *Einführung in die Thermodynamik*, Hanser, 1999
- [ChL1] **Chemie Lexikon**: *Universelle Gaskonstante*, http://www.chemie.de/lexikon/Universelle_Gaskonstante.html
- [DWd14] **Deutscher Wetterdienst**: *Wetterlexikon: Definition des Taupunktes*, <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=T&DAT=Taupunkt>
- [Edg1] **Edgetech**: *DewMaster Chilled Mirror Hygrometer Operators Manual*
- [For08] **Matthias Forkel**: *Die Luftfeuchtigkeit und Wolkenbildung*, 09.03.2008,
- [Gas] **Aufdruck auf den Gasflaschen**
- [Ham12] **Patrick Hamers**: *Taupunktregulation in einem Detektorgassystem S.9-13*, Bachelor Arbeit Wilhelms-Universität Münster, 2012
- [IOP08] **IOP Science**: *The ALICE experiment at the CERN LHC*, 14.08.2008
- [Jac02] **Klassische Elektrodynamik**: *John David Jackson*, de Gruyter, 2002
- [LuR12] **Luftentfeuchter Ratgeber**: *Aufbau und Funktionsweise der Kundens-Luftentfeuchter*, <http://www.luftentfeuchter-ratgeber.de/artikel-im-test/aufbau-und-funktionsweise-kondens-luftentfeuchter-im-test>, zuletzt eingesehen 02.12.14
- [Men13] **Menschenwetter**: *Mit der Hitze kommt die Schwüle*, 16.06.2013, http://www.menschenwetter.de/editorial_articles/show/703/mit-der-htze-kommt-die-schwule <http://www.m-forkel.de/klima/wolkem.html>
- [Son90] **Dietrich Sonntag**: *Important new Values of the Physical Constants*, 1990
- [Spe14] **Spektrum**: *Quark-Gluonen-Plasma*, Lexikon der Astronomie, <http://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/quark-gluonen-plasma/379>
- [TDR10] **ALICE TRD**: *Technical Design Report*, CERN/LHC, 26.03.2010

Danksagung

Als Abschluss dieser Arbeit möchte ich mich gerne bei einigen Leuten bedanken. Zunächst einmal bei der AG Wessels und im speziellen bei Herrn Prof. Dr. Wessels, dass ich diese Bachelor-Arbeit in dieser Arbeitsgruppe schreiben konnte. Außerdem gilt mein Dank dem Team aus der TRD-Halle. Das Arbeitsklima dort war sehr schön und es hat mir spaß gemacht beim Bau der Supermodule zu helfen. Ebenso war es eine schöne Erfahrung beim Bau eines Detektors in dieser Größenordnung mit zu wirken. Mein spezieller Dank geht an Dr. Bastian Bathen, der mir bei der Umsetzung der Bachelor-Arbeit sehr geholfen hat, sowohl was die inhaltliche Arbeit betrifft, als auch der Umgang mit dem Programm root.

Außerdem geht mein Dank auch an meine Freunde und Familie, die mich stets ermutigt haben meine Arbeit weiter fortzuführen. Besonders betrifft dies meine Freundin Nina und meine Eltern.

Zuletzt möchte ich auch noch meinem ehemaligen Physiklehrer Dr. PD. Juri Rolf danken, sowie unserem Physik/Poker LK. Ohne diese Menschen hätte ich vermutlich nicht Physik studiert.

Plagiatserklärung des Studierenden

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über Taupunktmessungen an Übergangsstrahlungsdetektoren des ALICE-Experimentes 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.

(Datum, Unterschrift)

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.

(Datum, Unterschrift)