

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

Taupunktregulation in einem Detektorgassystem

Dew Point Regulation of a Detector Gas System

Bachelorarbeit in Physik

**eingereicht von
Patrick Hamers**

**Korrektoren:
Prof. Dr. Johannes P. Wessels
Dr. Tom Dietel**

— Mai 2012 —

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Das ALICE-Experiment	4
2.1 Grundlegendes zum ALICE-Experiment	4
2.2 Quark-Gluon-Plasma	5
3 Übergangsstrahlungsdetektoren (TRDs)	6
3.1 Prinzip und Entstehung der Übergangsstrahlung	6
3.2 Aufbau und Anwendung der Übergangsstrahlungsdetektoren bei ALICE	6
4 Physikalische Grundlagen	8
4.1 Ideale Gas-Dampf-Gemische (Dalton'sches Gesetz)	8
4.2 Sättigung idealer Gas-Dampf-Gemische, Dampfdruckkurven	8
4.3 Der Taupunkt	10
4.4 Berechnung des Sättigungsdampfdruckes	10
4.4.1 Antoine-Gleichungen	10
4.4.2 Magnus-Formeln	11
4.4.3 Sättigungsdampfdruck nach Sonntag	11
4.4.4 Poynting-Korrekturen	11
4.4.5 Parametersätze und Gültigkeitsbereiche der Gleichungen zur Berechnung des Sättigungsdampfdrucks	12
4.5 Das Volumenmischungsverhältnis χ_V in ppm _V	13
5 Der DewMaster - Chilled Mirror Hygrometer	15
5.1 Einleitende Beschreibung	15
5.2 Funktionsweise des OCM	16
5.3 Hinweise zur Kontrolleinheit	17
5.4 Hinweise zum Betrieb des Messgerätes	18
6 Das Regulatorsystem	22
7 Qualität des Regulatorsystems, Durchgeführte Messungen	25
8 Auswertung der Messungen	26
8.1 Messung mit konstanter Flussrate 1:0:100 l/h	26
8.2 Messung mit konstanter Flussrate 0,6:0:20 l/h	31
8.3 Messung mit variablen Flussraten	32
8.3.1 Eichung der Flussregler	32
8.3.2 Flexibilität des Regulatorsystems	35
8.3.3 Fortgesetzte Langzeitmessung mit konstanter Flussrate 0,2:0:20 l/h	38

9 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick	40
Literatur	42

1 Einleitung

Der Taupunkt T_D eines Gases ist definiert als diejenige Temperatur, an dem das im Gas enthaltene Wasser auf einer Oberfläche zu kondensieren beginnt bzw. aus dem Gas ausfällt. Für Temperaturen unterhalb von 0 °C spricht man zudem vom Frostpunkt. Der Taupunkt steht eng im Zusammenhang mit unterschiedlichen thermodynamischen Größen wie der relativen und absoluten Feuchte, dem Wassergehalt oder auch den Partialdrücken eines Gases. Da der Taupunkt vergleichsweise einfach zu messen ist, bietet er damit eine gute Grundlage zur Bestimmung der o.g. oder auch weiterer Größen. Eine mögliche Messmethode, die auch in dem in dieser Arbeit verwendeten Gerät, dem *DewMaster* der Firma *EdgeTech* verwendet wird, ist die OCM-Methode (**optical chilled mirror**). Allgemein findet die Thematik rund um den Taupunkt in vielerlei Bereichen Anwendung, darunter sowohl in alltäglichen als auch wissenschaftlichen oder industriellen Situationen. Ein bekanntes Anwendungsbeispiel im Alltag sind sogenannte Hygrometer, die zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit und weiterer meteorologischer Größen verwendet werden. In der Industrie findet der Taupunkt z.B. im Bereich von Klimaanlagen Anwendung. Wird warme, feuchte Luft in der Klimaanlage zu stark abgekühlt, kann es zur Kondensation im Gerät kommen. Um dies zu vermeiden, wird die Luft meist vorgetrocknet, bevor sie abgekühlt wird (vgl. [Dem08], S. 344). Ein wissenschaftliches Beispiel und gleichzeitig auch Teil der Motivation dieser Arbeit ist die Untersuchung der Driftgeschwindigkeiten von Elektronen in Detektorgasen, abhängig von dessen Wassergehalt. Konkret handelt es sich dabei um das Detektorgas der sogenannten TRDs (Transition **R**adiation **D**etector), spezielle Gasdetektoren, die u.a. im ALICE-Experiment am LHC (**L**arge **H**adron **C**ollider) von CERN Anwendung finden. Um die Untersuchung der Driftgeschwindigkeit von Elektronen in Detektorgasen zu ermöglichen bzw. zu erleichtern, soll daher im Zuge dieser Arbeit eine Apparatur zur Taupunktregulation und damit zur Regulation des Wassergehalts von Detektorgasen konstruiert werden.

Im zweiten Kapitel sollen einige Informationen bezüglich des ALICE-Experiments am LHC und dem dort untersuchten Quark-Gluon-Plasma genannt werden. Das dritte Kapitel dient der genaueren Beschreibung der Übergangsstrahlungsdetektoren (TRDs), welche letztlich das zu untersuchende Detektorgas enthalten. Die nötigen physikalischen Grundlagen zum Verständnis angestellter Berechnungen werden im vierten Kapitel erläutert. Im fünften Kapitel werden das verwendete Messgerät zur Taupunktbestimmung, der *DewMaster* der Firma *EdgeTech* und dessen Funktionalität beschrieben. Das sechste Kapitel dient der Erläuterung des aufgebauten Regulatorsystems, während im siebten Kapitel auf durchgeführte Messungen zur Bestimmung der Qualität des Regulatorsystems eingegangen wird. Die Auswertung dieser Messungen geschieht im achten Kapitel. Im neunten Kapitel werden die gewonnenen Ergebnisse diskutiert und in einem Fazit zusammengetragen. Ein Ausblick auf eventuelle Ausbesserungen oder Veränderungen am Aufbau sowie auf weitere mögliche Messungen wird ebenfalls im neunten Kapitel angestellt.

2 Das ALICE-Experiment

2.1 Grundlegendes zum ALICE-Experiment

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) ist ein am CERN LHC lokalisiertes Experiment zur physikalischen Grundlagenforschung. Beteiligt sind mitunter über 1000 Physiker aus 105 Instituten in 30 Ländern. Dabei geht es hauptsächlich um die Untersuchung des sogenannten Quark-Gluon-Plasmas, einem Materiezustand, in dem Quarks und Gluonen sich quasi-frei bewegen können (siehe Kapitel 2.2).

Der experimentelle Aufbau besteht aus mehreren Teilchendetektoren, die zumeist zylinderförmig um die Beschleunigerbahn bzw. das Kollisionszentrum der beschleunigten Teilchen aufgebaut sind. Insgesamt nimmt das Experiment Dimensionen von $16 \times 16 \times 26$ m³ an und wiegt dabei ungefähr 10000 t (vgl. [Aam08], S. 1f.).

In der folgenden Abbildung ist dieser Aufbau schematisch gezeigt.

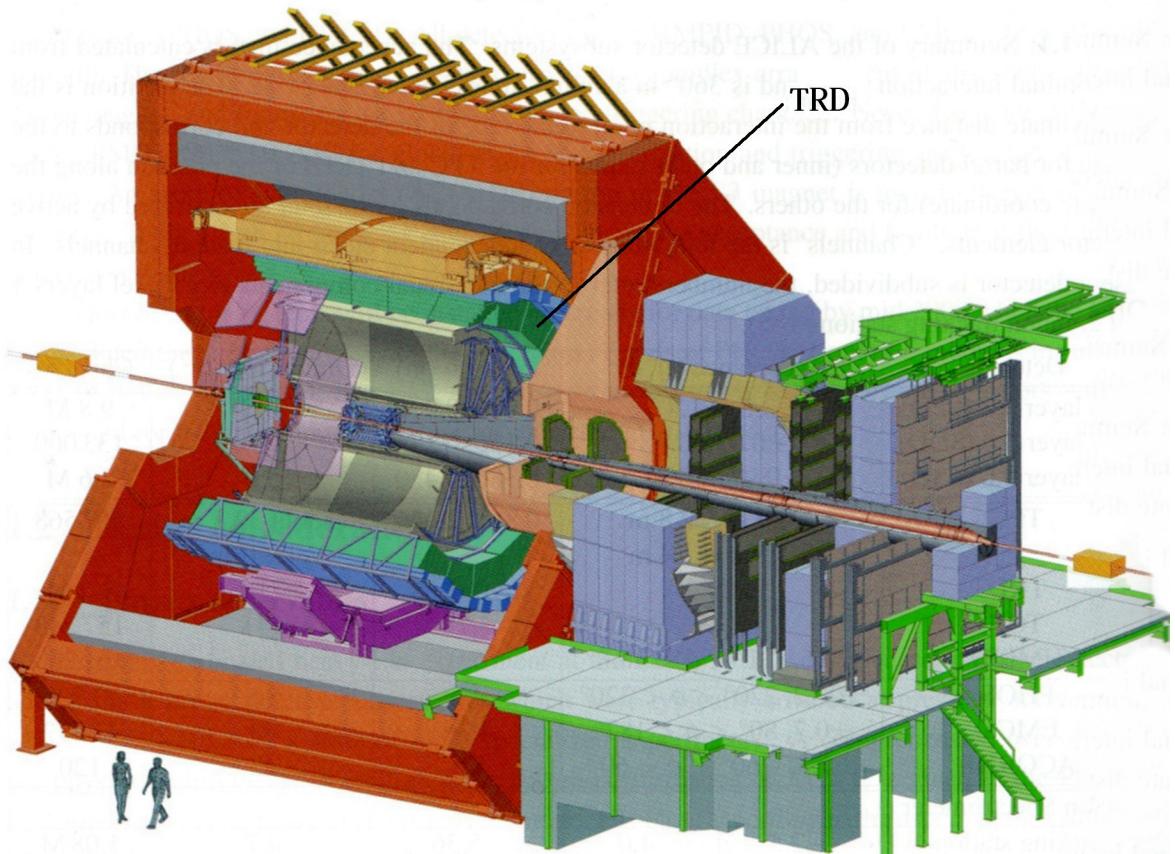


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des ALICE-Experiments mit markiertem TRD-Zylinder (grün) (Original entnommen aus [Aam08], S. 4)

2.2 Quark-Gluon-Plasma

Quark-Gluon-Plasma beschreibt den Materiezustand, in dem Quarks und Gluonen nicht unter den Auswirkungen des Confinement stehen, sie bewegen sich also quasi-frei. Damit Quark-Gluon-Plasma entstehen kann, werden extrem hohe Energie- und Teilchendichten sowie Temperaturen benötigt. In der Natur war dieses Szenario kurz nach dem Urknall ($t < 10^{-6}$ s) bei einer Temperatur $T > 10^{12}$ K realisiert (vgl. [Wei09], S.9). Mithilfe moderner Teilchenbeschleuniger wie dem LHC kann heutzutage ein Quark-Gluon-Plasma auch auf der Erde geschaffen werden. Dazu werden Blei-Kerne nahezu auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und anschließend zur Kollision gebracht. Nach dem Zusammenstoß der Kerne entkoppeln Quarks und Gluonen, sodass für sehr kurze Zeit das Quark-Gluon-Plasma entsteht. U.a. durch den großen inneren Druck dehnt sich das Plasma dann aus und kühlt dabei soweit ab, dass das Deconfinement nach kurzer Zeit wieder aufgehoben ist und die Quarks und Gluonen erneut aneinander gebunden sind (vgl [Sat11], S. 2f.).

3 Übergangsstrahlungsdetektoren (TRDs)

3.1 Prinzip und Entstehung der Übergangsstrahlung

Hochrelativistische, geladene Teilchen erzeugen bei ihrer Bewegung durch ein Material ein elektrisches Feld, das von der Teilchenbewegung und materialspezifischen Parametern wie der Permittivität ϵ abhängt. Verläuft die Bewegung des Teilchens durch zwei unterschiedliche Materialien mit den Permittivitäten ϵ_1 und ϵ_2 , muss im Bereich der Grenzfläche der Materialien das elektrische Feld angepasst bzw. umgewandelt werden (vgl. [Dem04], S. 35f.). Dies geschieht durch die Aussendung von Übergangsstrahlung in Form von Photonen, dessen Aussendungswahrscheinlichkeit vom Lorenz-Faktor $\gamma = \frac{E}{mc^2}$ abhängt.

3.2 Aufbau und Anwendung der Übergangsstrahlungsdetektoren bei ALICE

Die englische Bezeichnung für einen Übergangsstrahlungsdetektor ist **Transition Radiation Detector**, kurz TRD. Ein TRD besteht allgemein aus einem Radiator, gefolgt von einer (mit Gas gefüllten) Driftkammer mit Verstärkungsregion und einer Ausleseelektronik (siehe Abb. 2).

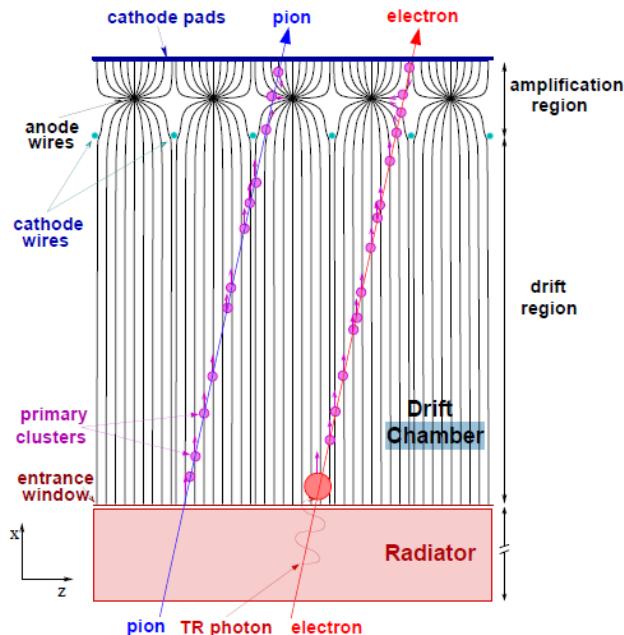


Abbildung 2: Skizzierter Ausschnitt eines TRDs mit einfallendem Elektron und Pion (entnommen aus [Aam08], S. 69)

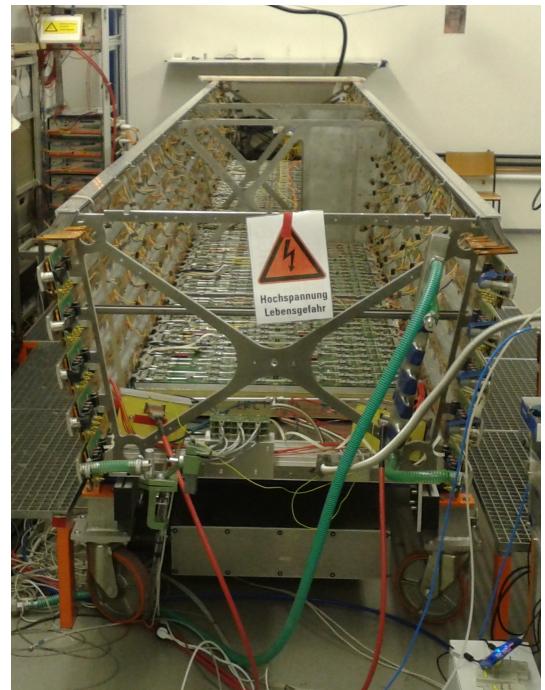


Abbildung 3: Ein Super-Modul mit einer eingebauten Lage.

3 ÜBERGANGSSTRAHLUNGSDETEKTOREN (TRDS)

Findet nun ein Teilchen seinen Weg durch den TRD, entsteht im Radiator Übergangsstrahlung, die im Bereich der Driftkammer Gas-Atome ionisiert. Das einfallende Teilchen ionisiert zudem ebenfalls Gasatome. Die bei der Ionisierung entstehenden Elektronen werden durch das elektrische Feld der Kathodendrähte angezogen und danach bei lawinenartiger Verstärkung zu den Anodendrähten hin beschleunigt. Hier werden die Elektronen abgenommen und die Ionenrümpfe driften weiter zu den Kathodenpads, wo sie in ein Spannungssignal umgewandelt und anschließend ausgelesen werden können.

Die im ALICE-Experiment verwendeten TRDs dienen hauptsächlich dem Nachweis von Elektronen mit Impulsen größer als $1 \text{ GeV}/c$ und dessen Separation von Pionen (vgl. [Aam08], S. 66). Dabei werden insgesamt 18 Super-Module (siehe Abb. 3) verwendet, jedes bestehend aus 30 Einzelmodulen (fünf Lagen mit jeweils sechs Modulen). Insgesamt werden somit also 540 Module verwendet, die zylinderförmig um die Beschleunigerbahn (siehe Abb. 1) angebracht sind.

4 Physikalische Grundlagen

4.1 Ideale Gas-Dampf-Gemische (Dalton'sches Gesetz)

Unter einem Gas-Dampf-Gemisch versteht man eine Mischung zweier Gase, von denen eines im Rahmen der Untersuchung kondensieren kann, während das andere in seiner Form unverändert bleibt. Das kondensierbare Gas, zumeist Wasser(dampf), wird dabei als *Dampf* bezeichnet, wohingegen die andere Komponente als (ideales) *Gas* behandelt wird. In der Natur kann z.B. feuchte Luft als ideales Gas-Dampf-Gemisch angesehen werden (vgl. [Bae05], S. 283f.).

Zur Beschreibung idealer Gas-Dampf-Gemische ist das Verständnis der vorkommenden Drücke von essentiell Belang. Der Gesamtdruck einer Mischung aus k Komponenten setzt sich nach dem DALTON'schen Gesetz (siehe [Gri10]) aus den einzelnen Drücken (Partialdrücken) der jeweiligen Komponenten zusammen, wenn diese alleine das betrachtete Volumen V ausfüllten. Es gilt also

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

wobei p_i den Partialdruck der i -ten Komponente und p den Gesamtdruck bezeichnet.

Unter Ausnutzung der idealen Gasgleichung

$$pV = mR_sT = m \frac{R}{M} T \quad (4.2)$$

mit der Masse m , der spezifischen Gaskonstanten $R_s = \frac{R}{M}$ mit der universellen Gaskonstanten R und der molaren Masse M , dem Volumen V und der Temperatur T ergibt sich schließlich für den Gesamtdruck

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

Im Falle von feuchter Luft, bestehend aus N_2 , O_2 , Ar , CO_2 und Wasserdampf wäre der Gesamtdruck also gegeben durch

$$p = \underbrace{p_{\text{N}_2} + p_{\text{O}_2} + p_{\text{Ar}} + p_{\text{CO}_2}}_{p_{\text{Luft,trocken}}} + p_W \quad (4.4)$$

Der Partialdruck des Wasserdampfes p_W wird im Folgenden mit dem in der Literatur gängigeren Ausdruck **Dampfdruck** bezeichnet.

4.2 Sättigung idealer Gas-Dampf-Gemische, Dampfdruckkurven

Die große Frage im Bezug auf Gas-Dampf-Gemische ist nun, wann der enthaltene Dampf zu kondensieren beginnt. Dazu wird zunächst ein ungesättigtes ideales Gas-Dampf-Gemisch betrachtet. Führt man diesem Gemisch isotherm Wasserdampf hinzu (siehe Abb. 4), steigen

nach Gl. (4.2) sowohl der Dampfdruck als auch die Masse des im Gemisch enthaltenen Wasserdampfes. Dies lässt sich so lange durchführen, bis bei einer kritischen Masse der Dampf zu kondensieren beginnt. Man spricht nun von einem gesättigten Gas-Dampf-Gemisch, indem der Dampfdruck maximal wird. Der maximale oder auch gesättigte Dampfdruck wird ferner auch als Sättigungsdampfdruck p_{WS} bezeichnet. Alle möglichen Sättigungswerte liegen auf der sogenannten Dampfdruckkurve und werden durch diese allgemein beschrieben.

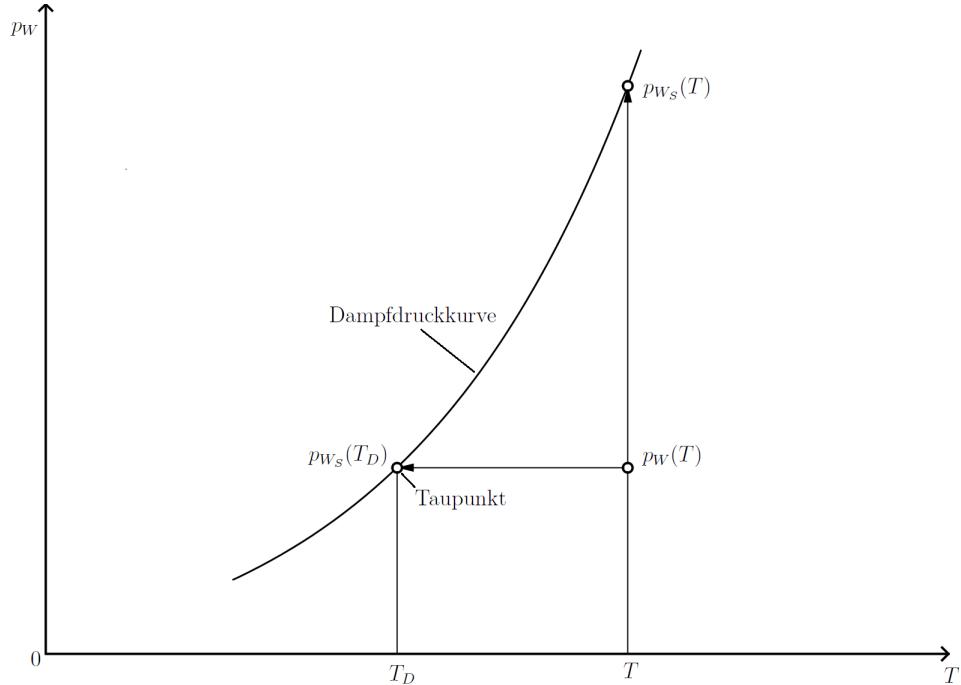


Abbildung 4: Ausschnitt einer Dampfdruckkurve eines idealen Gas-Dampf-Gemisches. Isotherme Zufuhr von Dampf, isobare Abkühlung des Gemisches oder eine Kombination aus beidem führen zu dessen Sättigung.

Eine weitere Möglichkeit, das Gemisch zu sättigen, besteht in dessen isobarer Abkühlung. Der Dampfdruck und die Masse des Dampfes bleiben dabei solange konstant, bis die Dampfdruckkurve von der Isobaren geschnitten wird, bzw. wenn $p_W = p_{WS}$ gilt. Dann beginnt der Dampf zu kondensieren. Die Temperatur, bei der die Kondensation startet, wird als Taupunkttemperatur T_D oder kurz als Taupunkt bezeichnet. Jedem Zustand bis zum kritischen Punkt¹ ungesättigter, feuchter Gase kann deshalb eine Taupunkttemperatur zugeordnet werden, die sich aus

$$p_{WS}(T_D) = p_W \quad (4.5)$$

¹Ab dem kritischen Punkt sind die flüssige und gasförmige Phase nicht mehr unterscheidbar. Der Begriff der Sättigung kann deshalb in diesem überkritischen Gebiet nicht angewandt werden (siehe auch [Nic11], S. 60f.).

bestimmen lässt (vgl. [Bae05], S. 286f.).

4.3 Der Taupunkt

Der Taupunkt T_D ist formal als diejenige Temperatur definiert, bei der der Dampfdruck eines Gasgemisches gerade gesättigt ist, also wenn Gleichung (4.5) gilt. Im Experiment bedeutet dies die Temperatur, bei der die Kondensation einsetzt. Speziell für Temperaturen im Bereich des Tripelpunkts von Wasser $T_{tr} = 273,16$ K und unterhalb dessen kann sich neben Kondenswasser in Form von Nebel oder flüssigem Niederschlag auch Eisnebel bzw. Reif bilden (vgl. [Bae05], S. 287). Der Taupunkt steigt mit zunehmendem Wasserdampfgehalt (größer werdenden Dampfdrücken) eines Gemisches an, ist jedoch stets kleiner als bzw. gleich der Umgebungstemperatur ($T_D \leq T$). Eine explizite Abhängigkeit des Taupunktes von der Umgebungstemperatur ist zudem nicht gegeben.

4.4 Berechnung des Sättigungsdampfdruckes

Der Sättigungsdampfdruck p_{WS} verschiedener Gase kann vergleichsweise einfach über die sogenannte ANTOINE-Gleichung und die MAGNUS-Formeln bestimmt werden. Eine komplexere Gleichung zur Bestimmung des Sättigungsdampfdruckes kann in [Son90] gefunden werden. Weitere Berechnungsfunktionen sind z.B. bei WAGNER 1973 oder MC GARRY 1983 zu finden. Alle Gleichungssätze stützen sich zudem auf empirisch zu bestimmende, materialspezifische Parameter, sodass die Genauigkeit der Ergebnisse mit den verwendeten Parametersätzen variieren kann. Weiterhin gelten die meisten Bestimmungsgleichungen nur für reine Stoffe. Feuchte Luft wäre beispielsweise kein reiner Stoff, da der Wasserdampf nicht von der Luft isoliert ist. Dieses Problem wird durch sogenannte Korrekturfaktoren (auch POYNTING-Korrektur nach [Bae05], S. 278) $\pi_W(T, p)$ (siehe Kapitel 4.4.4) behoben. Da in der praktischen Anwendung meist Wasser die kondensierbare Komponente des Gas-Gemisches ist, sind die Parametersätze der folgenden Gleichungen daran angepasst. Ist ein anderer Stoff als Wasser das kondensierbare Element, müssen die entsprechenden Parameter angepasst werden².

4.4.1 Antoine-Gleichungen

Die experimentell ermittelten Ergebnisse für verschiedenste Dampfdruckkurven p_{WS} steigen mit zunehmender Temperatur sehr stark an, sodass Ansatzfunktionen der Form

$$p_{WS} = p_0 e^{f(T)} \quad \text{bzw.} \quad \ln \frac{p_{WS}}{p_0} = f(T) \quad (4.6)$$

sinnvoll erscheinen. ANTOINE verwendete für seine Berechnungen eine Gleichung der Form

$$\ln \frac{p_{WS}}{p_0} = A - \frac{B}{T + C} \quad (4.7)$$

²Eine Vielzahl an Parametern der ANTOINE-Gleichung für unterschiedliche Stoffe kann z.B. bei [NIST] gefunden werden.

mit drei materialspezifischen Parametern A , B und C und der Temperatur T in K, die unter der Annahme gewisser Näherungen aus der CLAUSIUS-CLAPEYRON-Gleichung gewonnen werden kann (vgl. [Bae05], S. 203f.).

Sinnvolle Parametersätze im Rahmen dieser Arbeit können im Kapitel 4.4.5 nachgeschlagen werden.

4.4.2 Magnus-Formeln

Die MAGNUS-Formeln sind vom Typ her ähnlich der ANTOINE-Gleichung gegeben durch

$$\ln p_{WS} = \ln A + \frac{B \cdot t}{C + t} \quad (4.8)$$

mit der Temperatur t in °C. Dabei wird zudem unterschieden, ob der Sättigungsdampfdruck über ebenem Eis oder ebenem Wasser zu berechnen ist. Entsprechende Parametersätze sind ebenfalls in Kapitel 4.4.5 zu finden.

4.4.3 Sättigungsdampfdruck nach Sonntag

Analog zu den MAGNUS-Formeln wird auch bei [Son90] zwischen dem Sättigungsdampfdruck über ebenem Eis oder ebenem Wasser unterschieden. Die Formeln zur Berechnung des Sättigungsdampfdrucks in hPa sind gegeben durch

$$\ln p_{WS} = A + B \cdot T^{-1} + C \cdot 10^{-2} T + D \cdot 10^{-5} T^2 + E \ln T \quad (4.9)$$

mit materialspezifischen Konstanten A , B , C , D und E und der Temperatur T in K.

4.4.4 Poynting-Korrekturen

Wie bereits erwähnt müssen temperatur- und druckabhängige Korrekturen $\pi_W(T, p)$ am Sättigungsdampfdruck vorgenommen werden, wenn dieser nicht für ein sich in einer reinen Phase befindliches Element bestimmt wurde. Dies kann nach [Bae05]³ über die Gleichung

$$\pi_W(T, p) = \exp \frac{V_W(T)}{R_W T} [p - p_{WS}(T)] \quad (4.10)$$

oder nach SONNTAG 1989 über die Approximierung

$$\pi_W(p) \approx 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6} p - \frac{0,074}{p} \quad (4.11)$$

geschehen. Dabei bezeichnet V_W das spezifische Volumen des siedenden Wassers und p den Gesamtdruck in hPa.

Der wahre Sättigungsdampfdruck p_{WS} ist dann über

$$p_{WS} = p'_{WS} \pi_W(T, p) \quad (4.12)$$

³S. 285.

zu bestimmen, wobei p'_{W_s} den Sättigungsdampfdruck des Elements in der reinen Phase bezeichnet.

Da die POYNTING-Korrektur nur schwach von Druck und Temperatur abhängt, ergeben sich meist nur Korrekturen im Promille-Bereich. Am Beispiel von Luft bei Atmosphärendruck $p = 1013,25$ hPa ergibt sich nach Gl. (4.11) die POYNTING-Korrektur zu $\pi_W(p) = 1,0047$. Je nachdem, wie genau der Sättigungsdampfdruck also zu bestimmen ist, bietet es sich deshalb an, die POYNTING-Korrektur gegebenenfalls zu vernachlässigen.

4.4.5 Parametersätze und Gültigkeitsbereiche der Gleichungen zur Berechnung des Sättigungsdampfdrucks

Die folgenden Tabellen beinhalten mögliche Parametersätze zur Berechnung des Sättigungsdampfdrucks p_{W_s} (bei ANTOINE und MAGNUS in Pa, bei SONNTAG in hPa) mit Wasser als kondensierbarer Komponente und deren Gültigkeitsbereiche. Für Wasser ist der Druck p_0 zudem stets als Tripelpunktsdruck $p_0 = p_{tr} = 611,657$ hPa zu wählen. Die Temperatur t ist in °C, T in K zu wählen.

Die Parametersätze für die Gleichungen von MAGNUS und SONNTAG gelten nur für Wasserdampf in der reinen Phase. Der wahre Sättigungsdampfdruck kann nach 4.12 durch Multiplikation mit der entsprechenden POYNTING-Korrektur bestimmt werden.

Gleichung	Parameter				
	A	B	C	D	E
ANTOINE (4.4.1)	17,2799	4102,99	237,431	-	-
	22,5129	6149,62	0	-	-
MAGNUS (4.4.2)	611,2	17,62	243,12	-	-
	611,2	22,46	272,62	-	-
SONNTAG (4.4.3)	16,635794	-6096,9385	-2,711193	1,673952	2,433502
	24,7219	-6024,5282	1,0613868	-1,3198825	-0,49382577

Tabelle 1: Quellen: ANTOINE [Bae05], S. 287 ; MAGNUS, SONNTAG [Son90], S. 342f.

Der Gültigkeitsbereich der einzelnen Gleichungen und deren größte Messunsicherheit (die Messgenauigkeit des *DewMaster* ist $\Delta T_D = 0,2$ °C, siehe Kapitel 5.1, Tabelle 3) ist dabei wie folgt gegeben:

Gleichung	Gültigkeitsbereich	Messunsicherheit
ANTOINE	$0,01 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t \leq 60 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\leq 2,68 \text{ \%}$
	$223,16 \text{ K} \leq T \leq 273,16 \text{ K}$	$\leq 2,53 \text{ \%}$
MAGNUS	$-45 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t \leq 60 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (über Wasser)}$	$\leq 1,47 \text{ \%}$
	$-65 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t \leq 0,01 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (über Eis)}$	$\leq 1,68 \text{ \%}$
SONNTAG	$173,15 \text{ K} \leq T \leq 373,15 \text{ K} \text{ (über Wasser)}$	$\leq 4,08 \text{ \%}$
	$173,15 \text{ K} \leq T \leq 273,16 \text{ K} \text{ (über Eis)}$	$\leq 4,26 \text{ \%}$

Tabelle 2: Fortsetzung von Tabelle 1.

4.5 Das Volumenmischungsverhältnis χ_V in ppm_V

Das Volumenmischungsverhältnis χ_V in ppm_V ist definiert als der Quotient zwischen dem Dampfvolumen V_W und dem Gesamtvolumen des trockenen Gases $V_{\text{Gas,trocken}}$ multipliziert mit dem Faktor 10^6

$$\chi_V = \frac{V_W}{V_{\text{Gas,trocken}}} \cdot 10^6 \text{ ppm}_V. \quad (4.13)$$

Es gibt an, welchen Volumenanteil das Wasser am trockenen Gas des Gas-Dampf-Gemisches inne hat⁴. In anderen Worten kann das Volumenmischungsverhältnis auch als Angabe für den Wassergehalt eines Gases bezogen auf das Volumen betrachtet werden.

Mithilfe des Gesetzes von DALTON (4.1) und der idealen Gasgleichung (4.2) können die Volumina durch Drücke ersetzt werden uns es ergibt sich

$$\chi_V = \frac{p_W}{p_{\text{Gas,trocken}}} \cdot 10^6 \text{ ppm}_V = \frac{p_W}{p - p_W} \cdot 10^6 \text{ ppm}_V \quad (4.14)$$

mit dem Gesamtdruck p , dem Dampfdruck p_W und dem Druck der trockenen Luft $p_{\text{Gas,trocken}}$ (siehe auch [Web02], S. 13f.).

Unter Ausnutzung der Tatsache, dass die Dampfdruckkurve $p_W(T)$ bei der Temperatur T gleich der Sättigungsdampfdruckkurve $p_{W_S}(T_D)$ am Taupunkt T_D (siehe Gl. 4.5) ist, kann die Gleichung für das Volumenverhältnis überführt werden in die finale Form

$$\chi_V = \frac{p_{W_S}(T_D)}{p - p_{W_S}(T_D)} \cdot 10^6 \text{ ppm}_V. \quad (4.15)$$

Es fällt auf, dass bei Gas-Dampf-Gemischen mit nur jeweils einer Komponente Gas und Dampf das Volumenmischungsverhältnis unabhängig von der Gasart ist. Lediglich der Ge-

⁴Ein Volumenmischungsverhältnis bezüglich des nassen Gases wäre ebenfalls möglich und resultierte in $\chi'_V = \frac{p_{W_S}(T_D)}{p}$. Die Abweichungen von χ_V und χ'_V sind bei Atmosphärendruck und Taupunkten bis $-20 \text{ } ^\circ\text{C}$ jeoch kleiner als 1 ppm_V , bei Taupunkten bis $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ kleiner als 40 ppm_V .

samt druck des (feuchten) Gemisches und der vom Taupunkt abhängige Sättigungsdampfdruck gehen in die Berechnung ein.

Im Anhang können Tabellen mit einigen Werten für verschiedene Sättigungsdampfdrücke nach ANTOINE, MAGNUS und SONNTAG sowie Volumenmischungsverhältnisse und den entsprechenden Taupunkten gefunden werden⁵.

⁵Die Messunsicherheiten $\Delta\chi$ und Δp_{W_s} wurden nach der Fehlerfortpflanzung bestimmt, wobei $\Delta T_D = 0,2$ °C.

5 Der DewMaster - Chilled Mirror Hygrometer

5.1 Einleitende Beschreibung

Der *DewMaster* der Firma EdgeTech ist ein Gerät zur Messung des Taupunkts und der Bestimmung weiterer vom Taupunkt abhängiger Größen wie z.B. Feuchte und Wassergehalt einer Gaskonfiguration. Gemessen wird dabei nach der Methode des **optical chilled mirrors** (OCM) (siehe dazu auch Kapitel 5.2).

Das Gerät selbst besteht aus einem Taupunktsensor und einer elektronischen Kontrolleinheit (siehe Abb. 5), welche nebstd der Taupunktmessung die Berechnung weiterer Größen übernimmt. Über drei analoge Ausgänge und eine serielle Schnittstelle können zudem Messdaten an einem Computer ausgelesen werden. Der zeitliche Abstand zweier Messwerte kann dabei über den Computer, nicht aber über den DewMaster selbst, geregelt werden⁶.

Sensor:

- (1) externe Lüfterkühlung
- (2) externer Kühlmantel
- (3) Lüfteransteuerung
- (4) Gas-Ein- bzw. Auslass
- (5) Verbindung zur Kontrolleinheit

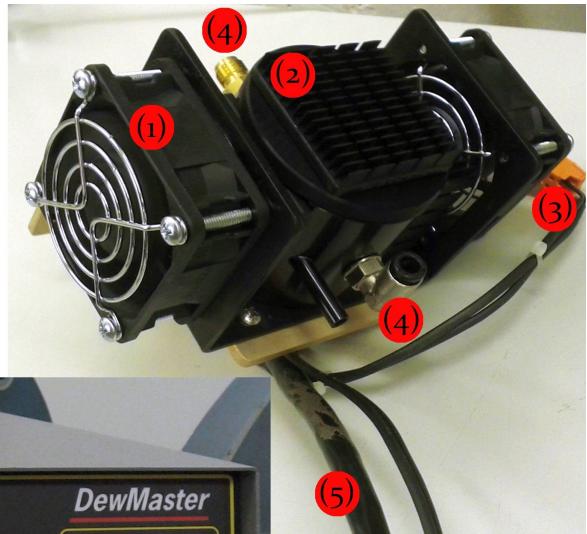


Abbildung 5: Der *DewMaster* bestehend aus Sensor (oben rechts) und Kontrolleinheit (unten links).

⁶Über die serielle Schnittstelle wurde für alle angestellten Messungen jeweils ein Messwert pro Minute ausgegeben.

Der Taupunktsensor existiert in drei verschiedenen Versionen, welche in der folgenden Tabelle kurz erläutert sind.

Sensor	Messbereich	Depression Range	Slew Rate ($T > 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	Messgenauigkeit
S1	-20 $\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis 95 $\text{ }^{\circ}\text{C}$	45 $\text{ }^{\circ}\text{C}$	1,7 $\text{ }^{\circ}\text{C/s}$	0,2 $\text{ }^{\circ}\text{C}$
S2	-40 $\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis 95 $\text{ }^{\circ}\text{C}$	65 $\text{ }^{\circ}\text{C}$	1,7 $\text{ }^{\circ}\text{C/s}$	0,2 $\text{ }^{\circ}\text{C}$
S3	-75 $\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis 95 $\text{ }^{\circ}\text{C}$	95 $\text{ }^{\circ}\text{C}$	1,7 $\text{ }^{\circ}\text{C/s}$	0,2 $\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabelle 3: Eigenschaften der Sensoren S1, S2 und S3 bei Raumtemperatur ($T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Dabei gibt die *Depression Range* die maximale Kühltemperatur und die *Slew Rate* die Anstiegsrate der Abkühlung bzw. Erhitzung an (Werte entnommen aus [Edg1]).

Alle Sensoren verfügen zudem über einen Kühlmantel, der S3-Sensor weiterhin über zwei gehäusekühlende Lüfter. Das Anbringen weiterer Kühlmethoden wie z.B. einer Wasserkühlung ist ebenfalls möglich.

Der im Aufbau verwendete Sensor ist der S3-Sensor.

5.2 Funktionsweise des OCM

Nach Kapitel 4.3 ist der Taupunkt definiert als diejenige Temperatur, bei der Dampf in einem feuchten Gas-Dampf-Gemisch zu kondensieren beginnt. Hygrometer basierend auf der OCM-Methode machen sich dies zunutze. Dazu wird Licht über eine Lichtquelle (z.B. LED, Laser) auf einen Spiegel gesendet, welcher das einfallende Licht auf einen Photodetektor reflektiert (siehe Abb. 6).

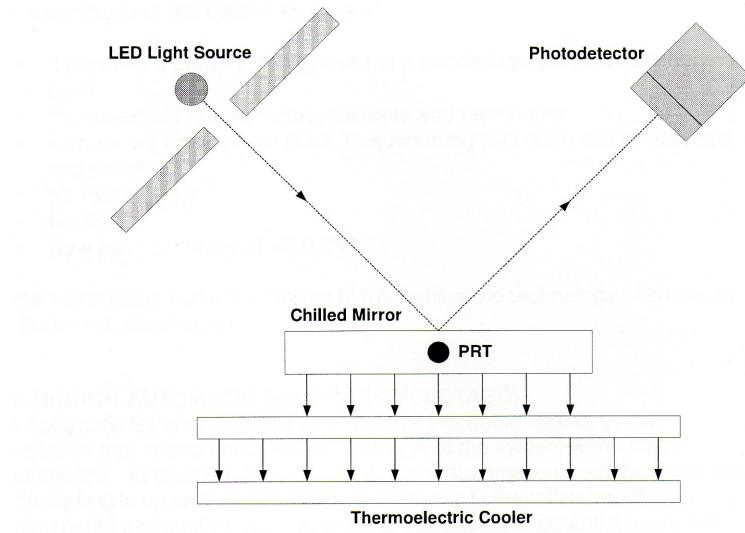


Abbildung 6: Schematische Darstellung des OCM-Sensors (entnommen aus [Edg2], S. 40).

Der Spiegel ist wiederum an ein Peltier-Element gekoppelt, welches den Spiegel stets auf die Temperatur heizt bzw. kühlt, bei der ein dünner Wasser- oder Eisfilm auf dem Spiegel vorhanden ist. Möglich ist dies über eine Kopplung des Peltier-Elements und des Photodetektors. Durch das entstehende Kondensat auf dem Spiegel wird das einfallende Licht gestreut und die registrierte Intensität am Photodetektor nimmt ab. Dieses Signal wird an einen Servo-Verstärker gesendet, welcher die Leistung des Peltier-Elements und damit dessen Temperatur regelt. Je nach gemessener Intensität am Photodetektor wird das Peltier-Element dann geheizt oder gekühlt, bis der Kondensatfilm auf dem Spiegel gerade noch vorhanden ist. Über die Messung der Temperatur des Spiegels, die nach obiger Definition nun der Taupunkttemperatur entspricht, kann also der Taupunkt gemessen werden (vgl. [Edg2], S. 40f.).

5.3 Hinweise zur Kontrolleinheit

Auf dem Display der Kontrolleinheit (siehe Abb. 5, unten links) können verschiedene Informationen angezeigt und abgelesen werden. Eine allgemeine Information über das aktuelle Datum und die Uhrzeit ist oben links und mittig auf dem Display zu sehen. Rechts daneben ist der aktuelle Zustand des Messgerätes angegeben (im Falle von Abb. 5 SERVOLOCK). Mögliche Zustände des Gerätes und deren Erläuterungen sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

angezeigter Zustand	Bedeutung
SERVOLOCK	Das Gerät hat den Taupunkt erfasst und der normale Betrieb ist eingestellt.
ABC: HEAT	Der Sensor wird im Zuge der automatischen Neustart (Balancing) erhitzt.
ABC: STABLE	Die Neustart des Sensors ist abgeschlossen.
CLEAN MIRROR	Eine manuelle Reinigung des Sensors ist nötig.
SEEKING DP	Das Gerät sucht nach dem Taupunkt.
MAX HEAT	Der Sensor wird (manuell) maximal erhitzt.
MAX COOL	Der Sensor wird (manuell) maximal abgekühlt.

Tabelle 4: Mögliche Sensorzustände und deren Bedeutungen (vgl. [Edg2], S. 29).

In der Mitte des Displays ist Platz für bis zu drei Messgrößen. Darunter fallen z.B. der Taupunkt, die relative Feuchte oder auch die ppm_V -Anzahl⁷.

Im unteren Teil des Displays ist eine Leiste zu sehen, die den aktuellen Taugehalt auf der Spiegeloberfläche angibt. Dabei wird der Spiegel durch die Leiste selbst repräsentiert und weiß gefüllte Kästchen stellen die Tauschicht dar. Bei erfolgnder Messung sollte der Taugehalt ca. zwei Drittel der Leiste bedecken (vgl. [Edg2], S. 30).

5.4 Hinweise zum Betrieb des Messgerätes

Eine allgemeine Übersicht über alle nötigen Informationen speziell den Messaufbau treffend kann in [Edg2], Kapitel 8 gefunden werden. Im Folgenden sollen die wichtigsten Bedienungshinweise für den verwendeten Aufbau dennoch kurz erläutert werden.

Taupunkt-Messungen unterhalb -18 °C: Liegt der Taupunkt einer Gaskonfiguration unterhalb -18 °C, muss besondere Vorsicht bei der Wahl der Gasleitungen getroffen werden. Nach [Edg2]⁸ bieten sich z.B. rostfreier Stahl, Kupfer, Teflon oder KEL-F an. Die meisten Kunststoffleitungen sind für diese Temperaturbereiche eher ungeeignet. Für eine dauerhafte Installation und Messungen tief liegender Taupunkte wird rostfreier Stahl als Gasleitungsmaterial empfohlen.

Temperatur des Gasleitungssystems: Falls der Taupunkt einer Gaskonfiguration sehr groß ist, ist darauf zu achten, dass das Gasleitungssystem stets wärmer als der Taupunkt ist. Ist dies nicht gegeben, kondensiert Dampf innerhalb des Systems aus und beeinträchtigt die Messung damit enorm. Eine Möglichkeit, dies zu verhindern, ist z.B. durch Vorheizen bzw. dauerhaftes Beheizen der Gasleitungen gegeben.

⁷Die weiteren anzeigbaren Größen sind die Umgebungstemperatur, die Kühlgrenztemperatur ("Wet Bulb Temperature"), der Umgebungsdruck in psia bzw. psig, Grains/lb oder, falls gewünscht, eine Leeranzeige. Zur Messung und Berechnung raumtemperaturabhängiger Größen wird ein optional erhältliches PRT-Thermometer benötigt.

⁸S. 14, 17.

Gasflussraten: Das zu untersuchende Messgas sollte im Sensor mit Flussraten zwischen 14 und 142 l/h (0,5 bis 5 SCFH) ankommen. Ist der Gasfluss zu hoch, kann die Stabilität der Messung und damit des kompletten Systems beeinträchtigt werden. Bei zu niedrigen Flussraten kann Umgebungsluft rückläufig in den Sensor eindringen und damit ebenfalls die Messung verfälschen. Diesem Problem kann jedoch leicht Abhilfe geschaffen werden, indem am Gas-Auslass des Sensors ein weiteres Stück Leitung (mehrere 10 cm bis Meter) angebracht wird.

Weiterhin ist der Gasfluss zu korrigieren, falls andere Gase als Luft und andere Drücke als Atmosphärendruck verwendet werden. Dazu dienen die folgenden Flusskorrektur-Diagramme:

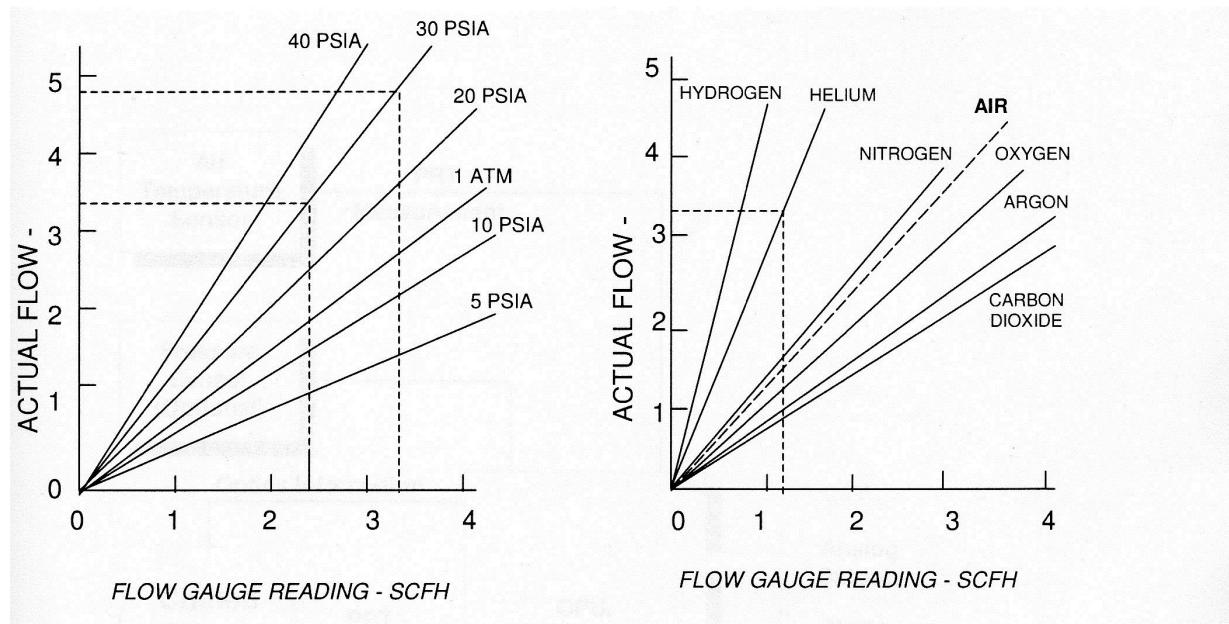


Abbildung 7: Flusskorrekturen für unterschiedliche Drücke und Gase (entnommen aus [Edg2], S. 21)

Antwort-Charakteristika des Gasleitungssystems auf Änderungen des Taupunkts: Wird das zu untersuchende Gas im Verlauf der Messung stärker befeuchtet oder getrocknet, kommt es zu einer Taupunktdifferenz. Abhängig vom verwendeten Leitungsmaterial und der Taupunktdifferenz zwischen altem und neuen Wert kann es dann eine Zeit lang dauern, bis der neue Taupunkt wieder akkurat gemessen wird. Dies liegt daran, dass die Leitungen materialspezifisch unterschiedlich viel Feuchtigkeit ab- bzw. desorbieren können (vgl. [Edg2], S. 17f.). Die Wartezeit kann auch als Totzeit des Sensors bezeichnet werden, da in dieser Zeit der exakte Taupunkt nicht bestimmt wird. In der folgenden Abbildung sind die Totzeiten verschiedener Materialien bei Taupunktdifferenzen von maximal 100° C graphisch dargestellt.

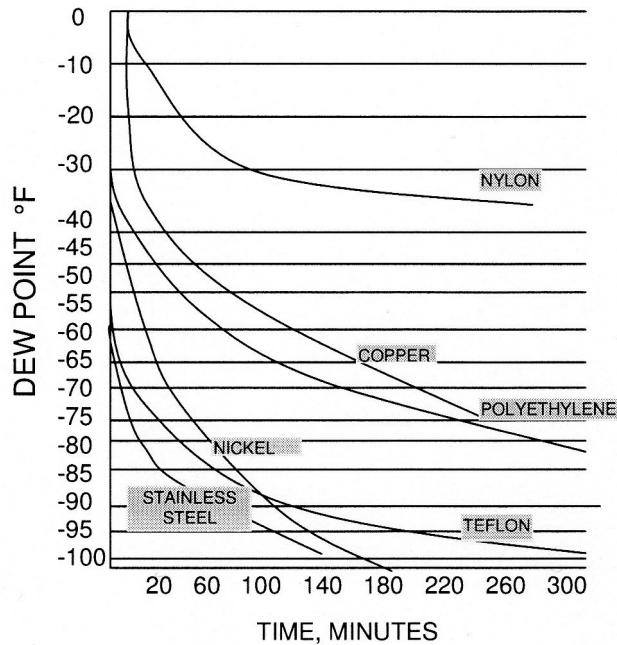


Abbildung 8: Totzeiten (entnommen aus [Edg2], S. 18).

Automatic Balance Cycle (ABC): Der sogenannte Automatic Balance Cycle (ABC) ist ein geräteinterner, elektronischer Justagemechanismus. Da sich im Laufe der Zeit Verunreinigungen auf dem Spiegel ablagern, würde die Intensitätsmessung (siehe Kapitel 5.2) zu falschen Ergebnissen und damit zu falschen Taupunkten führen. Dieses Problem wird durch den ABC behoben, indem die durch die Verunreinigungen abgeschwächte Intensität des Spiegels mit einem bei sauberer Spiegeloberfläche erhobenen Referenzwert verglichen wird. Beide Messwerte müssen dabei bei komplett trockener Spiegeloberfläche aufgenommen werden, um eventuelle Abweichungen durch kondensierten Dampf zu verhindern. Mittels starker Erhitzung des Sensors wird diese Trocknung im Gerät realisiert.

Über die Intensitätsabweichung kann nun eine Korrektur gebildet werden, die die Verunreinigung auf der Spiegeloberfläche kompensiert und somit wieder zu richtigen Ergebnissen führt (vgl. [Edg2], S. 41). Der ABC reduziert zudem die Notwendigkeit der manuellen Sensorreinigung⁹ drastisch, sodass die sonst übliche manuelle Reinigung alle 90 Tage zeitlich hinausgezögert werden kann. Wann eine manuelle Reinigung jedoch wirklich notwendig ist, wird nach einem ABC auf dem Display der Kontrollseinheit mit dem Zustand **CLEAN MIRROR** angezeigt.

Der ABC kann über die Bedienelemente der Kontrolleinheit sowohl einmalig gestartet als auch über das Menü der Kontrolleinheit fest programmiert werden. Dabei kann

⁹Für Informationen zur manuellen Sensorreinigung, siehe [Edg2], S. 43.

5 DER DEWMASTER - CHILLED MIRROR HYGROMETER

sowohl die Startzeit des ABC als auch eine periodische Wiederholung des Zyklus gewählt werden. Eine weitere Option namens **ABC HOLD** bietet an, den Taupunkt während des ABC auf dem zuletzt gemessenen Wert konstant zu halten, um stark gestreute Messwerte durch das Erhitzen des Sensors während des ABC zu vermeiden.

6 Das Regulatorsystem

Zur Regulation des Taupunkts und damit auch des Wassergehalts eines Gases wurde der folgende Aufbau verwendet.

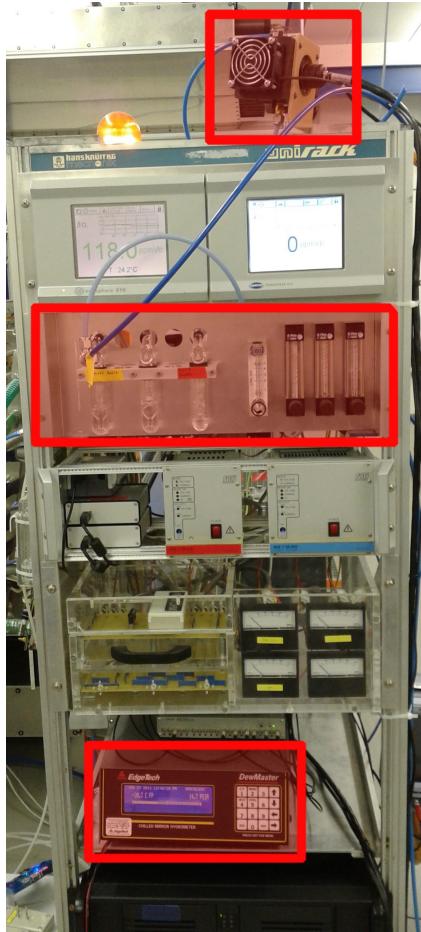


Abbildung 9: Frontansicht des eingebauten Regulatorsystems im Rack (zugehörige Bestandteile sind rot markiert).



Abbildung 10: Ausschnitt des Aufbaus mit Bubbler (gelb markiert, links) und Flussreglern (rechts).

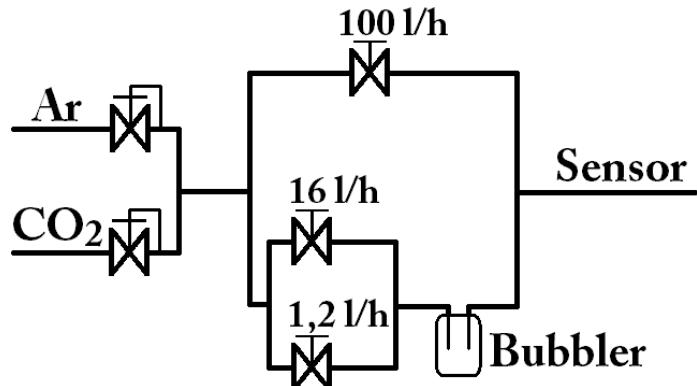


Abbildung 11: Flusschema des verwendeten Messaufbaus.

Abbildung 9 zeigt den Aufbau innerhalb des Racks, wobei das größtenteils aus Polyurethan bestehende Gasleitungssystem¹⁰ der einzelnen Komponenten auf der Rückseite des Racks zu finden ist. Polyurethan ist bis -40°C problemlos verwendbar, bei tieferen Temperaturen sollte jedoch ein anderes Leitungsmaterial verwendet werden. Die Gaszuleitung inkl.

¹⁰Das kurze Verbindungsstück zwischen Bubbler und fortgesetzter Gasleitung besteht aus Silikon.

Gasflaschen ist nicht im Bild zu sehen. Abbildung 10 zeigt eine Detailansicht der Hauptbestandteile zur Regulation des Taupunktes. In der darunter liegenden Abbildung 11 ist das Flussdiagramm des Aufbaus zu sehen, an welchem der Aufbau im folgenden Abschnitt genauer erläutert werden soll.

Trockenes Argon und CO₂ können zu bestimmten Teilen vorgemischt werden¹¹ und dann als gemischtes Gas sowohl zum Flussregler mit maximal 100 l/h und zu den beiden feiner justierbaren Flussreglern mit 16 l/h und 1,2 l/h laufen¹². Nach Passieren der unteren Flussregler wird das Gas durch den sogenannten Bubbler geleitet (siehe Abb. 12).

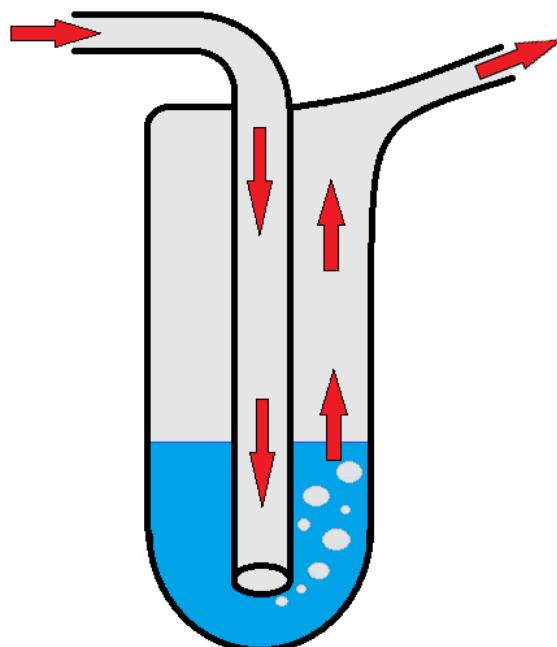


Abbildung 12: Schematische Zeichnung eines Bubbler (Gasfluss gekennzeichnet durch rote Pfeile). Das von außen kommende Gas wird in die Füllflüssigkeit hineingedrückt und steigt danach als Blase wieder auf. In der Kontaktzeit mit der Füllflüssigkeit wird die Gasblase bzw. das Gas mit dieser angereichert und verlässt danach den Bubbler am anderen Ausgang.

Durch den kurzzeitigen Kontakt der entstehenden Gasblasen mit dem Wasser wird das Gas zum Teil gesättigt (befeuhtet). Im Anschluss wird das trockene Gas der oberen Leitung mit dem nun befeuhteten Gas der unteren Leitung wieder zusammengemischt und in dieser Konstellation in den Taupunktsensor geleitet. Hier wird schließlich der Taupunkt

¹¹Im Supermodul wird eine Mischung aus 82% Argon und 18% CO₂ verwendet.

¹²Flusspezifische Angaben werden im Folgenden stets wie folgt angegeben: Fluss am 1,2 l/h-Regler : Fluss am 16 l/h-Regler : Fluss am 100 l/h-Regler (z.B. 1,2:16:100 l/h)

der feucht-trockenen Gaskonstellation gemessen.

Um jetzt eine Änderung des Taupunktes zu bewirken, muss lediglich der Gasfluss an den entsprechenden Reglern variiert werden. Je mehr feuchtes Gas dabei zugeführt wird, desto höher liegt der Taupunkt, und umso mehr trockenes Gas zugeführt wird, desto niedriger liegt der Taupunkt.

Im Falle eines idealen Gas-Dampf-Gemisches und eines perfekten bzw. idealen Aufbaus würden sich bei der Messung des Taupunktes also noch unbekannte Kurven ergeben, die mit der Zeit leicht abfallen und nur von der Höhe des Wassers im Bubbler abhängig sind. Die Höhe ist dabei proportional zur Kontaktzeit und damit zur Sättigung des Gasgemisches.

Um vorab schon Aussagen über die möglichen Kurven zu treffen, bietet es sich an, näherungsweise einen Bubbler mit unendlichem Wasserspeicher anzunehmen, sodass der Wasserstand während einer Messung niemals sinkt. Die einzige Abhängigkeit der Kurven vom Wasserstand wäre damit aufgehoben und es würden sich stets lineare, steigungslose Kurven, wie in Abb. 13 beispielhaft dargestellt, ergeben. Diese Reduktion der unbekannten

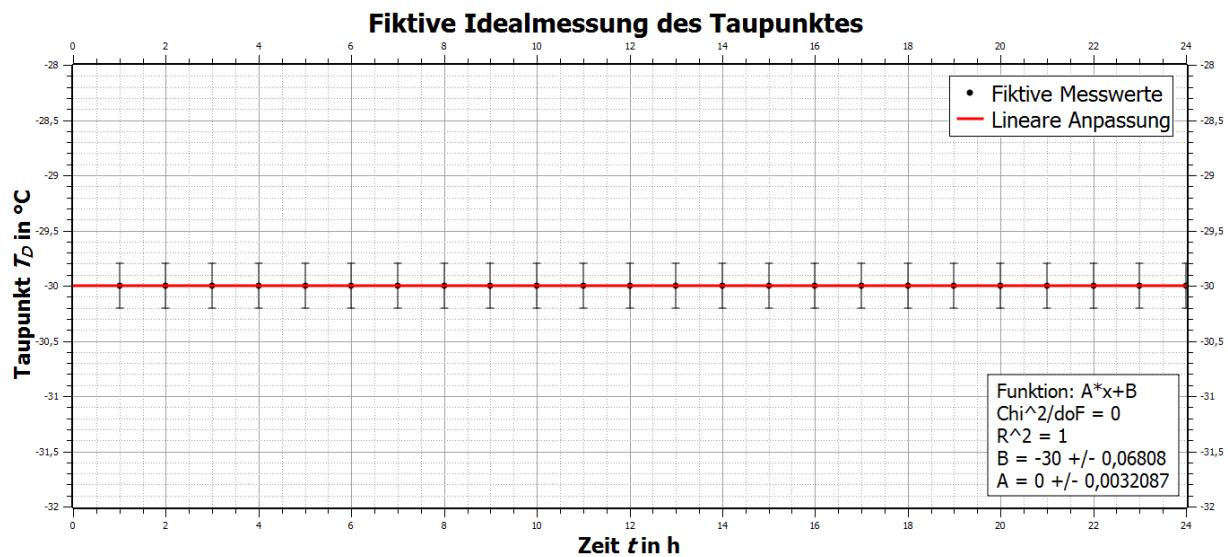


Abbildung 13: Fiktive Idealmessung des Taupunktes, falls dieser näherungsweise vollständig unabhängig von der Wasserhöhe im Bubbler ist.

Kurven auf Geraden ist für praxisnahe Zwecke vorteilhaft.

Das gleiche genäherte Ergebnis liefert zudem die physikalisch vielleicht sinnvollere Annahme, dass das Gas innerhalb einer verschwindend geringen Zeit gesättigt wird und damit nur eine sehr geringe Füllhöhe des Bubblers voraussetzte.

7 Qualität des Regulatorsystems, Durchgeführte Messungen

Um die Qualität des aufgebauten Regulatorsystems zu bestimmen, werden die folgenden Kriterien anhand mehrerer Messungen untersucht und im folgenden Kapitel ausgewertet¹³:

Eichung der Flussregler: Der Wassergehalt des Detektorgases variiert mit unterschiedlichen Flussraten, die an den Flussreglern eingestellt werden können. (siehe Abb. 11). Eine Eichung der Flussregler in Bezug auf die einstellbaren Taupunkte ist deshalb sinnvoll, sodass gezielt bestimmte Taupunkte angesteuert werden können, ohne dass großes Suchen erforderlich ist.

Konstanz des Wassergehalts im Detektorgas: Je geringer die Fehlerbelastung des zu bestimmenden Wassergehalts im Detektorgas ist, umso besser kann damit gearbeitet werden. Ein konstanter Wassergehalt (oder äquivalent ein konstanter Taupunkt) ist deshalb wünschenswert. Dabei ist zu beachten, dass der Taupunkt sowohl lokal (wenige Stunden) als auch global (mehrere Stunden bis Tage) konstant bleiben sollte. Ein periodisches bzw. oszillatorisches Verhalten des Taupunkts sollte im Idealfall deshalb nicht beobachtet werden.

Langzeitfunktionalität des Systems: Neben der Konstanz des Wassergehalts ist es ebenfalls wichtig zu wissen, wie lange der eingestellte Taupunkt und damit der Wassergehalt konstant gehalten werden kann. Dabei spielt vor allem der Wasserstand des Bubbler eine Rolle, da dieser mit der Zeit abnimmt und das Gas durch den zeitlich kürzeren Kontakt mit dem Wasser weniger stark gesättigt wird. Wie groß der Einfluss des Wasserstandes im Bubbler auf die Messungen ist und wie lange sinnvolle Messergebnisse erzielt werden können, wird darum im Bereich mehrerer Tage untersucht.

Flexibilität des Systems: Falls eine Änderung des Wassergehalts im Detektorgas erforderlich ist, sollte bekannt sein, wie lange das System braucht, um die Änderungen zu übernehmen bzw. sich diesen anzupassen (siehe auch Abb. 8).

Minimal erreichbarer Taupunkt: Dem System ist durch die begrenzten Einstellungsmöglichkeiten an den Flussreglern eine untere Schranke für den Taupunkt des befeuchteten Gases gegeben. Diesen gilt es zu bestimmen¹⁴.

¹³Viele der genannten Kriterien können bereits anhand einer einzelnen Messung untersucht werden, sodass deren Ausarbeitung nicht unbedingt der Reihe nach erfolgt.

¹⁴Der tiefstmögliche Taupunkt *des befeuchteten Gases* unterscheidet sich vom tiefstmöglichen Taupunkt *des trockenen Gases* insofern, dass beim trockenen Gas kein Fluss am Bubbler eingestellt ist. In dieser Form könnte das Regulatorsystem vollständig durch eine einfache Gasleitung ersetzt werden und man bestimmte den minimalen Taupunkt vom Gas, so wie es aus der Gasflasche strömt.

8 Auswertung der Messungen

Insgesamt wurden drei (Langzeit-)Messungen mit unterschiedlichen Flussraten angestellt, die einzeln und der Reihe nach ausgewertet werden sollen. Das verwendete Gas war dabei während aller Messungen CO₂.

8.1 Messung mit konstanter Flussrate 1:0:100 l/h

Die erste Messung diente der Bestimmung der Langzeittauglichkeit und der Konstanz der Messwerte in einem Zeitraum von ungefähr 8 Tagen und ist in ihrer Gesamtheit in Abb. 14 zu sehen¹⁵.

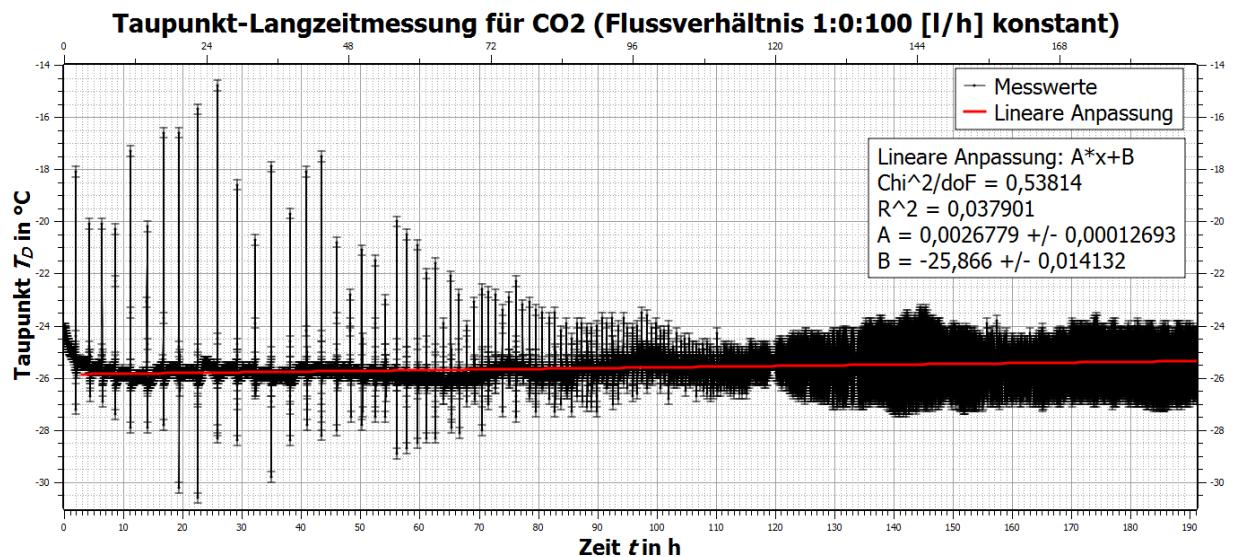


Abbildung 14: Erste Langzeitmessung mit CO₂ über einen Zeitraum von ca. 8 Tagen bei einem Flussverhältnis von 1:0:100 l/h. Die einzelnen Messwerte wurden mit Linien verbunden, um die Peaks besser darzustellen.

Der Verlauf der Messwerte lässt allgemein einen linearen Verlauf erkennen, der jedoch stark durch Störungen ausgeschmiert ist. Dabei fallen zum einen die hohen, fein aufgelösten Peaks im Bereich $0 \text{ h} \leq t \leq 100 \text{ h}$ und der vollkommen ausgeschmierte Bereich bei $t \gtrsim 100 \text{ h}$ auf. Weiterhin ist zu Beginn der Messung ($0 \text{ h} \leq t \leq 5 \text{ h}$) ein exponentieller Abfall zu sehen, bevor sich der lineare Verlauf einstellt. Bei genauem Hinsehen lässt sich zudem eine Schwingung der Periode $T \approx 24 \text{ h}$ mit schwacher Amplitude $E \approx 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ erahnen, die bis knapp 108 h erkennbar ist.

¹⁵ Alle gezeigten Graphen wurden mit dem Programm *SciDAVis* aufgenommen. Unsicherheiten bei entsprechenden Fittkurven wurden über die Methode der kleinsten χ -Quadrate gebildet.

Der exponentielle Abfall der Messwerte zu Beginn kann darauf zurückgeführt werden, dass die einzelnen Leitungen noch nicht gründlich genug mit CO₂ durchgespült wurden. Diese Spülung ist notwendig, da sonst eventuelle Rückstände und Verunreinigungen in den Leitungen zur Messung beitragen und damit das Ergebnis verfälschen. Ungefähr fünf Stunden nach Messbeginn stellte sich ein verhältnismäßig konstanter Wert ein, die Leitungen sind nun also frei von Verunreinigungen und werden nur noch von reinem CO₂ durchspült. Für Berechnungen wie z.B. dem Mittelwert der Messwerte ist dieser Durchspül-Abschnitt zu vernachlässigen.

Die scheinbar periodisch auftretenden Peaks im folgenden Bereich der Messung werden durch den ABC verursacht. Nach einem abgeschlossenen Zyklus wird meist nicht direkt der exakte Taupunkt getroffen, sondern lediglich ein Punkt in der näheren Umgebung. Diese Punkte entsprechen nicht dem aktuellen Taupunkt und sind deshalb bei Berechnungen zu vernachlässigen. Durch automatisches Nachkühlen oder -heizen pendelt das Messgerät dann für kurze Zeit um den wahren Taupunkt herum, bis dieser nach wenigen Minuten wieder gefunden wurde und weiter gemessen wird¹⁶.

Für die Messung war ein zweistündiger ABC-Rhythmus angesetzt, sodass die meisten Peaks auch in Abständen von zwei Stunden auftreten. Größere und kleinere Abstände zwischen zwei Peaks können z.B. dadurch begründet werden, dass der Taupunkt nach manchen Zyklen wieder genau oder ziemlich genau getroffen wurde, sodass ein Einpendelvorgang nicht vorhanden bzw. erkennbar ist. Die maximale Höhe der einzelnen Peaks nimmt mit der Zeit zudem stark ab, bis sie schließlich nicht mehr vom Rest der Messung zu unterscheiden sind ($t \gtrsim 110$ h). Eine mögliche Begründung dieses Abfalls der Peakhöhen und des völligen Ausschmierens der Messung im letzten Teil könnte gebildetes Kondenswasser in den Leitungen sein, dass sich im Laufe der Messung angesammelt hat (siehe Abb. 15). Das Kondenswasser entsteht dabei nur, wenn die Temperatur der Leitungen (im thermischen Gleichgewicht also Raumtemperatur) ungefähr gleich dem Taupunkt des Gases ist. Da das Gas nach Durchlaufen des Bubblers sehr stark gesättigt ist, liegt der Taupunkt meist im Bereich der Raumtemperatur, sodass es zur Kondensation kommen kann. Bildet sich nun zuviel Kondenswasser in der Leitung, kann es durch erneute Verdunstung dazu kommen, das vereinzelt auch reiner Wasserdampf in den Sensor gelangt. Da dies unregelmäßig und nicht gleichmäßig passiert, ändert sich der Taupunkt scheinbar ständig und schwankt um den wahren Wert herum (siehe auch Abb. 16).

¹⁶Während dieser Langzeitmessung war die ABC HOLD-Funktion zum Halten des Taupunkts während des ABC (siehe S. 19) noch abgeschaltet.

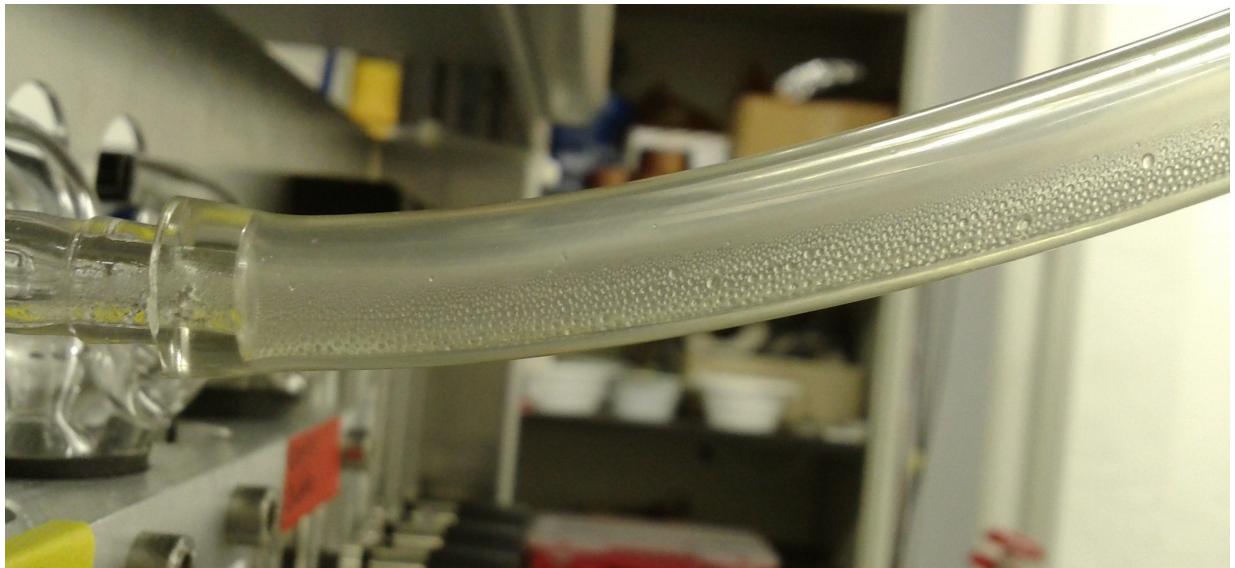


Abbildung 15: Kondenswasser innerhalb der Leitungen im Bereich nach dem Bubbler.

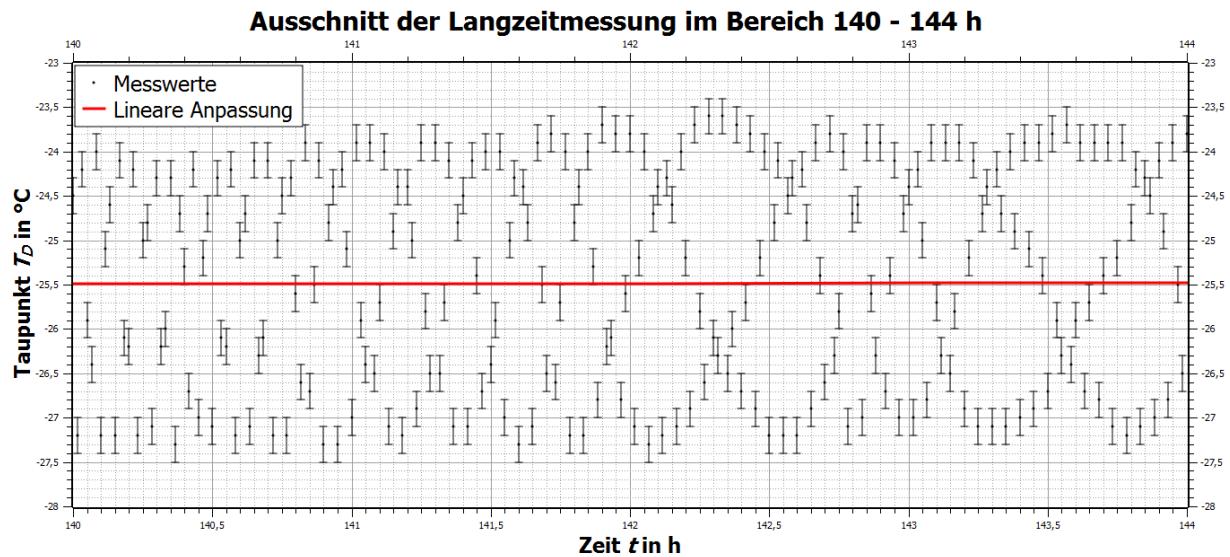


Abbildung 16: Ausschnitt der Langzeitmessung aus Abb. 14 zur Veranschaulichung der Schwankungen der Messwerte bei Kondenswasser in den Leitungen.

Abweichungen nach oben werden dabei durch reinen Wasserdampf im Sensor verursacht, Abweichungen nach unten durch weniger stark gesättigtes CO₂, dessen Wassergehalt teilweise in der Leitung auskondensiert ist.

Da im Mittel nicht mehr oder weniger gesättigtes Gas im Vergleich ohne gebildetes Kondenswasser gemessen wird, kann der ausgeschmierte Bereich deshalb in die Bildung einer

Ausgleichsgeraden einbezogen werden.

Unter Berücksichtigung der eben erläuterten Fehlerquellen ist es schwierig, eine Aussage über die Langzeitfunktionalität anhand der ersten Langzeitmessung zu treffen. Im gesamten Mittel funktionierte die Messung prinzipiell über den gesamten Messzeitraum (knapp acht Tage), die starke Schwankung der einzelnen Messwerte im Bereich nach ca. 100 Stunden bzw. knapp vier Tagen ist jedoch nicht mit der Forderung nach konstanten Messwerten in Einklang zu bringen. Die Langzeitfunktionalität $T_{\text{func.}}$ wird für diese Messung deshalb auf

$$T_{\text{func.}}^* \lesssim 100 \text{ h} \approx 4 \text{ d} \quad (8.1)$$

abgeschätzt, stellt aufgrund der Schwankungen bedingt durch das Kondenswasser in den Leitungen aber **keinen** Referenzwert dar¹⁷.

Die Konstanz des eingestellten Messwertes kann über Mittelwertbildung und Standardabweichung allgemein bestimmt werden und liefert genau dann einen aussagekräftigen Wert, wenn lokale Schwankungen vernachlässigbar bleiben. Für die in der Messung beobachtete Schwingung ist diese Vernachlässigung aufgrund der großen Periodendauer ($T \approx 24 \text{ h}$) und der schwachen Amplitude ($E \approx 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) möglich, sodass sich im Bereich zwischen 5 und 110 Stunden unter Auslassung der Peaks für den mittleren Taupunkt $\overline{T_D}$

$$\overline{T_D} = (-25, 75 \pm 0, 33) \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (8.2)$$

ergibt, wobei die Standardabweichung $\sigma_{T_D} = 0,33$ die Unsicherheit des Mittelwertes und damit dessen Konstanz angibt. Im Vergleich mit der Messgenauigkeit des Taupunkts $\Delta T_D = 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (siehe S. 14, Tabelle 3) hat sich die Unsicherheit damit um 65% erhöht. In Anbetracht der vielen möglichen Fehlerquellen ist dies noch ein guter Wert, die Messung verlief also im genannten Bereich den Anforderungen entsprechend konstant.

Während der Langzeitmessung wurde auch der aktuelle Wasserstand des Bubblers gemessen. Dabei ergaben sich die folgenden Werte.

¹⁷Referenzuntaugliche Größen sind, sofern nicht anders vermerkt, mit einem Stern gekennzeichnet.

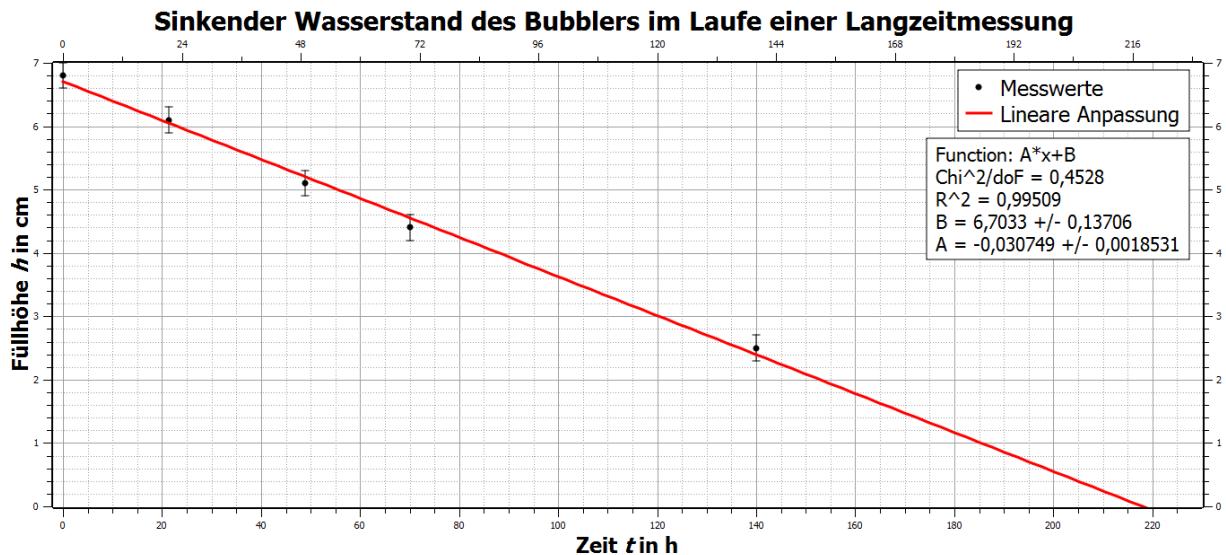


Abbildung 17: Wasserstand des Bubblers zu verschiedenen Zeitpunkten während der Messung aus Abb. 14. Die Höhe “Null” entspricht dabei dem Punkt, an dem das Gas in das Wasser einströmen kann (unteres Ende des Innenröhrechens im Bubbler, siehe Abb. 12).

Über die interpolierte Ausgleichsgerade des Wasserstandes kann eine referenzgültige Abschätzung der Langzeittauglichkeit $T_{\text{func.}}$ des Systems auf

$$T_{\text{func.}} \lesssim 220 \text{ h} \approx 9 \text{ d} \quad (8.3)$$

getroffen werden. Dabei ist zu beachten, dass diese Abschätzung nur dann gilt, falls der Fluss durch den Bubbler 1 l/h entspricht. Höhere Flussraten würden die Langzeittauglichkeit reduzieren, während niedrigere sie verlängerten.

Nach 220 h ist der Bubbler soweit entleert, dass die Wasseroberfläche in etwa auf der Höhe des Gaseinlasses in das Wasser ist. Die aufsteigenden Gasblasen, die die Wasseroberfläche verformen (“Blubbern”), bewirken dann, dass das Gas nicht mehr vollständig gesättigt wird, da der Gaseinlass nicht zu alle Zeiten vollständig vom Wasser umgeben ist.

Neben einer oberen Abschätzung der Langzeittauglichkeit kann aus Abb. 17 und der zugehörigen Messung in Abb. 14 ebenfalls entnommen werden, dass die Sättigung des Gases nahezu unabhängig vom Wasserstand ist. Dies kann mit dem näherungsweise linearen Verlauf der Messung begründet werden, der der theoretischen Vorüberlegung am Ende von Kapitel 6 entspricht. Weiterhin kann damit bestätigt werden, dass Füllhöhen im Bereich weniger Zentimeter bereits ausreichen, um die zuletzt genannte Näherungsbedingung (S. 22, unten) zu erfüllen. Die von Null verschiedene Steigung der Ausgleichsgeraden entsteht dabei u.a. aus Messungenauigkeiten- und fehlern sowie der Tatsache, dass ein ideales System bzw. ein idealer Aufbau technisch nicht realisierbar ist.

8.2 Messung mit konstanter Flussrate 0,6:0:20 l/h

Während der zweiten Messung wurde die ABC Hold-Funktion verwendet, um die ungewollten Peaks des ABC zu vermeiden. Dabei ergab sich das folgende Bild.

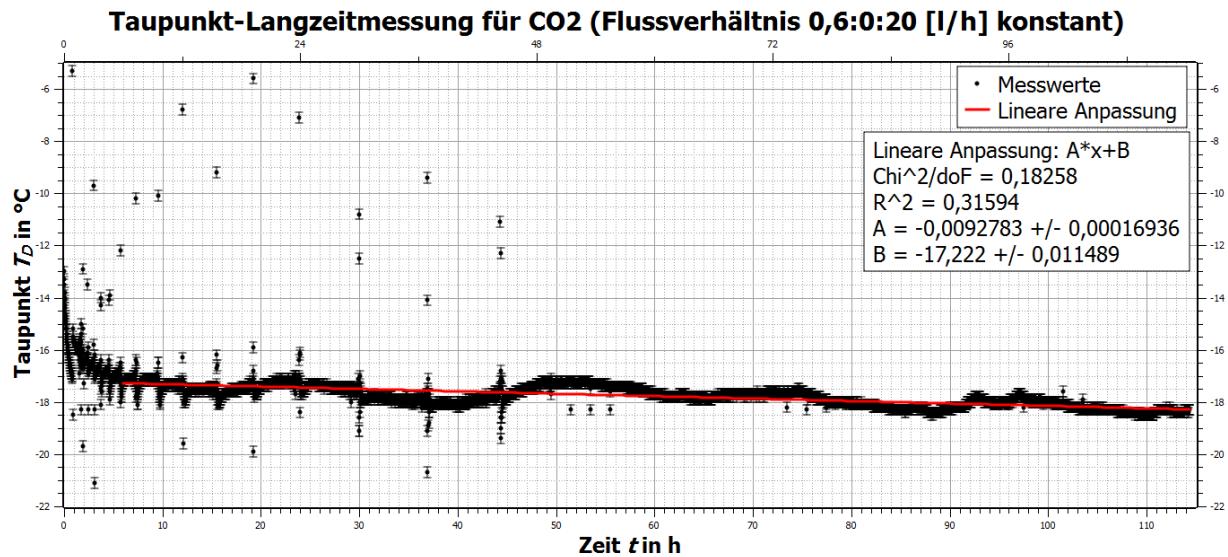


Abbildung 18: Zweite Langzeitmessung mit CO_2 über einen Zeitraum von ca. 5 Tagen bei einem Flussverhältnis von 0,6:0:20 l/h.

Im Vergleich zur ersten Messung (Abb. 14) hat sich die Anzahl der Peaks drastisch reduziert, der exponentielle Abfall zu Beginn der Messung ist aus gleichen Gründen wie zuvor jedoch noch vertreten. Selbiges gilt für die eintägige Schwingung, die hier aufgrund des klareren Verlaufes der Messwerte besser zu erkennen ist. Die Amplitude der Schwingung liegt ebenfalls wieder im Bereich $E \approx 1 \text{ } ^\circ\text{C}$, zwischen dem ersten und zweiten Tag steigt sie jedoch auf ungefähr $1,5 - 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ an. Dieser Wert ist eigentlich zu groß, um als lokale Schwankung vernachlässigt zu werden. Da der Amplitudenzuwachs aber einmalig in dieser Größenordnung beobachtet wurde, ist eine Vernachlässigung dennoch in guter Näherung möglich.

Weiterhin bildete sich kein bzw. nur sehr wenig Kondenswasser in den Leitungen aus, so dass eine Ausschmierung der Messwerte ausblieb. Insgesamt verlief die Messung zudem recht konstant, was durch die geringe Steigung der Ausgleichsgeraden ($A = -0,0092783 \pm 0,00016936 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{h}$) bestätigt wird.

Ohne den störenden Einfluss des Kondenswassers kann eine Abschätzung der Langzeit-tauglichkeit nun über die komplette Messzeit gelegt werden, es gilt also

$$T_{\text{func.}} \geq 114 \text{ h} \approx 5 \text{ d.} \quad (8.4)$$

Die Konstanz der Messwerte kann erneut über die Standardabweichung im relevanten Be-

reich (6 - 114 h, ABC-Peaks ausgelassen) bestimmt werden und es ergibt sich

$$\overline{T_D} = (-17,79 \pm 0,40) \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (8.5)$$

Die Konstanz bzw. Messunsicherheit hat sich im Vergleich zur Messgenauigkeit $\Delta T_D = 0,2$ $^\circ\text{C}$ für diese Messung also verdoppelt, kann aber trotzdem noch als guter Wert angesehen werden.

8.3 Messung mit variablen Flussraten

Die letzte Messung unterteilt sich in zwei Einzelmessungen, die zeitlich direkt aneinander anknüpfen. Dabei dient der erste Teil der Messung bis knapp 150 Stunden vornehmlich zur Eichung der Flussregler und der Flexibilitätsbestimmung, der zweite Teil einer weiteren Untersuchung der Langzeitauglichkeit und Konstanz des eingestellten Taupunktes. In Abbildung 19 ist die vollständige Messung dargestellt.

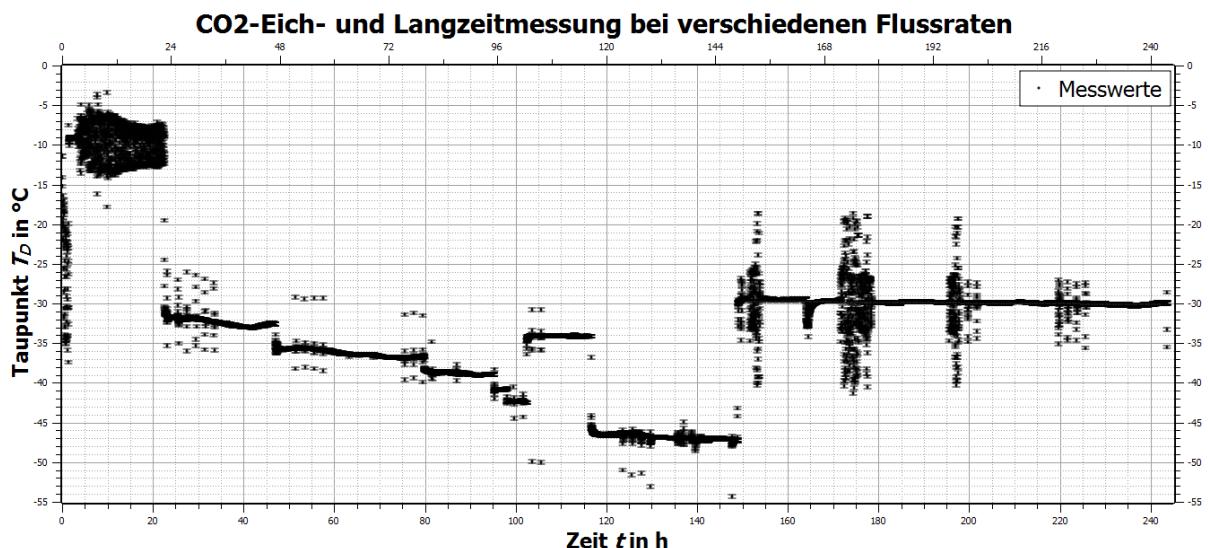


Abbildung 19: Dritte Langzeitmessung mit CO₂ zur Eichung der Flussregler bei unterschiedlichen Flussraten über einen Zeitraum von ungefähr 10 Tagen.

Auffällig ist, dass nahezu alle 16 Stunden plötzlich eine unregelmäßig starke Streuung auftritt, die nach ungefähr 8 Stunden genau so plötzlich wieder verschwindet. Die Regelmäßigkeit des Auftretens dieser Störung legt die Vermutung nahe, dass es sich hierbei nicht oder nur bedingt um statistische Messfehler oder durch den ABC bedingte Fehler handelt.

8.3.1 Eichung der Flussregler

Zur Eichung der Flussregler werden die ersten 150 Stunden der Messung genauer untersucht. Dabei werden die Flussregler auf die Einstellungsmöglichkeiten 0,1:0:x 1/h hin

getestet, wobei $x = 10, 20, 30, \dots, 100$ l/h. Diese Eichung erweist sich als sinnvoll, wenn speziell der Bereich tiefer Taupunkte abgedeckt werden soll.

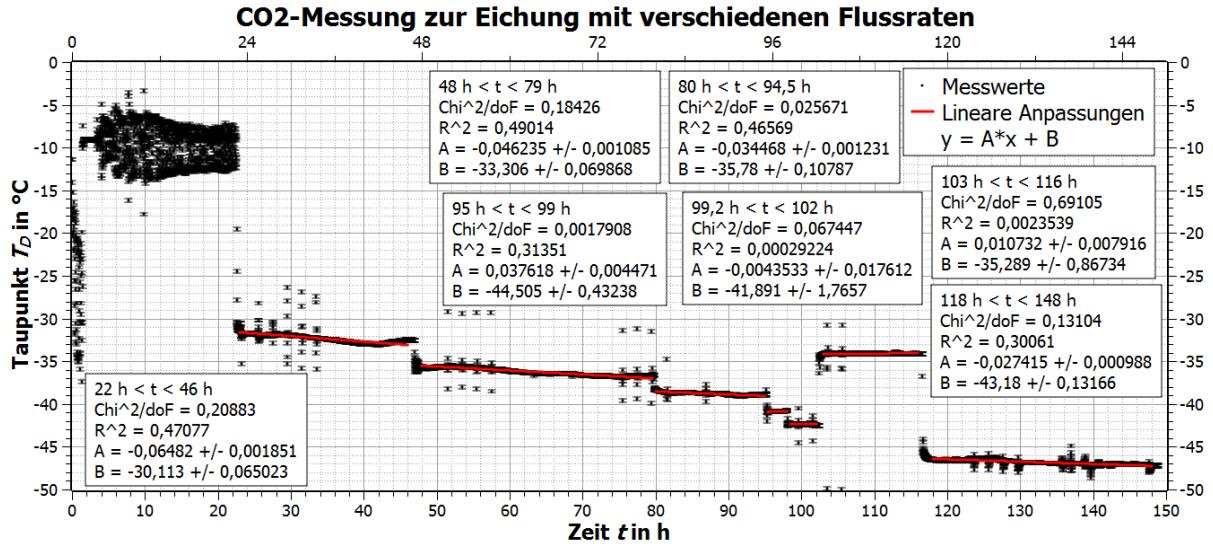


Abbildung 20: Ausschnitt der Messung aus Abb. 19 im Bereich 0 - 150 Stunden.

Zu erkennen sind acht Messabschnitte, von denen sieben mit Ausgleichsgeraden versehen wurden. Der erste Abschnitt im Bereich 0 - 22 h war schwerlich von Kondenswasser in der Leitung beeinflusst und wurde zudem mit 1:0:20 l/h gemessen, was in der Eichung nicht berücksichtigt werden soll.

Um nun den einzelnen Flusseinstellungen die entsprechenden Taupunkte zuzuteilen, wird der Mittelwert inkl. Standardabweichung der einzelnen Abschnitte (unter Auslassung der periodischen Störungen) gebildet. Dies ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Abschnitt	Zeit [h]	Flusseinstellung [l/h]	gemittelter Taupunkt \bar{T}_D [$^{\circ}\text{C}$]
1	22-46	0,1:0:20	$-32,36 \pm 0,48$
2	48-79	0,1:0:30	$-36,26 \pm 0,44$
3	80-94,5	0,1:0:40	$-38,80 \pm 0,17$
4	95-99	0,1:0:50	$-40,87 \pm 0,09$
5	99,2-102	0,1:0:60	$-42,34 \pm 0,08$
6	103-116	0,1:0:20	$-34,08 \pm 0,07$
7	118-148	0,1:0:100	$-46,8 \pm 0,31$

Tabelle 5: Eichtabelle mit Flussraten und zugehörigen gemittelten Taupunkten.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Unsicherheiten der Messwerte sehr unterschiedlich sind. Die Unsicherheiten $< 0,2$ $^{\circ}\text{C}$ sind zudem nicht aussagekräftig, da die Messgenauigkeit des *DewMaster* bereits $0,2$ $^{\circ}\text{C}$ beträgt. Hinzu kommt, dass die gemittelten Taupunkte

für das Flussverhältnis 0,1:0:20 l/h (Abschnitt 1 und 6) relativ stark voneinander abweichen. Dies könnte z.B. daran liegen, dass die Flussraten des Systems verhältnismäßig oft geändert wurden und sich zu einem oder beiden der Messzeitpunkte noch keine Gleichgewichtssituation eingestellt haben könnte. Eine weitere denkbare Ursache könnte sein, dass die Leitungen zu Beginn der Messung durch den Einfluss des Kondenswassers noch lange Zeit nach der ersten Flussänderung (nach ≈ 22 h) Wasser desorbiert haben und so den Taupunkt künstlich erhöht hätten.

Um ein genaueres Bild der Eichwerte zu bekommen, werden die gemittelten Taupunkte gegen die Flusseinstellungen abgetragen und eine Eichkurve ermittelt.

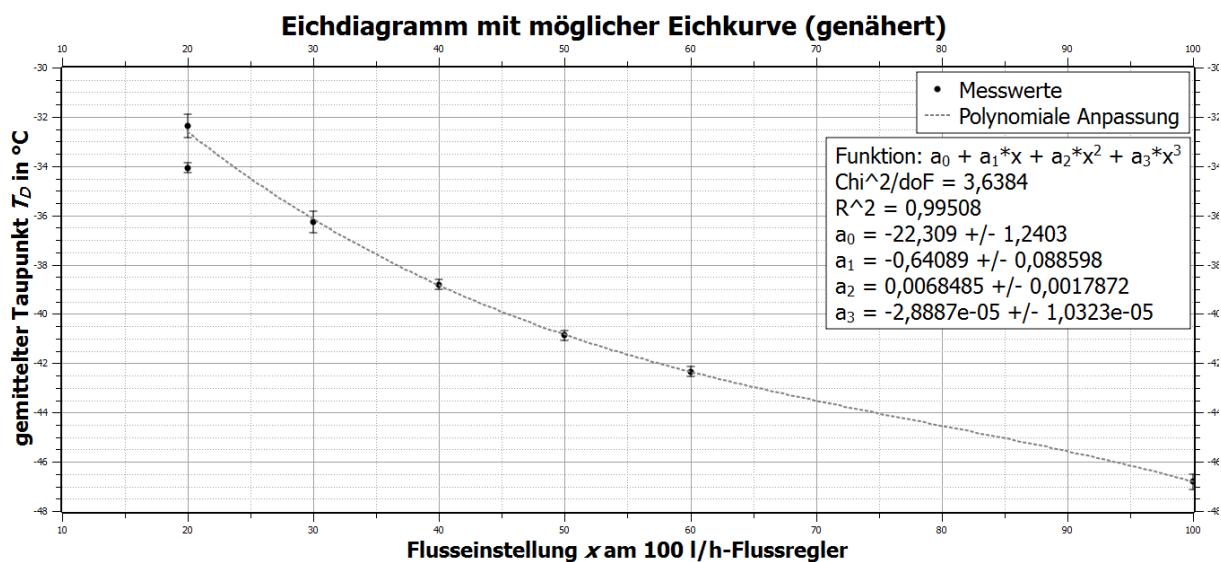


Abbildung 21: Mögliche Eichkurve auf Basis der Daten aus Tabelle 5.

Auch ohne Kenntnis des Verlaufes der wahren Eichkurve - zu welcher umfassendere theoretische Überlegungen notwendig wären, die den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden - kann für den angegebenen Bereich eine genäherte Eichkurve angegeben werden (siehe Abb. 21).

Insgesamt betrachtet sollte die gefundene Eichkurve aufgrund der angewandten Näherungen und der Unkenntnis über die wahre Eichkurve jedoch eher als Orientierungshilfe statt als physikalisch exaktes Richtmaß verwendet werden.

Neben der Eichung kann der Messung noch die Information über den tiefstmöglichen Taupunkt entnommen werden, der mit dem aktuellen Aufbau erreichbar ist. Dabei handelt es sich um den Wert

$$T_{D,\min} = (-46,8 \pm 0,31) \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.6)$$

bei der Flusseinstellung 0,1:0:100 l/h. Umgerechnet in den volumenbezogenen Wassergehalt des Gases ergeben sich nach ANTOINE, MAGNUS und SONNTAG (siehe Kapitel 4.4 und 4.5)

die Werte in der folgenden Tabelle.

Gleichung nach	Sättigungsdampfdruck p_{W_s} [Pa]	Wassergehalt χ_V [ppm _V]
ANTOINE	$5,82197 \pm 0,21661$	$57,46 \pm 2,17$
MAGNUS	$5,81655 \pm 0,14284$	$57,41 \pm 1,41$
SONNTAG	$5,81091 \pm 0,21726$	$57,35 \pm 2,14$

Tabelle 6: Sättigungsdampfdrücke und volumenbezogener Wassergehalt von CO₂ bei $T_{D,\min} = (-46,8 \pm 0,31)^\circ\text{C}$. Bei MAGNUS und SONNTAG wurden die Sättigungsdampfdrücke über Eis und mithilfe der POYNTING-Korrektur bei Atmosphärendruck bestimmt.

Dabei wurden die Messunsicherheiten für den Sättigungsdampfdruck und den Wassergehalt mithilfe der Fehlerfortpflanzung bestimmt.

8.3.2 Flexibilität des Regulatorsystems

Zur Bestimmung der Flexibilität des Systems werden die Übergänge während einer Flussänderung aus der Messung in Abb. 19 untersucht. Dabei ergaben sich die folgenden Diagramme, in denen der ungefähre Übergangsbereich farbig markiert und die Übergangszeit in der jeweiligen Bildunterschrift angegeben ist.

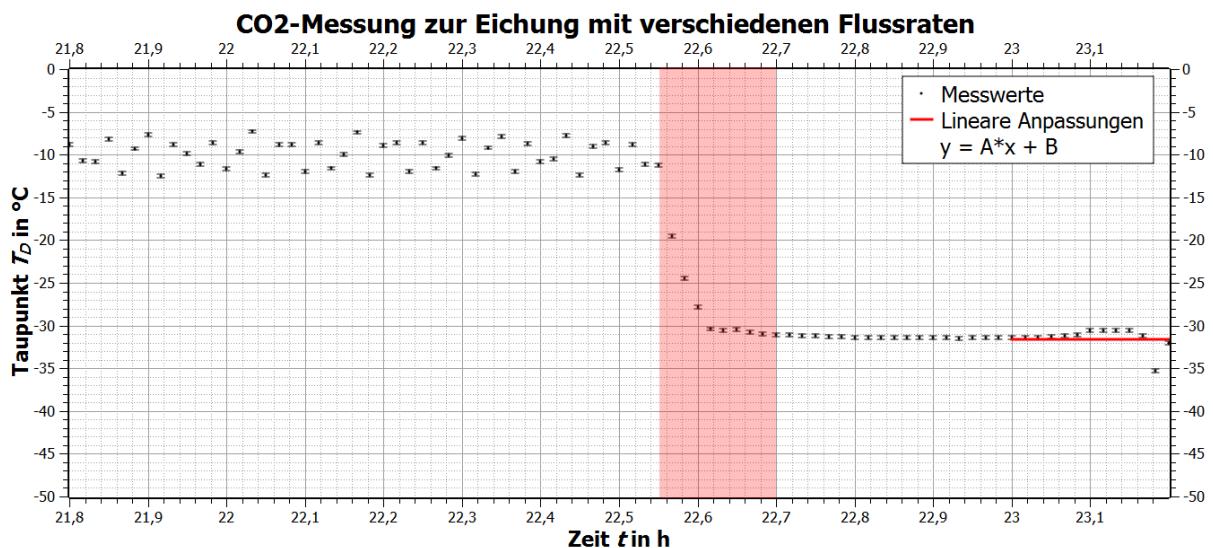


Abbildung 22: Ausschnitt der Messung aus Abb. 19 mit einer Flussänderung von 1:0:20 l/h zu 0,1:0:20 l/h. Die Übergangszeit beträgt ca. 9 min.

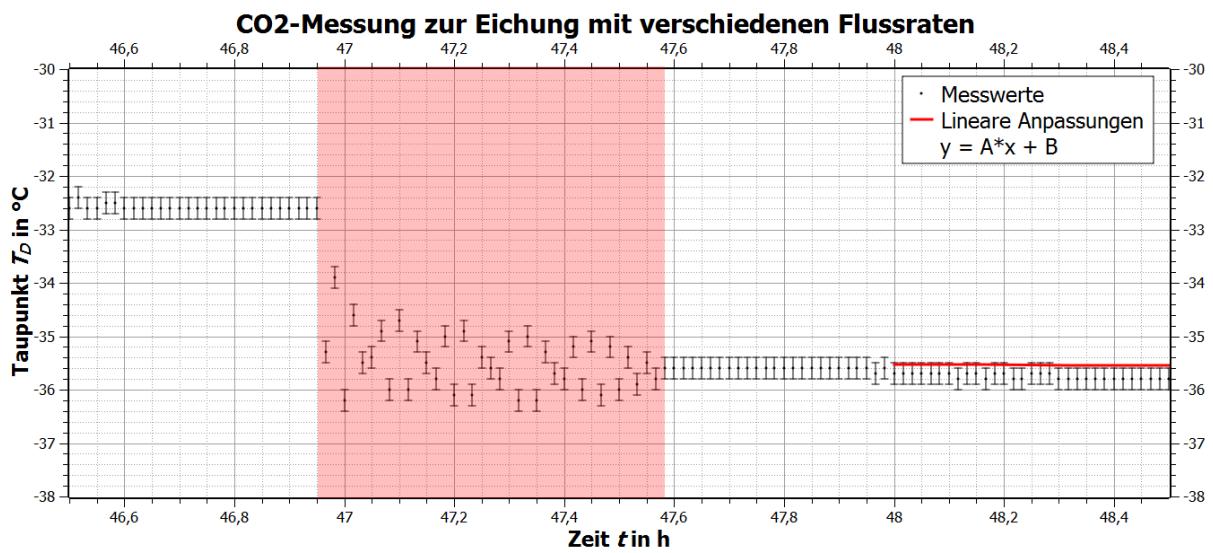


Abbildung 23: Ausschnitt der Messung aus Abb. 19 mit einer Flussänderung von 0,1:0:20 l/h zu 0,1:0:30 l/h. Die Übergangszeit beträgt ca. 37 min.

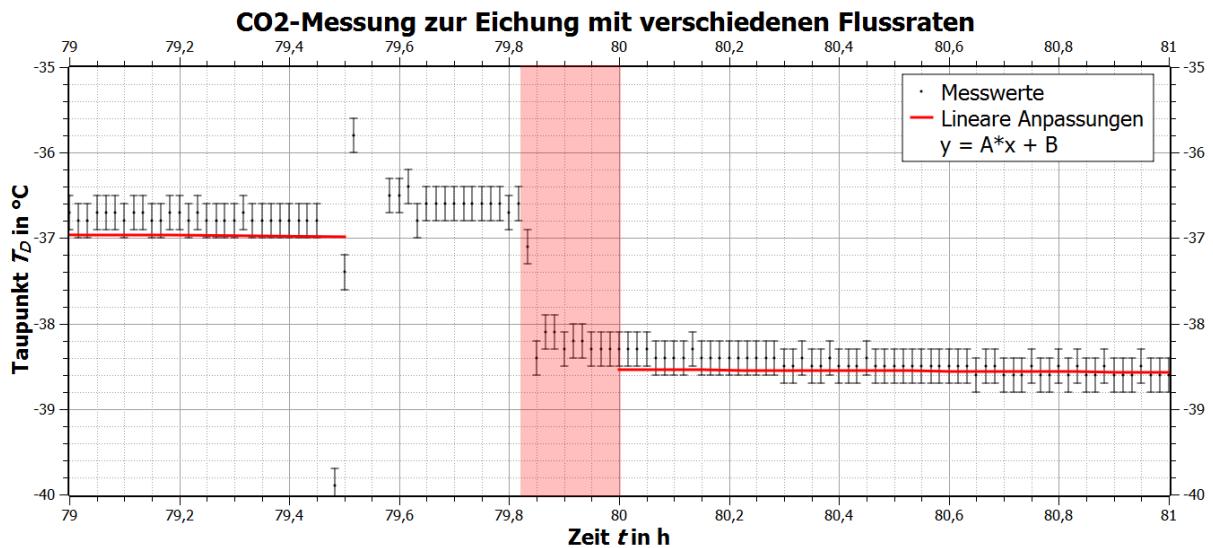


Abbildung 24: Ausschnitt der Messung aus Abb. 19 mit Flussänderungen von 0,1:0:30 l/h zu 0,1:0:40 l/h. Die Übergangszeit beträgt ca. 10,5 min.

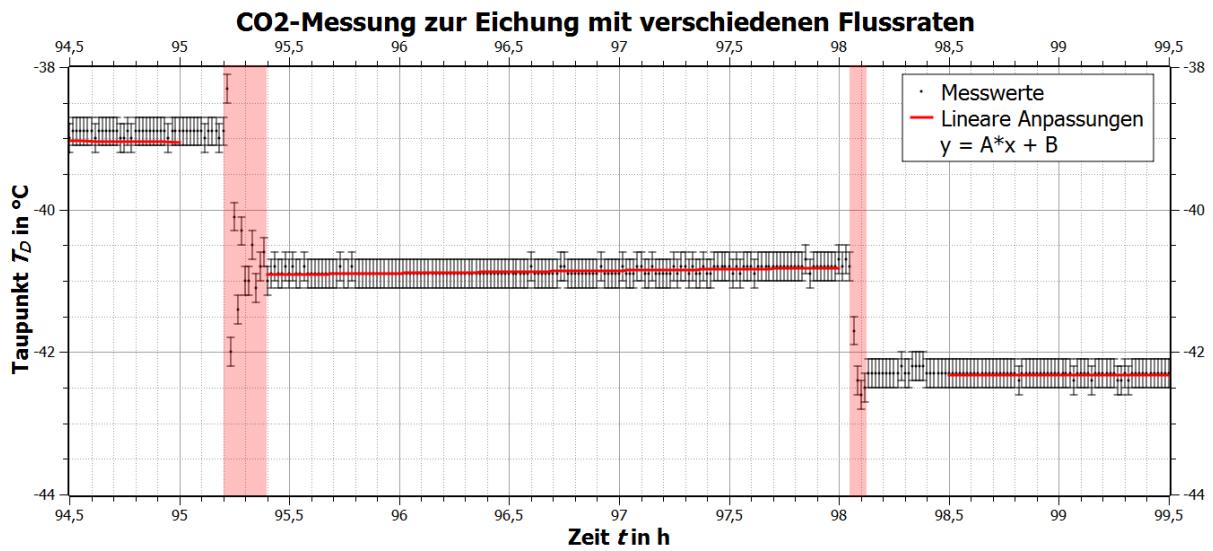


Abbildung 25: Ausschnitt der Messung aus Abb. 19 mit einer Flussänderung von 0,1:0:40 l/h zu 0,1:0:50 l/h und von 0,1:0:50 l/h zu 0,1:0:60 l/h. Die Übergangszeiten betragen ca. 12 min und ca. 6 min.

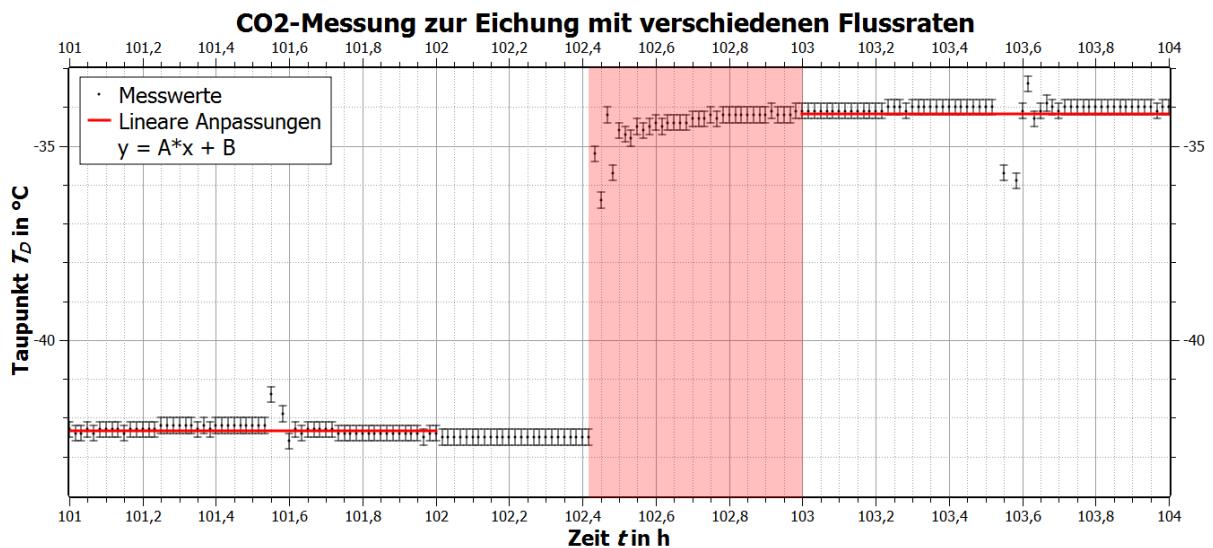


Abbildung 26: Ausschnitt der Messung aus Abb. 19 mit einer Flussänderung von 0,1:0:60 l/h zu 0,1:0:20 l/h. Die Übergangszeit beträgt ca. 35 min.

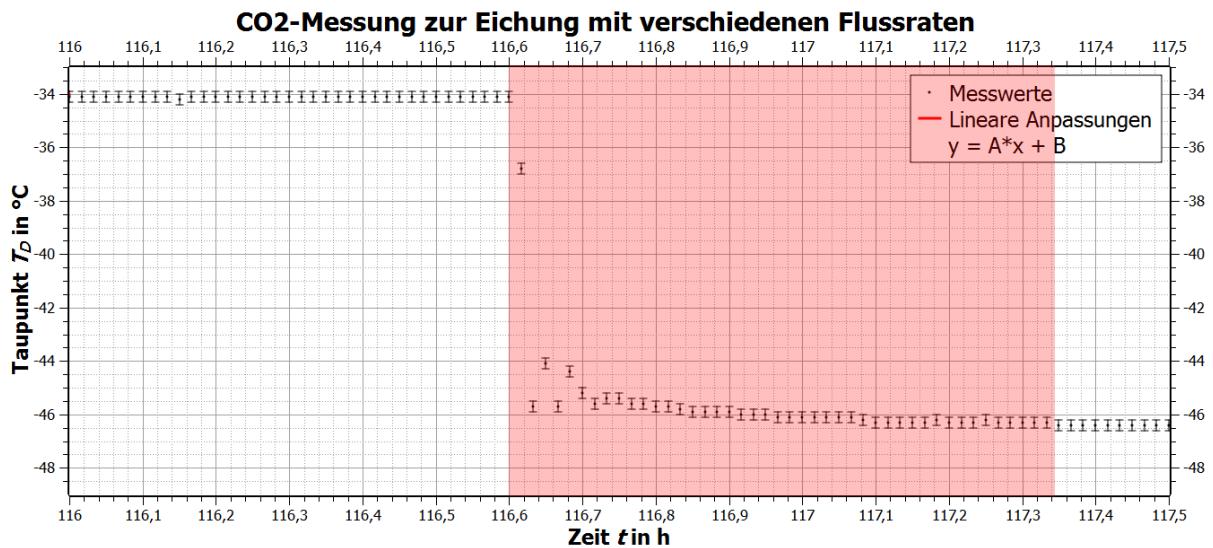


Abbildung 27: Ausschnitt der Messung aus Abb. 19 mit einer Flussänderung von 0,1:0:20 l/h zu 0,1:0:100 l/h. Die Übergangszeit beträgt ca. 45 min.

Allen Graphen ist zu entnehmen, dass der Übergang zum neuen Taupunkt innerhalb weniger Minuten passiert, wenn auch der Übergang in Abb. 23 theoretisch hätte schneller erfolgen sollen. Dass die Übergangszeiten so gering sind, liegt u.a. daran, dass die Leitungen zum Zeitpunkt der Flussänderungen bereits lange genug durchspült wurden und sich somit keine Verunreinigungen mehr in den Leitungen befanden. Weiterhin werden die bereits erläuterten Antwortcharakteristika (siehe S. 18f.) bestätigt, da nach Abb. 8 für Übergänge des Taupunkts zwischen 0 °C und –50 °C für die meisten Materialien Zeiten unter einer Stunde benötigt werden. Eine hohe Flexibilität des Regulatorsystems ist damit gewährleistet.

8.3.3 Fortgesetzte Langzeitmessung mit konstanter Flussrate 0,2:0:20 l/h

Der Langzeitanteil der Messung aus Abb. 19 ab 150 h ist im folgenden Diagramm dargestellt.

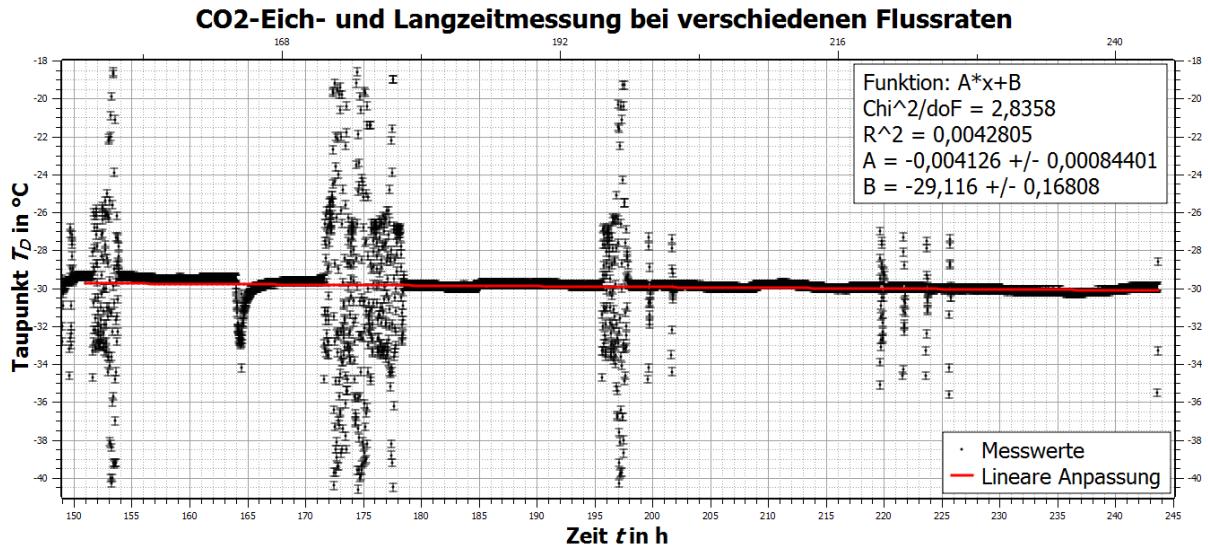


Abbildung 28: Ausschnitt der Messung aus Abb. 19 im Bereich 149 - 245 h.

Mit Ausnahme der periodischen Störungen verlief die Messung sehr konstant, wie am Verlauf der Messwerte und der geringen Steigung der Ausgleichsgeraden zu erkennen ist. Diese Tatsache gibt Anlass dazu, die Langzeitfunktionalität dieser Messung auf

$$T_{\text{func.}} \gtrsim 244 \text{ h} \approx 10 \text{ d} \quad (8.7)$$

abzuschätzen.

Die Konstanz der Messwerte kann analog zu den vorangegangenen Messungen bestimmt werden und es ergibt sich

$$\overline{T_D} = (-29,85 \pm 0,30) \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (8.8)$$

Gegenüber der Messgenauigkeit $\Delta T_D = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ hat sich die Messunsicherheit also um 50% erhöht.

9 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Der Verlauf der Messungen wies überwiegend zufriedenstellende Ergebnisse auf.

Es konnte eine hohe Flexibilität des Regulatorsystems gegenüber Taupunktänderungen unter 0 °C erreicht werden, wobei der Anpassungsprozess dabei innerhalb weniger Minuten erfolgte (siehe Kapitel 8.3.2).

Die Langzeittauglichkeit konnte auf zwei verschiedene Weisen abgeschätzt werden. Einerseits ergab sich bezüglich des Bubblers, dass das Wasser bei einem Fluss von 1:0:100 l/h nach $T_{\text{func.}} \lesssim 220 \text{ h} \approx 9 \text{ d}$ verbraucht ist, was als allgemeine obere Schranke angesehen werden kann. Andererseits konnte anhand zwei erfolgreicher Langzeitmessungen (siehe Abb. 18, Abb. 28) die Langzeitfunktionalität auch auf $T_{\text{func.}} \geq 114 \text{ h} \approx 5 \text{ d}$ und $T_{\text{func.}} \gtrsim 244 \text{ h} \approx 10 \text{ d}$ abgeschätzt werden. Dass die beiden Zeiten unterschiedlich sind liegt lediglich daran, dass die Messungen nach unterschiedlichen Zeiten, nämlich den abgeschätzten Langzeittauglichkeiten $T_{\text{func.}}$, beendet wurden.

Da für spätere Anwendungen wohl eher niedrige Taupunkte zu untersuchen sind - die Sättigung des Gases also gering und damit auch der entsprechende Fluss am 1,0 l/h-Bubbler niedrig sein soll - kann die These aufgestellt werden, dass mit einem β -fach kleineren Fluss durch den Bubbler gegenüber eines Referenzwertes sich die Langzeitfunktionalität um den Faktor β erhöht. Eine Verkleinerung des Flusses von 1:0:100 l/h auf 0,1:0:100 l/h würde theoretisch also in einer zehn mal größeren Langzeittauglichkeit resultieren, in diesem Beispiel würden damit aus neun Tagen ganze 90 Tage. Die Überprüfung dieser These könnte verhältnismäßig einfach durch Aufzeichnen des Wasserstandes im Bubbler bei entsprechenden Flussraten geschehen.

Für die Konstanz bzw. Messunsicherheit der Messwerte konnten die folgenden Ergebnisse gefunden werden.

Gasfluss $a:b:c$ [l/h]	Gasverhältnis $\frac{a}{c}$	Messunsicherheit [°C]	Erhöhung*
1:0:100	$\frac{1}{100}$	0,33	65%
0,6:0:20	$\frac{3}{100}$	0,4	100%
0,2:0:20	$\frac{1}{100}$	0,3	50%

Tabelle 7: Bestimmte Messunsicherheiten bei verschiedenen Flussraten und deren Erhöhung(*) gegenüber der Messgenauigkeit $\Delta T_D = 0,2 \text{ °C}$ des *DewMaster*.

Es fällt auf, dass die Konstanz scheinbar mit niedrigen Flussraten durch den Bubbler und geringen Flussverhältnissen $\frac{a}{c}$ abnimmt. Der Einfluss des Gasverhältnisses scheint dabei ausschlaggebender als der Einfluss des Flusses durch den Bubbler zu sein. Zu große Flussraten am Bubbler bringen jedoch schnell das Problem von sich bildendem Kondenswasser innerhalb des Gasleitungssystems mit sich (Abb. 15). Eine mögliche Lösung für dieses Problem könnte durch beheizte Leitungen gegeben sein, sodass kein Wasserdampf mehr auf

den Leitungsinnenwänden kondensieren kann. Für eine gute bzw. konstante Messung sollte dennoch auch ein niedriger Fluss durch den Bubbler und ein hoher Fluss trockenen Gases verwendet werden.

Abseits der Zahlenwerte scheint das Spektrum der Messung aus Abb. 28 gegenüber den Messungen aus Abb. 14 und Abb. 18 auch rein optisch am konstantesten zu sein, wenn man die in allen Messungen auftretenden Störpeaks verursacht durch den ABC vernachlässigt.

Die Eichung des Systems bezüglich der Flusseinstellung $0,1:0:x$ l/h verlief nicht so erfolgreich wie die restlichen Messungen. Aufgrund der unterschiedlich starken Messunsicherheiten, den nicht-konsistenten Ergebnissen für die Flusseinstellung $0,1:0:20$ l/h und dem allgemein unbekannten Verlauf der Eichkurve konnte nur eine genäherte Eichkurve angegeben werden. Physikalisch betrachtet spiegelt sie den wahren Verlauf der Messwerte zwar nicht korrekt wider (Taupunkttemperatur divergiert für unendlichen Fluss), als genäherte Abschätzung im angewandten Flussbereich (siehe Abb. 21) kann sie aufgrund des guten Fitts aber betrachtet werden.

Für den kleinsten messbaren Taupunkt konnte der Wert

$$T_{D,\min} = (-46,8 \pm 0,31) \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.1)$$

bei der Flusseinstellung $0,1:0:100$ l/h gefunden werden (siehe S. 34). Dies entspricht einem Wassergehalt von $(57,46 \pm 2,17)$ ppm_V nach ANTOINE, $(57,41 \pm 1,41)$ ppm_V nach MAGNUS (über Eis mit POYNTING-Korrektur $\pi_W = 1,0047$) und $(57,35 \pm 2,14)$ ppm_V nach SONNTAG (über Eis, $\pi_W = 1,0047$). Innerhalb der Messunsicherheiten stimmen alle Werte sehr gut überein.

Um niedrigere Taupunkte zu erreichen, müsste entweder ein noch feinerer Flussregler mit weniger als 1 l/h vor den Bubbler geschaltet werden oder ein stärkerer Flussregler mit mehr als 100 l/h das trockene Gas leiten. Eine Kombination aus beiden wäre ebenfalls möglich, um den Taupunkt zu erniedrigen.

Als letztes sei darauf hingewiesen, dass alle Messungen mit Kunststoffleitungen durchgeführt wurden, genau genommen mit Gasleitungen aus Polyurethan. Für Temperaturen unterhalb von -40 $^\circ\text{C}$ könnten Messergebnisse deshalb verfälscht sein. Ein Abgleich des tiefsten gemessenen Taupunkts bzw. dem zugehörigen Sättigungsdampfdruck mit [Son90] und [Vai12] lieferte zwar noch konsistente Ergebnisse, eine Beeinflussung der Messung im Allgemeinen wird dennoch nicht ausgeschlossen. Zukünftig könnten die Polyurethan-Leitungen z.B. durch Leitungen aus rostfreiem Stahl ersetzt werden, der nach [Edg2] (siehe Kapitel 5.4) für tieftemperierte, dauerhafte Messungen empfohlen wird.

Zusammenfassend lässt sich damit sagen, dass mit dem aufgebauten Regulatorsystem auf vergleichsweise simple Art und Weise eine flexibel, konstant und lang arbeitende Vorrichtung zur Regulierung des Taupunktes geschaffen wurde, die an einigen Stellen wie z.B. dem Leitungsmaterial oder den Flussreglern jedoch noch verbessert werden könnte.

Literatur

- [Aam08] **K. Aamodt et al**, *The ALICE Experiment at the CERN LHC*, The ALICE Collaboration, JINST 3 S08002 (2008)
- [Bae05] **H. D. Baehr**: *Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen*, 12. neu bearb. und erw. Aufl., (Springer, Berlin 2005)
- [Dem04] **B. M. Demirköz**: *A Transition Radiation Detector and Gas Supply System for AMS*, Master of Science Thesis (k.V., Massachusetts 2004), http://ams.cern.ch/AMS/Thesis/AMSnote-2004_05_02.pdf (zuletzt eingesehen am 28.06.2012)
- [Dem08] **W. Demtröder**: *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme*, 5. neu bearb. und aktual. Aufl., (Springer, Berlin 2008)
- [Edg1] **Edgetech Company**: *DewMaster Broschüre*, http://www.edgetech.com/docs/dewmaster_brochure.pdf (zuletzt eingesehen am 02.07.2012)
- [Edg2] **EdgeTech Company**: *DewMaster - Chilled Mirror Hygrometer - OPERATORS MANUAL*, (Marlborough)
- [Gri10] **W. Grimus**: *Einführung in die Statistische Physik und Thermodynamik - Grundlagen und Anwendungen*, (Oldenbourg, München 2010) 57f.
- [Nic11] **U. Nickel**: *Lehrbuch der Thermodynamik - Eine verständliche Einführung*, 2. erw. Aufl. (PhysChem, Erlangen 2011)
- [NIST] **P.J. Linstrom, W.G. Mallard, Eds.**: *NIST Chemistry WebBook - NIST Standard Reference Database Number 69*, National Institute of Standards and Technology (Gaithersburg MD, 2012), <http://webbook.nist.gov> (zuletzt eingesehen am 29.06.2012)
- [Sat11] **H. Satz**: *The Quark-Gluon Plasma - A Short Introduction*, In: arXiv:1101.3937v1 [hep-ph], BI-TP 2011/02 (2011)
- [Son90] **D. Sonntag**: *Important new Values of the Physical Constants of 1986, Vapour Pressure Formulations based on ITS-90, and Psychrometer Formulae*. In: Z. Meteorol. 40, 5, S. 340-344, (1990)
- [Vai12] **Vaisala Company**: *Vaisala Humidity Calculator*, http://www.vaisala.com/humiditycalculator/vaisala_humidity_calculator.html?lang=de (zuletzt eingesehen am 23.07.2012)
- [Web02] **D. Weber**: *Technische Feuchtemessung in Gasen und Festkörpern*, überarb. Neu- dr. der 1. Aufl., (Vulkan, Essen 2002)

[Wei09] **C. Weinheimer**: *Skript zur Vorlesung Kern- und Teilchenphysik I*, (k.V., Münster 2009)

Danksagung

Am Ende dieser Arbeit angelangt möchte ich zunächst allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe Wessels und Herrn Prof. Dr. Wessels selbst danken, die diese Arbeit erst ermöglicht haben. Besonderer Dank gilt dabei Dr. Tom Dietel, der meine Fragen stets geduldig beantwortet und entscheidende Denkanstöße für diese Arbeit geliefert hat. Auch Martin Kohn gilt besonderer Dank, der mich bei allen Problemen und Fragen - technischer, praktischer als auch theoretischer Natur - tatkräftig unterstützt und mit einem Klasse-Engagement zu dessen Lösung und Beantwortung beigetragen hat. Weiterhin bedanke ich mich bei Wolfgang Verhoeven für seine technische Unterstützung beim Aufbau des Systems.

Ein weiterer Dank gilt Christian Baumann und meiner Familie für ihre moralische Unterstützung.

Zuletzt danke ich Kathi, die mir mehr als das ein oder andere Mal ein offenes Ohr schenkte und mich auf Durststrecken, sowohl im als auch außerhalb des Studiums, fortwährend motivierte, weiter zu machen.

Plagiatserklärung der / des Studierenden

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über _____
_____ 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)