



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Jannik Bade

Entwicklung eines Laborversuches zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit mit Hilfe eines Taupunktspiegels in ruhender und strömender Umgebung

Jannik Bade

**Entwicklung eines Laborversuches zur Bestimmung
der Luftfeuchtigkeit mit Hilfe eines Taupunktspiegels
in ruhender und strömender Umgebung**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Frau Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell
Zweitprüfer/in: Herr Dipl.-Ing. Alexander von Stryk

Abgabedatum: 10.05.2022

Zusammenfassung

Jannik Bade

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung eines Laborversuches zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit mit Hilfe eines Taupunktspiegels in ruhender und strömender Umgebung

Stichworte

Feuchte Luft, Aspirationspsychrometer, Taupunktspiegel, LabVIEW, Klimaschrank, Laborversuch

Kurzzusammenfassung

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung und Konstruktion für Haltevorrichtungen der Versuchsstände "Zeolith-Speicher" und "Klimaschrank" für einen Taupunktspiegel. Diese Vorrichtungen müssen rückbaubar sein und die Funktionalität des Taupunktspiegel gewährleisten. Des Weiteren wird das Aspirationspsychrometer nach Aßmann und dessen Berechnung der relativen Feuchte vorgestellt.

Aufgabenstellung

Thema:

Entwicklung eines Laborversuches zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit mit Hilfe eines Taupunktspiegels in ruhender und strömender Umgebung

Schwerpunkte:

Im Zentrum für Energietechnik des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen wird ein Versuchsstand zur experimentellen Untersuchungen von feuchter Luft mit unterschiedlichen Temperaturen und unterschiedlichen Feuchtegraden entwickelt. Dabei soll ein Taupunktspiegel der Firma MICHELL Instruments verwendet werden. Die Messung mit diesem Gerät soll zum einen in einer ruhenden und zu anderen in einer strömenden Umgebung stattfinden. Die Umsetzung erfordert eine Möglichkeit den Taupunktspiegel zwischen beiden Umgebungen einfach wechseln zu können. Dies ist erforderlich, um beide Versuchsstände (Zeolith-Speicher und Klimaschrank) über eine Schnittstelle bedienen und auslesen zu können. Dafür muss in beiden Fällen eine Konstruktion entwickelt und anschließend gefertigt werden. Die Anbindung an die SPS und Implementierung in die LabVIEW Oberfläche des "Zeolith-Speicher" Stands ist ebenso ein wichtiger Punkt für die spätere Auswertung des Versuchs. Ein weiterer Teil der Arbeit, soll sich mit der Theorie des Taupunktspiegels und anderen Methoden zur Bestimmung der Feuchtigkeit der Luft, wie etwa das Aspirationspsychrometer, beschäftigen.

Es sind daher im Besonderen folgende Aufgaben zu bearbeiten:

- Aufbau und Inbetriebnahme des Klimaschranks
- Entwicklung und Konstruktion einer Halterung des MICHELL-Taupunktspiegel für den Bypass und Klimaschrank (Fertigung: 3D-Druck oder Werkstatt)
- Anbindung des Taupunktspiegels an die SPS und die bestehende LabVIEW Oberfläche
- Theoretische Auseinandersetzung mit dem Taupunktspiegel und dem Aspirationspsychrometer (Aufbau, Funktionsprinzip, etc.)
- Entwicklung eines Laborversuchs.
-

Am Ende der Arbeit sind die Ergebnisse kritisch zu bewerten. Die Ergebnisse der Arbeit sind in entsprechender Schriftform darzustellen und zu dokumentieren. Der Fortgang der Arbeit ist in regelmäßigen Abständen mit den Betreuern der Arbeit zu diskutieren.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
1 Einleitung.....	10
2 Aspirationspsychrometer nach Aßmann	11
2.1 Aufbau und Funktionsweise.....	11
2.2 Diagramm.....	12
2.3 Berechnung	13
3 Taupunktspiegel	18
4 Klimaschrank	19
4.1 Spezifikationen	19
4.2 Aufbau und Inbetriebnahme.....	20
4.3 Steuerung.....	21
5 Konzeptentwicklung und Konstruktion	22
5.1 Zeolith-Speicher	22
5.2 Klimaschrank.....	24
6 LabVIEW	25
6.1 Das Konzept.....	25
6.2 Beschreibung des Programms.....	25
7 Laborversuch.....	26
8 Darstellung der Ergebnisse.....	30
8.1 Messungen mit dem Taupunktspiegel am Zeolith-Speicher	30
8.2 Messungen mit dem Taupunktspiegel am Klimaschrank.....	31
9 Zusammenfassung und Fazit.....	32
10 Literatur.....	34
Anhang	36

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
e'	Wasserdampfpartialdruck	Pa
e_w	Sättigungsdampfdruck in reine Phase über Wasser	Pa
e'_w	Sättigungsdampfdruck im realen Gas	Pa
f	Enhancement Faktor	–
p	Druck	Pa
p_n	Normaldruck	Pa
ϑ_L	Lufttemperatur	$^{\circ}C$
ϑ_w	Feuchttemperatur	$^{\circ}C$
φ	relative Luftfeuchtigkeit	%

Abkürzungsverzeichnis

ICH	International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
Optidew	Der Modellname des Taupunktspiegel, andere Bezeichnung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
VI	Virtual Instrument (LabVIEW Programm)
ZET	Zentrum für Energietechnik

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Sättigungszustand Wasser - Tabellenwerte	13
Tab. 2 Magnusparameter.....	14
Tab. 3 Koeffizienten - Wexler's-Gleichung	15
Tab. 4 Koeffizienten - alpha & beta.....	16
Tab. 5 Q1A(R2) - Allgemeine Bedingungen	27
Tab. 6 Q1A(R2) Bedingungen u.a. Klimaschränke.....	27
Tab. 7 Messungen mit dem Taupunktspiegel am Zeolith-Speicher	30

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Auswirkungen der Extreme relative Feuchte.....	10
Abb. 2 Aspirationspsychrometer nach Aßmann	11
Abb. 3 Psychrometerdiagramm über Wasser	12
Abb. 4 Visualisierung Berechnungsverfahren für den Sättigungsdampfdruck	15
Abb. 5 Taupunktspiegel	18
Abb. 6 Klimaschrank ICH110	19
Abb. 7 Temperatur-Feuchte-Arbeitsbereich [15]	20
Abb. 8 Konzept - Schematische Darstellung	22
Abb. 9 Zeolith-Speicher	22
Abb. 10 Konstruktion Zeolith-Speicher.....	22
Abb. 11 Ausbruchsansicht - Zeolith-Speicher PT100 Aufnahme	23
Abb. 12 Ausbruchsansicht - Zeolith-Speicher Taupunktspiegelaufnahme.....	23
Abb. 13 Klimaschrank Ansatz Prototyp	24
Abb. 14 Klimaschrank - Konstruktionsplanung	24
Abb. 15 Klimaschrank mit Taupunktspiegel	24
Abb. 16 LabVIEW Front Panel - Klimaschrank.vi	25
Abb. 17 Q1A(R2) Klimaprüfpunkte im Temperatur-Feuchte-Arbeitsbereich des Klimaschrank.....	26
Abb. 18 Datenbank.exe - Datenbank erstellen	28
Abb. 19 Startansicht - Klimaschrank.vi.....	28
Abb. 20 Datenbank.exe - Datenbank zu CSV	29
Abb. 21 Temperatur am Zeolith-Speicher	
Abb. 22 Relative Feuchte am Zeolith-Speicher	30
Abb. 23 Messungen mit dem Taupunktspiegel am Klimaschrank	31
Abb. 24 Auswirkung von Temperatur und Feuchte	32
Abb. 25 Empfohlener Abfahrplan der Klimaprüfpunkte.....	33

1 Einleitung

Temperatur und Feuchte, zwei Größen die unmittelbar zusammengehören. In Bereichen wie der Lüftungs- und Klimatechnik spielen sie eine große Rolle, wenn es um die Behaglichkeit von uns Menschen geht. So liegt der Behaglichkeitsbereich in etwa bei einer Temperatur von 22°C bis 26°C mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30% bis etwa 65%, aber max. 11,5 g/kg. Neben der reinen Behaglichkeit kann es aber auch zu schwerwiegenden gesundheitlichen Problemen führen. Beispielsweise durch Bakterien und Viren, dessen Bildung durch Extreme der relativen Luftfeuchten gefördert werden kann. [1, S. 118-119]

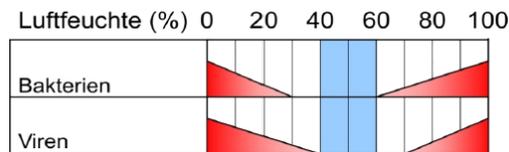


Abb. 1 Auswirkungen der Extreme relative Feuchte

Auch in der Industrie spielen die beiden Größen eine wichtige Rolle. Dafür lassen sich in einem Klimaschrank die Temperatur und Feuchte einstellen und so verschiedene Umweltbedingungen simulieren. Je nach Ausführung und Größe des Klimaschranks können unterschiedliche Temperaturbereiche mit Feuchteregulierung abgedeckt werden. Des Weiteren verfügen einige Modell auch über Lichtkassetten, mit den Tages- und auch UV-Licht ausgestrahlt wird, oder sogar über CO₂ Begasung. Die Anwendungsbereiche sind weit gestreut, und reichen von Stabilitätsprüfungen für die Pharmazie über Prüfungen von Metallen und elektrischen Bauteilen bis hin zu Insekten- und Pflanzenzucht. [2]

Um die Umgebungsbedingungen, wie Temperatur und Feuchte zu erfassen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, welche sich in Punkten wie dem Anwendungsbereich oder Gebiet, der Genauigkeit, dem Aufwand und auch den Kosten unterscheiden. In der VDI/VDE Richtlinie 3514 Blatt 2 werden einige Verfahren zur Feuchtebestimmung vorgestellt und kurz beschrieben. Diese Arbeit befasst sich mit zwei der dort genannten Verfahren, mit dem Aspirationspsychrometer nach Aßmann (Psychrometrisches Verfahren) und dem Taupunktspiegel-Hygrometer (Kondensationsverfahren), welche im weiteren Verlauf der Arbeit genauer erläutert werden.

2 Aspirationspsychrometer nach Aßmann

Bei dem Aspirationspsychrometer nach Aßmann handelt es sich um ein Psychrometrisches Verfahren, dessen Prinzip auf der Verdunstungstheorie basiert. Hierbei nimmt die Temperatur ab, wenn Wasserdampf verdunstet. [3, S. 4]

2.1 Aufbau und Funktionsweise

Das Aspirationspsychrometer besteht aus zwei Thermometern, einem Ventilator und dem Gehäuse, welches vor Strahlungseinflüssen schützt. Eins der beiden Thermometer (im nebenstehenden Bild, das rechte, mit den grünen Ringen am unteren Ende) ist mit Soff oder ähnlichem überzogen und wird mit Wasser feucht gehalten, das andere bleibt trocken. Über eine Feder lässt sich der Ventilator aufziehen und beim Loslassen ein konstanter Luftstrom von etwa $2,5 \text{ m/s}$ erzeugen. [4, S. 139]

Der am feuchten Thermometer vorbeiziehende Luftstrom lässt das Wasser verdunsten, wodurch sich das Thermometer abkühlt. Bei relativen Feuchten unter 100% zeigt dieses Thermometer also eine geringere Temperatur als das trockene Thermometer an. [3, S. 4-5]

Aus der sich ergebenden Temperaturdifferenz zwischen dem trockenen und feuchten Thermometer lässt sich die relative Feuchte ableiten. Die erste Möglichkeit die relative Feuchte zu ermitteln, bieten Diagramme oder eine Psychrometertafel. Die Qualität der Aussage über die relative Feuchte hängt von der Aufteilung der Diagramme bzw. der Psychrometertafel ab. Die andere Möglichkeit ist die Berechnung über die Psychrometerformel. Für die Messwertaufnahme wird eine mehrfache Durchführung empfohlen, da das Thermometer empfindlich gegenüber Mikroschwankungen der Lufttemperatur ist. Die aufgenommenen Messwerte werden im Anschluss gemittelt. [4, S. 141]

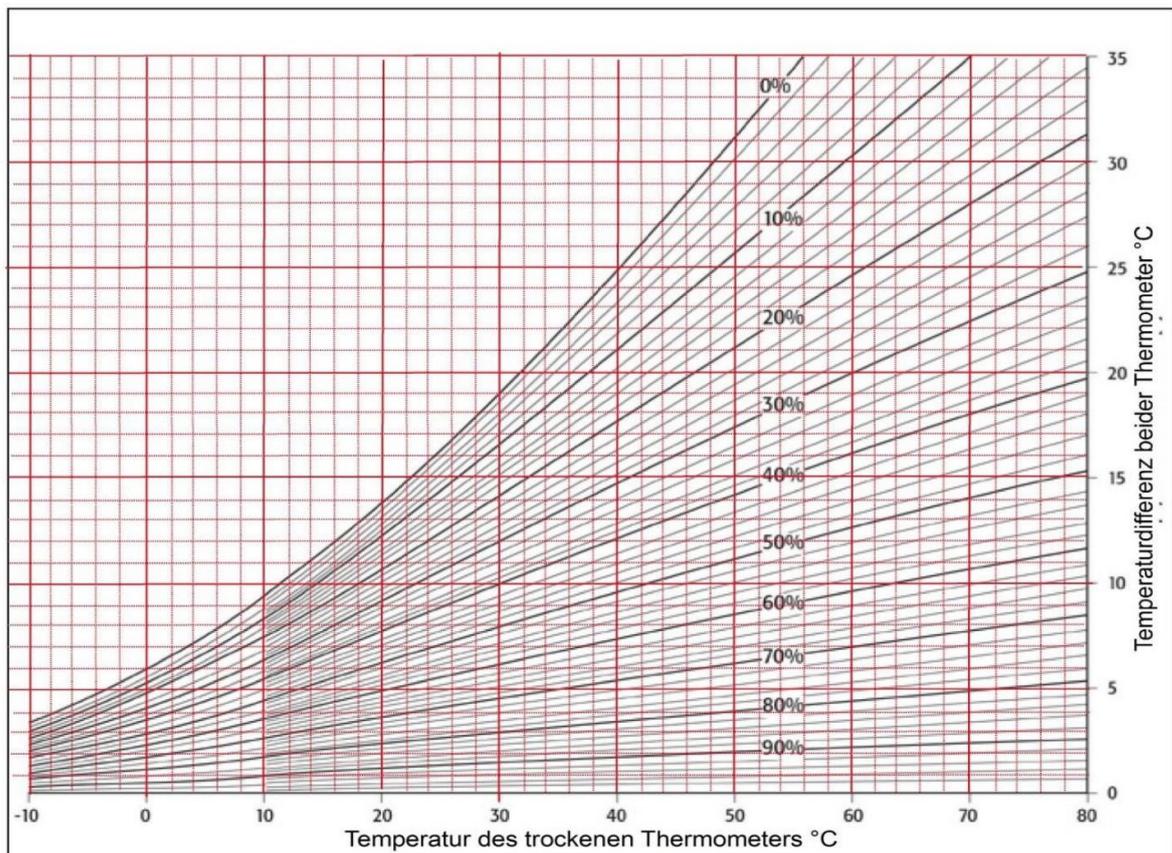
Es ist zu beachten, dass es für die Verdunstung über Wasser und die Sublimation über Eis unterschiedliche Diagramme und auch Berechnungen gibt. Die folgenden Diagramme und Berechnungen gelten, sofern nicht explizit erläutert ausschließlich für die Verdunstung über Wasser.



Abb. 2
Aspirationspsychrometer
nach Aßmann

2.2 Diagramm

Mit Diagrammen lässt sich die relative Feuchte schnell und direkt für die gemessenen Temperaturen ablesen. Das folgende Diagramm ist nur für die Sättigung über Wasser gültig. Bei einer Sättigung der feuchten Luft über Eis muss ein anderes Diagramm verwendet werden.



Grafik: Ingo Mennerich

Abb. 3 Psychrometerdiagramm über Wasser

[5, S. 4]

Auf der Abszisse (horizontale Achse) ist die Temperatur des trockenen Thermometers, also die Umgebungstemperatur abzulesen, hier in °C. Auf der Ordinate (vertikale Achse) findet sich die Temperaturdifferenz (korrekterweise in K, statt °C), die sich wie folgt berechnen lässt:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_L - \vartheta_w \quad (2.1)$$

Dabei ist

- $\Delta\vartheta$ Temperaturdifferenz in K
- ϑ_L trockene Thermometertemperatur in °C
- ϑ_w feuchte Thermometertemperatur über Wasser in °C

Beispiel:

So beträgt die relative Feuchte für $\vartheta_L = 22^\circ\text{C}$ und $\vartheta_w = 18^\circ\text{C}$ in etwa 70%

2.3 Berechnung

Die Berechnung orientiert sich an der VDI/VDE 3514 Richtlinie.

Für die weitere Berechnung sind zuerst die trockene und feuchte Thermometertemperatur, sowie der Umgebungsdruck zu ermitteln, wenn dieser von Normaldruck abweicht. In den meisten Fällen kann man aber mit dem Normaldruck $p_n = 101325 \text{ Pa}$ rechnen.

- ϑ_L Temperatur am trockenen Thermometer in °C
- ϑ_w Temperatur am feuchten Thermometer in °C
- p Umgebungsdruck in Pa

Beim Sättigungsdampfdruck befinden sich die flüssige (oder feste) und die gasförmige Phase eines Stoffes im thermischen Gleichgewicht. In diesem Zustand koexistieren beide Phasen, das heißt es verdampft und kondensiert die gleiche Menge pro Zeiteinheit. Beziehungsweise sublimiert und resublimiert, wenn es sich um ein Feststoff-Dampf-System handelt. [6, S. 1]

Die Berechnung der relativen Feuchte erfolgt in mehreren Schritten. Ausgangspunkt ist der Sättigungsdampfdruck in der reinen Phase, der mittels eines Korrekturfaktor auf das reale Mischgas feuchte Luft angepasst wird. Mit der Psychrometerformel nach Sonntag wird aktuell herrschender Wasserdampfpartialdruck ermittelt und ins Verhältnis mit dem Sättigungsdampfdruck der vorliegenden Temperatur gesetzt, bekannt als relative Feuchte.

Sättigungsdampfdruck in reine Phase über Wasser

Um den Sättigungsdampfdruck zu ermitteln, bestehen mehrere Möglichkeiten. Hierbei ist die erforderliche Genauigkeit oder die zur Verfügung stehende Mittel ausschlaggebend.

Möglichkeit 1: Literatur / Tabellenwerte (ggf. Interpolation) [7, S. 177-178]

ϑ in °C	e_w In Pa
0	611,2
0,011	611,7
5	872,6
10	1228,2
15	1705,7
20	2339,2
25	3169,7
30	4246,7
35	5628,6
40	7384,4
45	9594,4
50	12351
55	15761
60	19946
65	25041
70	31201
75	38595

ϑ in °C	e_w In Pa
80	47415
85	57867
90	70182
95	84609
100	101420
110	143380
120	198670
130	270260
140	361500
150	476100
160	618140
170	792050
180	1002600
190	1255000
200	1554700
210	1907400
220	2319300

ϑ in °C	e_w In Pa
230	2796800
240	3346700
250	3975900
260	4692100
270	5502800
280	6416500
290	7441600
300	8587700
310	9864700
320	11284000
330	12858000
340	14600000
350	16529000
360	18666000
370	21043000
373	21813000

Tab. 1 Sättigungszustand Wasser - Tabellenwerte

Für Temperaturen zwischen 0°C und 373°C die sich nicht als Tabellenwert wiederfinden, lässt sich mittels linearer Integration ein Wert abschätzen.

$$e_w(\vartheta) = \frac{\vartheta - \vartheta_1}{\vartheta_2 - \vartheta_1} \cdot [e_w(\vartheta_2) - e_w(\vartheta_1)] + e_w(\vartheta_1) \quad (2.2)$$

Dabei ist

ϑ gesuchte Temperatur in °C

$\vartheta_{1,2}$ Temperaturwert aus der Tabelle unter/über der gesuchten Temperatur in °C

$e_w(\vartheta_{1,2})$ Sättigungsdampfdruck zur Temperatur in Pa

Die Lineare Interpolation berechnet nicht den 100% realen Wert, jedoch eine sehr gute Näherung bei ausreichend kleinen Abständen der Tabellenwerte und für viele technische Anforderungen völlig ausreichend.

Beispiel:

$$e_w(\vartheta_L = 22^\circ C) = 2671,4 \text{ Pa}$$

$$e_w(\vartheta_L = 18^\circ C) = 2085,8 \text{ Pa}$$

Möglichkeit 2: Magnus Formel (einfache Näherungsformel) [8, S. 7]

Diese wird in vielen Publikationen angegeben, so auch in der VDI/VDE Richtlinie 3514.

$$e_w(\vartheta) = C_1 \cdot \exp\left(\frac{C_2 \cdot \vartheta}{C_3 + \vartheta}\right) \quad (2.3)$$

Magnusparameter [8, S. 8]

Die Werte für C_1 wurden mit 100 multipliziert (Umrechnung von hPa in Pa)

ϑ in °C	C_1 in Pa	C_2 -	C_3 in °C
-80 ... 0,01 (über Eis)	611,2	22,46	272,62
-45 ... 50 (über Wasser)	611,2	17,62	243,12
50 ... 180	595	16,819	227,3163

Tab. 2 Magnusparameter

Beispiel:

$$e_w(\vartheta_L = 22^\circ C) = 2637,4 \text{ Pa}$$

$$e_w(\vartheta_w = 18^\circ C) = 2059,1 \text{ Pa}$$

Möglichkeit 3: Wexler's-Gleichung [9, S. 2-3]

Der Gültigkeitsbereich liegt bei: 0°C bis 100°C

$$e_w(\vartheta) = \exp \left[\sum_{i=0}^6 g_i \cdot (\vartheta + 273,15)^{i-2} + g_7 \cdot \ln(\vartheta + 273,15) \right] \quad (2.4)$$

g_0	$-2,8365744 \cdot 10^3$	g_4	$1,6261698 \cdot 10^{-5}$
g_1	$-6,028076559 \cdot 10^3$	g_5	$7,0229056 \cdot 10^{-10}$
g_2	$1,954263612 \cdot 10^1$	g_6	$-1,8680009 \cdot 10^{-13}$
g_3	$-2,737830188 \cdot 10^{-2}$	g_7	2,7150305

Tab. 3 Koeffizienten - Wexler's-Gleichung

Beispiel:

$$e_w(\vartheta_L = 22^\circ\text{C}) = 2645,3 \text{ Pa}$$

$$e_w(\vartheta_w = 18^\circ\text{C}) = 2064,7 \text{ Pa}$$

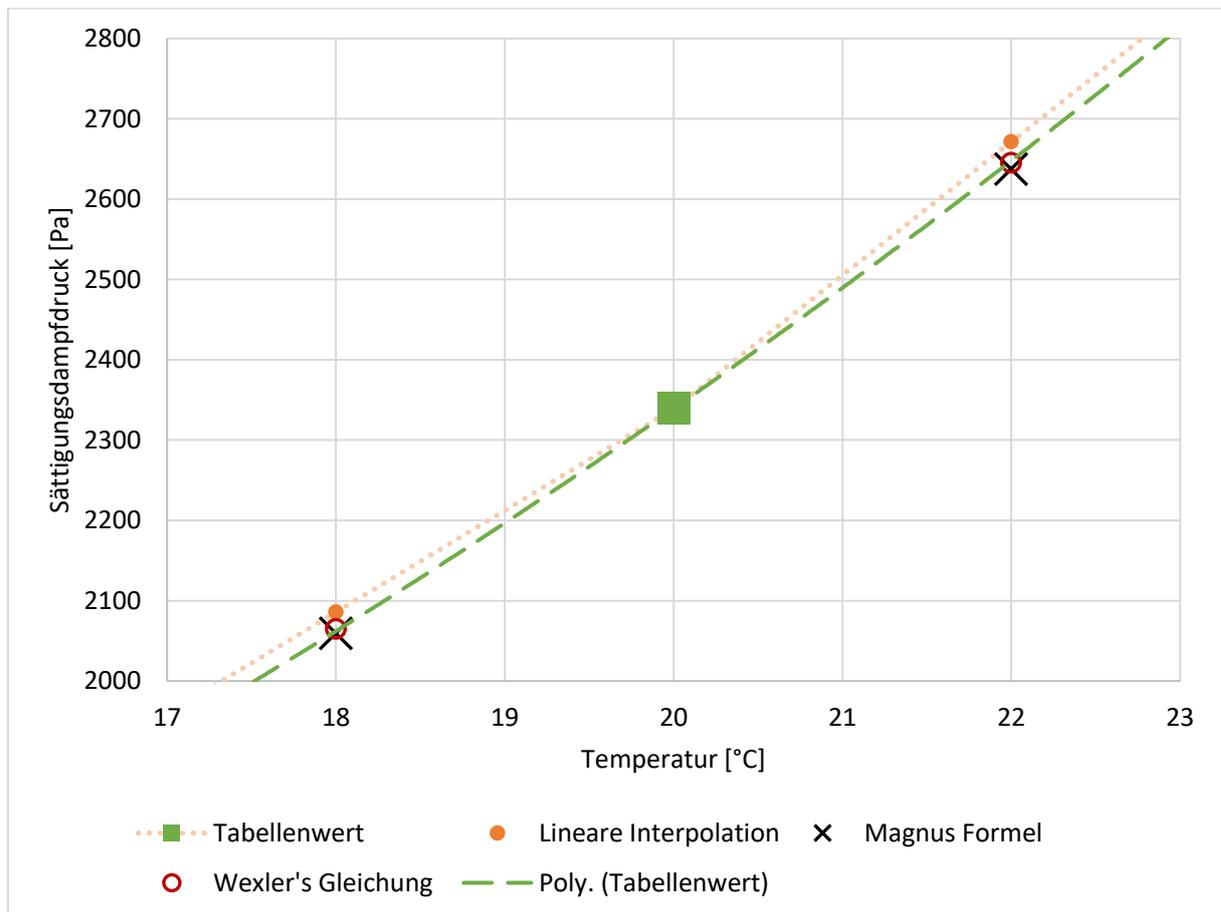


Abb. 4 Visualisierung Berechnungsverfahren für den Sättigungsdampfdruck

In diesem Diagramm sind die Berechnungsergebnisse der drei Verfahren abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die Werte sehr dicht beieinander liegen. Daher lassen sich für die meisten technischen Anwendungen auch die Lineare Interpolation und die Magnus Formel verwenden, wie es auch in der VDI/VDE 3514 Blatt 1 Richtlinie steht. [8, S. 7]

Enhancement Faktor

Der Sättigungsdampfdruck e_w gilt nur für das Ein-Stoffsystem von Wasser und Wasserdampf, das heißt unter Ausschluss anderer Gase, wie der Luft. [8, S. 7]

Der Sättigungsdampfdruckes in dem realen Gasgemisch feuchter Luft wird über einen Korrekturfaktor, dem sogenannten Enhancement Faktor angepasst. Dieser Wert liegt bei Normaldruck bei 1,004 und steigt bei 1 MPa auf 1,03 an. [8, S. 9] Weicht der Druck zu stark von dem Normaldruck ab, kann dieser auch berechnet werden.

Bei den nachfolgenden Gleichungen handelt es sich um Näherungsgleichungen, zu den experimentellen Untersuchungen von Hyland. [10] Sie ermöglichen eine Berechnung des Enhancement Faktor für CO₂-freie feuchte Luft in einem Druckbereich von 0,1 bis 2 MPa. [11]

Die Formeln (2.5), (2.6), (2.4) und (2.7) und ihre Koeffizienten gelten für die IST-90 Temperaturskala in einem Temperaturbereich von 0°C bis 100°C über Wasser. [9, S. 1]

$$\alpha = \sum_{i=0}^3 A_i \cdot \vartheta^i \quad (2.5)$$

$$\beta = \exp \left[\sum_{i=0}^3 B_i \cdot \vartheta^i \right] \quad (2.6)$$

Dabei ist

A_0	$3,53624 \cdot 10^{-4}$	B_0	$-1,07588 \cdot 10^1$
A_1	$2,9328363 \cdot 10^{-5}$	B_1	$6,3268134 \cdot 10^{-2}$
A_2	$2,6168979 \cdot 10^{-7}$	B_2	$-2,5368934 \cdot 10^{-4}$
A_3	$8,5813609 \cdot 10^{-9}$	B_3	$6,3405286 \cdot 10^{-7}$

Tab. 4 Koeffizienten - alpha & beta

[9, S. 6]

Enhancement Faktor [9, S. 5]

$$f = \exp \left[\alpha \left(1 - \frac{e_w}{p} \right) + \beta \left(\frac{p}{e_w} - 1 \right) \right] \quad (2.7)$$

Dabei ist

α	Koeffizient nach (2.5)
β	Koeffizient nach (2.6)
p	Umgebungsdruck in Pa
e_w	Sättigungsdampfdruck in reiner Phase nach Wexler (2.4) in Pa

Sättigungsdampfdruck im realen Gas

$$e'_w(p, \vartheta) = f(\vartheta, p) \cdot e_w(\vartheta) \quad (2.8)$$

Aspirationspsychrometer nach Aßmann

Der aktuelle Zusammenhang zwischen den gemessenen Temperaturen, dem Druck und dem Sättigungsdampfdruck in der Luft wird mit der Psychrometerformel nach Sonntag beschrieben. [3, S. 5]

$$e' = e'_w(p, \vartheta_w) - A_w \cdot (1 + 0,000944 \cdot \vartheta_w) \cdot p \cdot (\vartheta_L - \vartheta_w) \quad (2.9)$$

Bei $\vartheta_w > 30^\circ\text{C}$ liefert die Nachfolgende Gleichung eine höhere Genauigkeit

$$e' = e'_w(p, \vartheta_w) - A_w \cdot (1 + 0,000944 \cdot \vartheta_w) \cdot [p - e'_w(p, \vartheta_w)] \cdot (\vartheta_L - \vartheta_w) \quad (2.10)$$

Dabei ist

$A_w = 6,53 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ die Psychrometerkonstante, für Bauform nach Aßmann

ϑ_L Temperatur am trockenen Thermometer in $^\circ\text{C}$

ϑ_w Temperatur am Feuchtthermometer in $^\circ\text{C}$

Die relative Feuchte über Wasser [8, S. 6]

$$\varphi = \frac{e'}{e'_w(p, \vartheta_L)} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

3 Taupunktspiegel

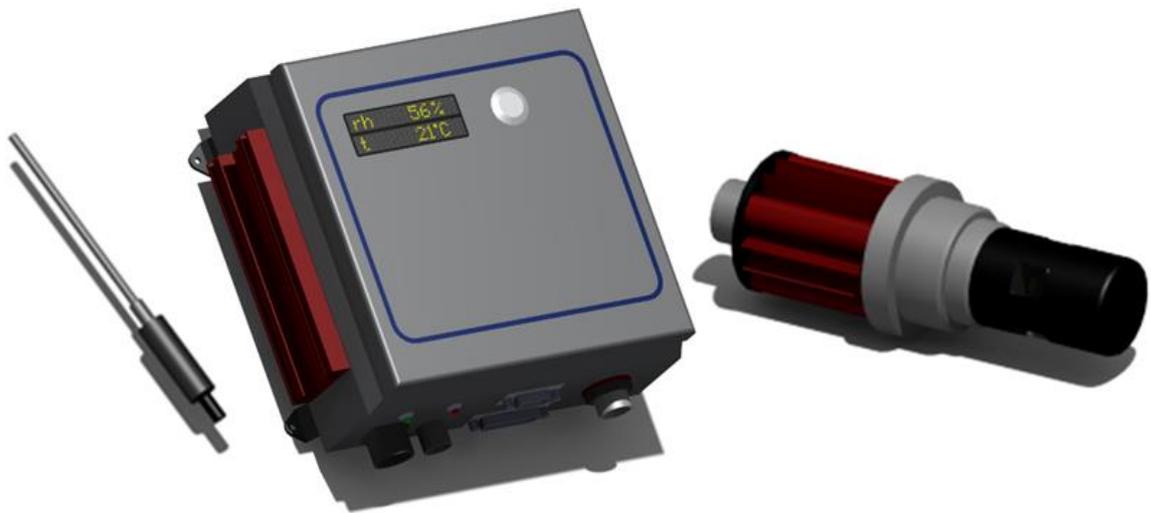


Abb. 5 Taupunktspiegel

Bei dem hier verwendeten Taupunktspiegel handelt es sich um das Modell Optidew der Firma MICHELL Instruments mit einem Zweizeiler Display.

Die Messung mit dem Taupunktspiegel ist ein Kondensationsverfahren. [3]

Das Gas, in diesem Fall die feuchte Luft strömt durch die Öffnung im Taupunktspiegel über eine verspiegelte metallische Oberfläche. Der im inneren befindlichen Spiegel, reflektiert das Licht einer LED. Die reflektierte Lichtmenge wird gemessen und als Referenz gespeichert. Zudem wird der Spiegel mit einem Peltier-Element temperiert, um ständig eine Kondensat Schicht auf der Spiegeloberfläche zu erhalten. Bleibt die Kondensat Schicht konstant, verdampfen und kondensieren die gleichen Mengen. Zu diesem Zeitpunkt stellt sich die Taupunkttemperatur ein, mit welcher die relative Feuchte berechnet werden kann. [12, S. 15]

Der Taupunktspiegel übermittelt seine Messungen über ein USB zu RS232 Kabel in einem Datenstring. Dieser Datenstring beinhaltet alle Messwerte, die sich nach bestimmten Regeln daraus ableiten lassen. Näheres dazu im Handbuch [12]

4 Klimaschrank

Bei dem Klimaschrank handelt es sich um das Modell ICH110 des Herstellers Memmert GmbH + Co. KG. Die Modell Nummer 110 bezieht sich auf das Innenraumvolumen, welches mit 108 Litern angegeben wird. [13, S. 13] Des Weiteren besitzt der Klimaschrank eine Durchföhrung in der Röckwand mit einem Innendurchmesser von 40 mm, welcher sich über einen beiliegenden Silikon-Verschlussstopfen verschließen lässt.

Bei der Verwendung des Begriffs Klimaschrank wird sich auf dieses Modell bezogen, sofern nicht ausdrücklich was anderes gemeint ist.



Abb. 6 Klimaschrank ICH110

4.1 Spezifikationen

Der Klimaschrank lässt sich in der Temperatur und Feuchte einstellen. Zusätzlich kann die Drehzahl des eingebauten Lüfters angepasst werden. Einige der bedeutendsten Spezifikationen sind nachfolgend aufgeföhrt.

Temperatur

Vorab ist zu erwähnen, dass der Klimaschrank nicht für den Dauerbetrieb bei Minusgraden geeignet ist. Die Temperatur lässt sich zwischen -10°C und $+60^{\circ}\text{C}$ in $0,1\text{K}$ Schritten einstellen, jedoch nur ohne Feuchte. Wird zusätzlich die Feuchte geregelt ändert sich der einstellbare Temperaturbereich auf $+10^{\circ}\text{C}$ bis $+60^{\circ}\text{C}$. Im Klimaschrank sind zwei PT100-Sensoren der Klasse A zur Temperatureaufnahme verbaut.

Feuchte

Die Feuchte kann in $0,5\%$ Schritten von 10% bis 80% relativer Luftfeuchtigkeit angepasst werden. Ein Heißdampferzeuger übernimmt die Befeuchtung mit destilliertem Wasser, welches aus einem externen Behälter durch eine im Klimaschrank eingebaute Pumpe angesaugt wird. Für die Entfeuchtung werden Peltier-Köhlelemente verwendet.

Lüfter

Dieser lässt sich von 10% bis 100% in einer Schrittgröße von 10% , ohne weitere Angaben einstellen.

Umgebungsbedingungen

Bei der Aufstellung des Klimaschrank gibt es einige Anforderungen, die eingehalten werden müssen, um einen reibungslosen Betrieb zu garantieren. So darf der Aufstellungsort maximal 2000 m über NN (für das ZET mit $H_{HH} = 21\text{ m}$ ist diese Bedingung erfüllt [14, S. 36]) und die relative Feuchte bei maximal 70% liegen. Die Umgebungstemperatur sollte zwischen 15°C und 28°C liegen. Zudem muss der minimale Abstand zu umliegenden Wänden/Decken gegeben sein. Die Röckwand des Klimaschrank muss mindesten 15 cm , die Seitenwände mindesten 5 cm Abstand zur Wand oder nebenstehenden Geräten haben. Oberhalb müssen es mindesten 20 cm sein.

Abmessungen

- äußeren Abmaße (B x H x T): 745mm x 1233mm x 585mm (+56mm Türgriff)
- Innenraum (B x H x T): 560mm x 480mm x 400mm (-33mm Lüfter)

Temperatur-Feuchte-Arbeitsbereich

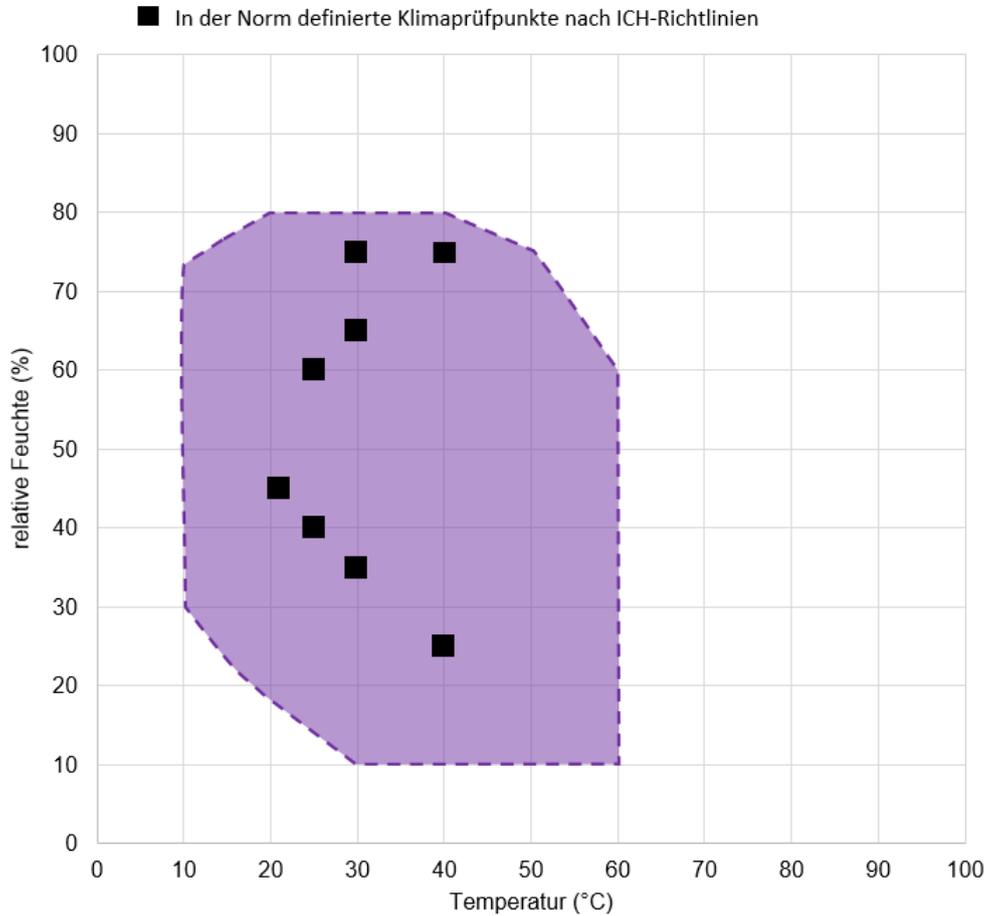


Abb. 7 Temperatur-Feuchte-Arbeitsbereich [15]

4.2 Aufbau und Inbetriebnahme

Der Klimaschrank muss nach der Lieferung aus der Verpackung und von der Palette gehoben werden. Zur Inbetriebnahme muss er lediglich an den Strom angeschlossen werden, und für eine Befeuchtung der externe Behälter mit destilliertem Wasser befüllt werden.

Ein zusätzlich angeschlossenes Netzkabel ermöglicht einen Zugriff über das Netzwerk.

Das Gerät wird über den Hauptschalter, vorne am Bedienpult ein und ausgeschaltet.

4.3 Steuerung

Die Steuerung kann über mehrere Wege stattfinden. Der einfachste Weg ist die manuelle Eingabe der Parameter, direkt über das Bedienpult auf der Vorderseite des Klimaschrank. Über die Touch Funktion lassen sich die Parameter einfach auswählen und mittel des Drehknopfs die Werte manipulieren. Durch Drücken des Drehknopfes werden die Eingaben bestätigt.

Für zeitlich geplante oder periodische Abläufe, oder einfach als weitere Möglichkeit verfügt der Klimaschrank über eine USB und Ethernet-Schnittstelle. Mit der Software "AtmoCONTROL" des Herstellers lassen sich Abläufe am Rechner schreiben und auf den Klimaschrank übertragen. Diese Übertragung kann per USB oder Ethernet erfolgen.

[13]

Die andere Möglichkeit, welche auch im Rahmen dieser Arbeit benutzt wird, ist die Steuerung über das Netzwerk mittels einer API. Ist man mit demselben Netzwerk wie auch der Klimaschrank verbunden lassen sich dessen Parameter einfach über den Browser steuern und/oder abfragen. Das Gerät stellt unter der Option „Fernbedienung“ dem Benutzer nur „Leserechte“ oder auch „Lese- und Schreibrechte“ zur Auswahl. Werden Schreibrechte über diese Fernbedienung erteilt lassen sich die Parameter am Klimaschrank erstmal nicht direkt verändern. Ist doch ein Eingreifen erforderlich lassen sich die Zugriffsrechte auf nur lesen ändern und erlauben dem Benutzer so manuelle Änderung. Über den VPN Zugang der Hochschule ist somit auch eine Steuerung von zuhause aus möglich.

Über die URL lassen sich die Abfrage- und Steuerbefehle übermitteln, welche in Echtzeit am Klimaschrank eingehen und eine Rückmeldung der Parameter im JSON String Format zurückgeben.

Anfrage: [16, S. 6]

```
http://[ IP_Adresse_Klimaschrank]/atmoweb?[key1]=[value1]&[key2]=value2]
```

Im LabVIEW Programm wird der folgende Ausdruck benutzt:

```
http://[IP_Adresse_Klimaschrank]/atmoweb?TempSet=&Temp1Read=&HumSet=&HumRead=&FanSet=&FanRead=
```

Als Rückmeldung kommt folgendes:

```
"TempSet": 20, "TempSet_Range": {"min": -10, "max": 60}, "Temp1Read": 20.038, "HumSet": 40, "HumSet_Range": {"min": 10, "max": 80}, "HumRead": 41.477, "FanSet": 10, "FanSet_Range": {"min": 10, "max": 100}, "FanRead": 10,
```

Aus dieser Rückmeldung lassen sich die gewünschten Werte extrahieren. Ändern lässt sich ein Wert, indem man hinter dem Gleichzeichen einen zulässigen Wert angibt.

Beispielsweise:

```
http://[ IP_Adresse_Klimaschrank]/atmoweb? TempSet=30&HumSet=55
```

Hiermit werden die Temperatur und die relative Feuchte angepasst.

5 Konzeptentwicklung und Konstruktion

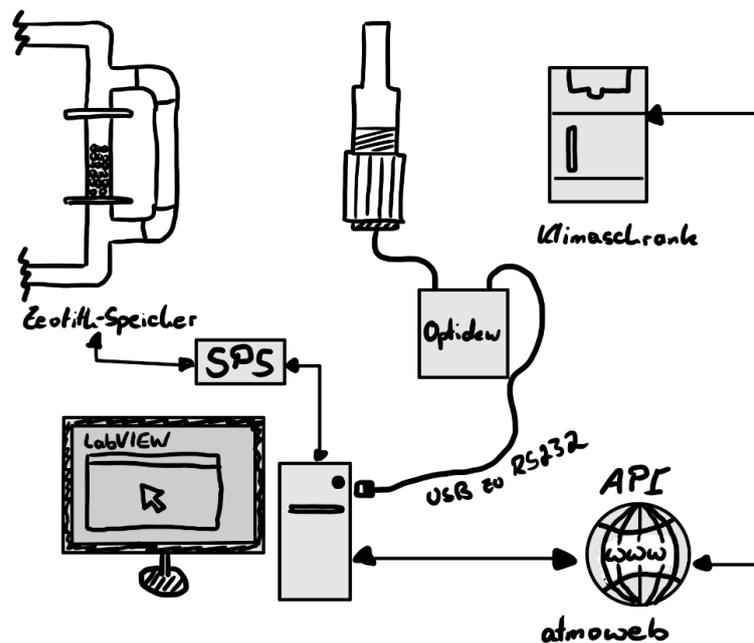


Abb. 8 Konzept - Schematische Darstellung

5.1 Zeolith-Speicher

Nach einer ersten Übersicht bestand der erste Teil der Arbeit darin ein geeignetes Konzept für die spätere Umsetzung zu entwickeln. Der Zeolith-Speicher-Versuchstand ist zu Beginn dieser Arbeit voll funktionsfähig gewesen, daher bestand die Aufgabe nur in der Implementierung des Taupunktspiegels in einer geeigneten Form. Die erste Idee, welche dann im späteren Verlauf auch erfolgreich umgesetzt wurde, ist recht trivial. Der vertikale Teil des bestehenden Bypasses kann schnell und einfach ausgebaut werden. Somit war die Idee einen neuen Teil zu konstruieren, welcher eine Aufnahme für den Taupunktspiegel und das zugehörige PT100-Thermometer beinhaltet naheliegend.



Abb. 9 Zeolith-Speicher

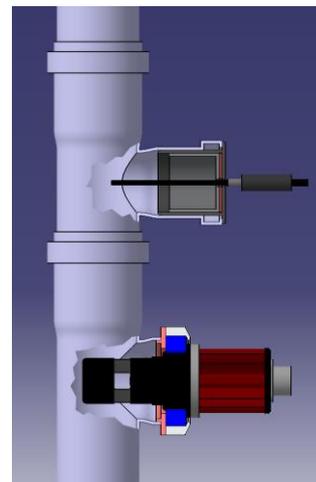


Abb. 10 Konstruktion Zeolith-Speicher

Das vertikale Rohr im Zeolith-Speicher ist 500 mm lang und hat einen Durchmesser von 50 mm. Somit sind die Grundmaße für das neue Einsatzstück vorgegeben. Der neue Einsatz

Konzeptentwicklung und Konstruktion

besteht aus drei Komponenten, unten angefangen mit dem DN50/50 Abzweig, gefolgt von einem DN50/40 Abzweig. Die fehlende Länge bis 500 mm wurde mit einem einfachen DN50 Rohr angepasst.

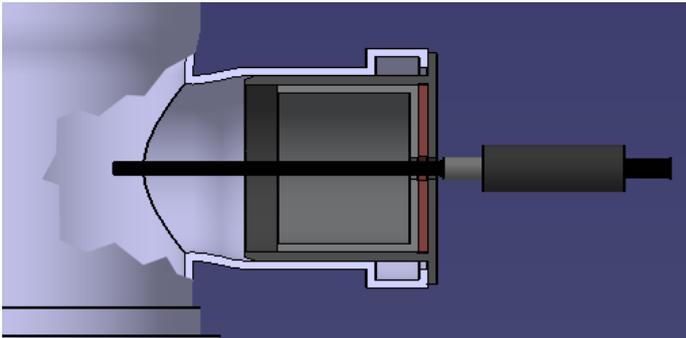


Abb. 11 Ausbruchsansicht - Zeolith-Speicher PT100 Aufnahme

Die Öffnung am DN50/40 Abzweig wurde mit einem Stopfen verschlossen. Dieser Stopfen beinhaltet eine Dichtung, welche von innen mit einem kleineren Stopfen fixiert wird. Eine Bohrung ermöglicht das Einsetzen des PT100 Widerstandsthermometer

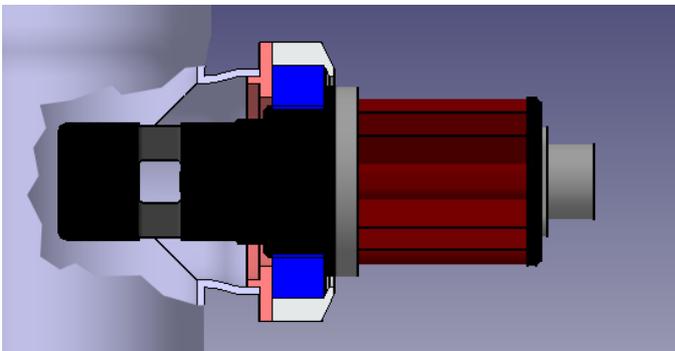


Abb. 12 Ausbruchsansicht - Zeolith-Speicher Taupunktspiegelaufnahme

Der Hals des unteren DN50/50 Abzweigs wurde gekürzt, sodass sich der Spiegel des Taupunktspiegel im Strömungskanal befindet. Verbinden lässt sich der Taupunktspiegel mit dem Einsatz über dessen Gewinde (M36x1,5).

5.2 Klimaschrank

Im Gegensatz zum Zeolith-Speicher-Versuchstand befand sich der Klimaschrank noch in seiner Verpackung auf einer Palette. Nach dem Auspacken begann auch hier die Entwicklung eines Konzeptes. Hierbei gab es mehrere Ansätze beziehungsweise Gedanken den Taupunktspiegel zu implementieren. Der Klimaschrank verfügt über einen Durchlass mit 40 mm Durchmesser an der Rückwand.

Die erste Idee dazu war ein Ansatzstück, welches auf der Rückseite befestigt wird. Nach weiteren Überlegungen und ersten 3D Modellen kam es zu dem Prototypen, welcher einen vielversprechenden Anschein machte.



Abb. 13 Klimaschrank Ansatz Prototyp

Der erste Funktionstest brachte ein anderes Ergebnis als erwartet. Die vom Taupunktspiegel wiedergegebenen Werte lagen völlig neben denen des Klimaschrank. Vermutlich lag es am fehlenden Raum zwischen dem Taupunktspiegel und der Rohrwand, sodass die Luft hier nicht ausreichend zirkulieren kann. Wieder am Anfang wurde nach neuen Ideen gesucht und schließlich auch eine gefunden.

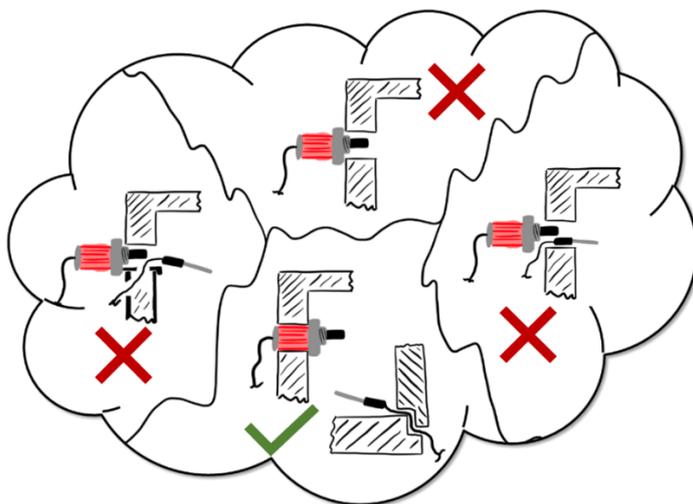


Abb. 14 Klimaschrank - Konstruktionsplanung



Abb. 15 Klimaschrank mit Taupunktspiegel

Am Ende ist für den Klimaschrank keine extra konstruierte Haltevorrichtung notwendig. Der Taupunktspiegel lässt sich passgenau von innen in den Klimaschrank einsetzen. Das PT100 wird dann vorne über die Tür eingelassen und das Kabel vorsichtig zwischen die Abdichtung gelegt.

6 LabVIEW

Ein großer Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines LabVIEW Programms.

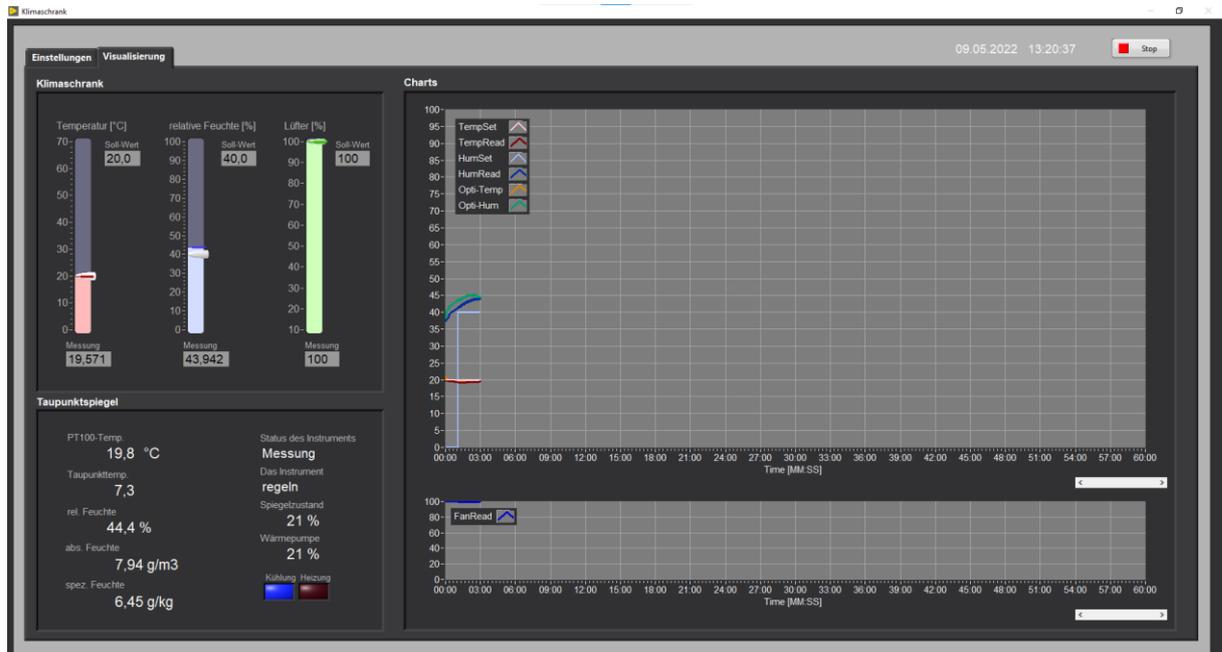


Abb. 16 LabVIEW Front Panel - Klimaschrank.vi

6.1 Das Konzept

Aufteilung in direkte Visualisierung und Datenspeicherung.

Die aufgezeichneten Daten werden in einer Datenbank in zwei getrennten Tabellen gespeichert. So lassen sich die Werte des Klimaschranks und des Taupunktspiegel einfach trennen. Der Sinn dieser Datenbank besteht darin einen Ort für die gesamten Messungen zu schaffen, aus welchem sich später die gewünschten Zeitabschnitte auslesen lassen. Des Weiteren besitzen Datenbanken auch einige Vorteile gegenüber anderen Speichermöglichkeiten wie die direkte Speicherung in eine CSV Datei, gerade was die Menge der Daten und Zugriffsgeschwindigkeit angeht.

6.2 Beschreibung des Programms

Ein Programm lebt von dem Benutzer, daher ist es sehr wichtig, dass dieser richtig mit dem Programm umgehen kann. Der Fokus bei der Erstellung lag auf einer intuitiven und übersichtlichen Benutzeroberfläche. Daher wurden die Ansichten über die Reiter "Einstellungen" und "Visualisierung" unterteilt. Der Versuch am Klimaschrank ist ein gemütlicher Prozess, wo die Erreichung der Zielparameter auch über eine Stunde dauern kann. Durch einen Reiterwechsel wird also nichts Wesentliches verpasst.

Im Hintergrund laufen drei While Schleifen parallel. Die "Hauptschleife" beinhaltet alles rund um den Klimaschrank, eine weiter für den Taupunktspiegel und die dritte für Events, die vom Benutzer ausgelöst werden und sonst den Programmablauf aufhalten würden. Für weitere Details ist ein Blick in die VI notwendig, dass alles hier zu beschreiben würde den Rahmen sprengen.

7 Laborversuch

Es soll der Klimaschrank im Zusammenspiel mit dem Taupunktspiegel verwendet werden, um die Klimaprüfpunkte nach ICH-Richtlinie abzufahren und die Messung vom Klimaschrank mit den, des Taupunktspiegels zu vergleichen.

Die Verwendung des Klimaschrank wird vom Hersteller nur unter bestimmten Umgebungsbedingungen gewährleistet. Zwei dieser Bedingungen sollen dafür zuvor getestet und bestätigt werden.

- Umgebungstemperatur: 15°C bis 28°C
- Luftfeuchtigkeit: max. 70%

[15, S. 3]

Zur Bestimmung dieser Parameter wird ein Aspirationspsychrometer nach Aßmann verwendet.

<i>Bedingung</i>	<i>Erforderlich</i>	<i>Ermittelt</i>	<i>Bedingung erfüllt?</i>
<i>Umgebungstemperatur</i>	15°C bis 28°C	_____ °C	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
<i>Luftfeuchtigkeit</i>	max. 70%	_____ %	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

Die relative Feuchte der Luft ist mit dem Diagramm zu bestimmen, da es ein praktikabler Anfang ist, um zu prüfen ob die Umgebungsbedingungen erfüllt sind. Daraufgehend werden einige Klimaprüfpunkte aus der ICH-Richtlinie abgefahren und dokumentiert. Es soll untersucht werden, ob der Klimaschrank innerhalb der Toleranzen bleibt

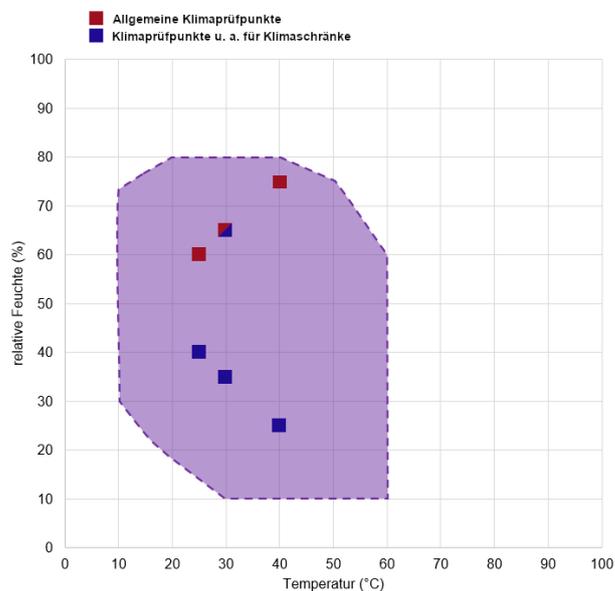


Abb. 17 Q1A(R2) Klimaprüfpunkte im Temperatur-Feuchte-Arbeitsbereich des Klimaschranks

Allgemein:

Studie	Bedingungen	Mindestzeitraum der Datenaufnahme
langzeit	25°C ± 2°C bei 60% ± 5% rel. Feuchte	12 Monate
	oder 30°C ± 2°C bei 65% ± 5% rel. Feuchte ¹	
zwischenzeitlich	30°C ± 2°C bei 65% ± 5% rel. Feuchte	6 Monate
beschleunigt	40°C ± 2°C bei 75% ± 5% rel. Feuchte	6 Monate

Tab. 5 Q1A(R2) - Allgemeine Bedingungen

[17, S. 8]

u. a. für Klimaschränke:

Studie	Bedingungen	Mindestzeitraum der Datenaufnahme
langzeit	25°C ± 2°C bei 40% ± 5% rel. Feuchte	12 Monate
	oder 30°C ± 2°C bei 35% ± 5% rel. Feuchte ²	
zwischenzeitlich	30°C ± 2°C bei 65% ± 5% rel. Feuchte	6 Monate
beschleunigt	40°C ± 2°C bei 25% ± 5% rel. Feuchte	6 Monate

Tab. 6 Q1A(R2) Bedingungen u.a. Klimaschränke

[17, S. 9-10]

Das Erreichen der Parameter bis zum "eingeschwungenen" Zustand dauert je Parameteränderung unterschiedlich lange. In allen aufgenommenen Untersuchungen lag die Zeitspanne grob zwischen 20 und 90 Minuten. Daher ist es wichtig zu wissen, welche Bedingungen sich für eine kurze Laborzeit eignen. Für ein 90-minütiges Labor empfehlen sich daher maximal zwei und für ein dreistündiges Labor drei bis vier Klimaprüfpunkte. Die im Labor eingestellten Bedingungen können von den der Richtlinie innerhalb des Temperatur-Feuchte-Arbeitsbereich abweichen. Der Grund für die Auswahl dieser Punkte im Labor ist in ihrer Dokumentation und erlaubten Toleranzen begründet. Diese Werte lassen sich gut miteinander vergleichen und bewerten. Dies soll für den Klimaschrank, also auch für den Taupunktspiegel durchgeführt werden.

Um die Messwerte speichern zu können wird eine Datenbank benötigt. Entweder es gibt eine bestehende, die verwendet werden soll oder es muss eine neue Datenbank angelegt werden. Eigens hierfür wurde eine kleine Applikation in Python geschrieben, welche die erforderliche Datenbank erstellen kann. Diese App heißt „Datenbank.exe“ und kann wie jede normale Anwendung gestartet werden. Auf der ersten Seite lässt sich ein Name für die Datenbank angeben, sowie der Speicherort bestimmen. Mit einem Klick auf „Erstellen“, wird die Datenbank erzeugt.

Die Datenbank besteht aus zwei Tabellen:

- "klimaschrank"
- "taupunktspiegel"

¹ Wird diese Bedingung getestet, entfällt die zwischenzeitliche Studie

² Wird diese Bedingung getestet, entfällt die zwischenzeitliche Studie

Laborversuch

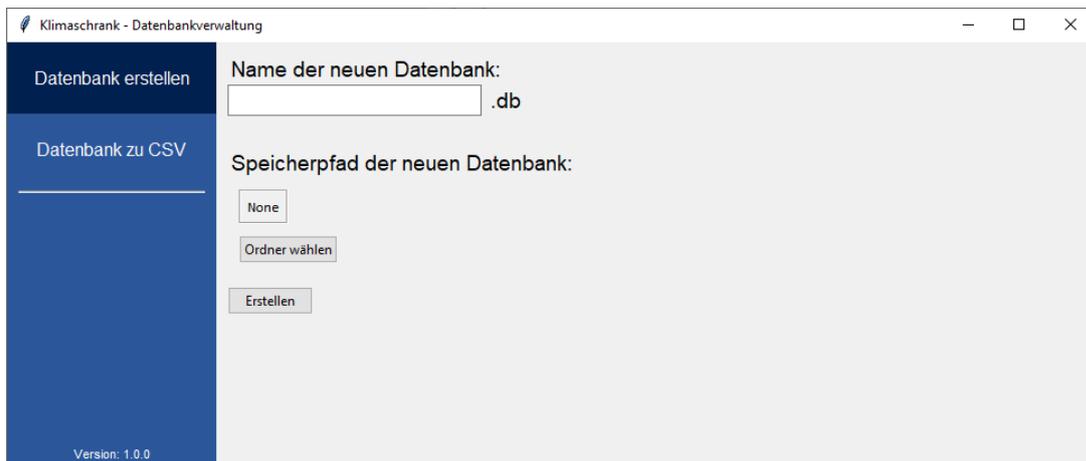


Abb. 18 Datenbank.exe - Datenbank erstellen

Mit einer Datenbank als Voraussetzung kann das Front Panel des Klimaschrank in LabVIEW gestartet werden. Unter dem Reiter „Einstellung“ wird der Taupunktspiegel und eine Datenbank Datei ausgewählt, bevor das Programm ausgeführt wird. Dabei ist darauf zu achten, dass sich der Taupunktspiegel im Betriebsmodus „REMOTE“ befindet, da ansonsten keine Kommunikation stattfinden kann. Durch Halten des Knopfes auf dem Gerät für sieben Sekunden kann der Modus gewechselt werden. [12, S. 13]

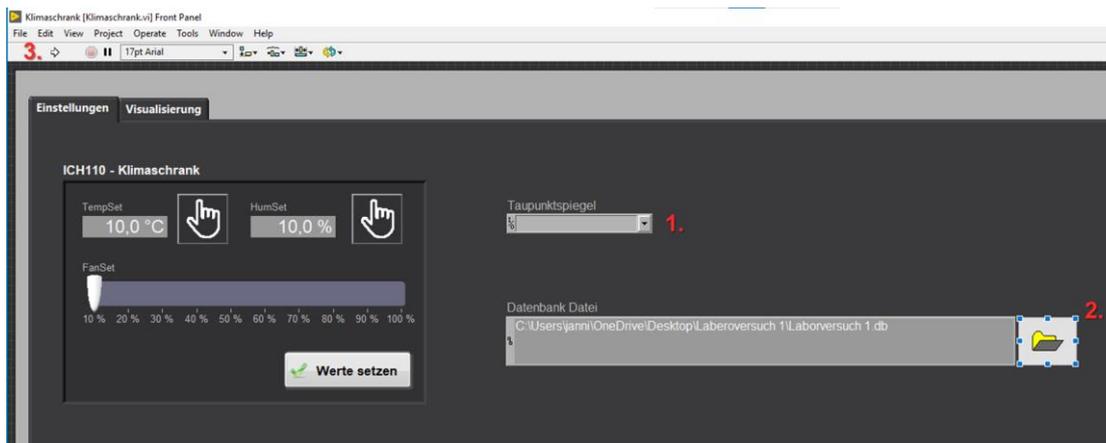


Abb. 19 Startansicht - Klimaschrank.vi

Sobald die VI ausgeführt wird, springt sie automatisch in den Reiter „Visualisierung“ und beginnt mit der Aufzeichnung. Im Hintergrund werden die Messwerte in die Datenbank geschrieben. Jetzt werden die Messpunkte aus der Aufgabenstellung abgefahren und jeweils gewartet, bis sich ein stationärer Prozess einstellt. Am Ende des Labors wird die Klimaschrank.vi gestoppt und somit die Messwertaufzeichnung gestoppt.

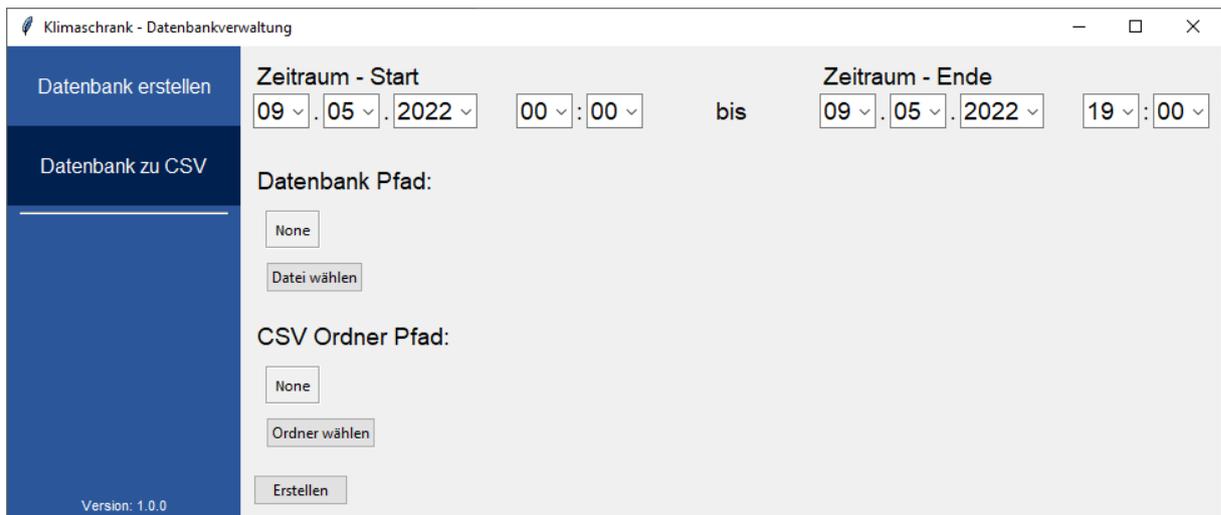


Abb. 20 Datenbank.exe - Datenbank zu CSV

Die aufgezeichneten Daten können mit Hilfe der zweiten Seite der Datenbank.exe Applikation in eine CSV gespeichert um später von den Studierenden ausgewertet werden zu können. Dazu wird die gewünschte Datenbank ausgewählt und der entsprechende Zeitraum. Mit einem Klick auf "Erstellen" werden zwei CSV Dateien generiert. Eine für die Messwerte des Taupunktspiegels, die andere für die des Klimaschrank.

Klimaschrank CSV	Taupunktspiegel CSV
<ul style="list-style-type: none"> • ID • Timestamp • empSet • Temp1Read • HumSet • HumRead • FanSet • FanRead • ErrorCode 	<ul style="list-style-type: none"> • ID • Timestamp • tu (Umgebungstemperatur) • tt (Taupunkttemperatur) • rf (relative Feuchte) • mirror (Spiegelzustand) • pump (Wärmepumpe) • x (absolute Feuchte (g/kg)) • s (spezifische Feuchte g/m³) • t_unit (Einheit der Temperatur, Standard °C) • status1 (Status des Instruments) • status2 (Regelstatus) • heat (1=Ja, 0=Nein) • cool (1=Ja, 0=Nein)

8 Darstellung der Ergebnisse

8.1 Messungen mit dem Taupunktspiegel am Zeolith-Speicher

Die Idee war eine genauere Methode der Messwertaufnahme für die relative Feuchte am Zeolith-Speicher mit Hilfe des Taupunktspiegel. Doch aus den Messungen geht deutlich hervor, dass zwischen dem Eintritt in den Bypass und dem Austritt signifikante Abweichung vorliegen.

Messung	Einstellung			Messung									
	Luftstrom [g/s]	ϑ_{soll} [°C]	Dampf [%]	ϑ [°C]	ϑ_{unten} [°C]	φ_{unten} [%]	x_{unten} [g/kg]	ϑ_{obern} [°C]	φ_{oben} [%]	x_{oben} [g/kg]	$\vartheta_{Optidew}$ [°C]	$\varphi_{Optidew}$ [%]	$x_{Optidew}$ [g/kg]
1	1,5	75	2	74	60,1	27,8	34,4	36,5	75	29,3	46,6	47,6	35,27
2	1,5	65	2	65,9	57,9	33,9	40,3	38,2	83,1	36,2	46,6	55,6	40,79
3	1,5	65	4	64,3	57,9	33,9	40	37,9	84,4	36	46,3	56,6	40,82
4	1,5	65	2	64,6	56	27,6	29,2	35,8	72,9	27,6	45	42,1	29,04
5	1,5	85	2	85,7	64,1	22	34,3	37,4	70,4	29,1	48,4	38,2	31,25
6	1,5	85	2	85,3	63,6	22,5	34,3	37,2	71,5	29,1	47,9	38,9	31,11
7	1,5	75	2	75,2	60	26,3	34	36,5	73,8	228,9	46,6	41,7	31,16

Tab. 7 Messungen mit dem Taupunktspiegel am Zeolith-Speicher

Durch den großen Temperaturabfall bringen die Messungen mit dem Taupunktspiegel keine wertvollen Erkenntnisse. Es wird nur gezeigt, dass die Werte des Taupunktspiegel plausibel sind. Durch die Positionierung des Taupunktspiegel zwischen Ein- und Austritt, werden Werte erwarten, die auch zwischen dessen Messungen liegen. Eine Ausnahme ist die absolute Feuchtigkeit, diese sollte theoretisch konstant sein, solange es nicht zur Kondensation kommt, was hier aber der Fall ist.

In dem Temperatur- und relative Feuchte Diagramm liegen die Werte des Taupunktspiegel (Optidew) wie zu erwarten zwischen denen, des Ein- und Austrittes des Bypasses.

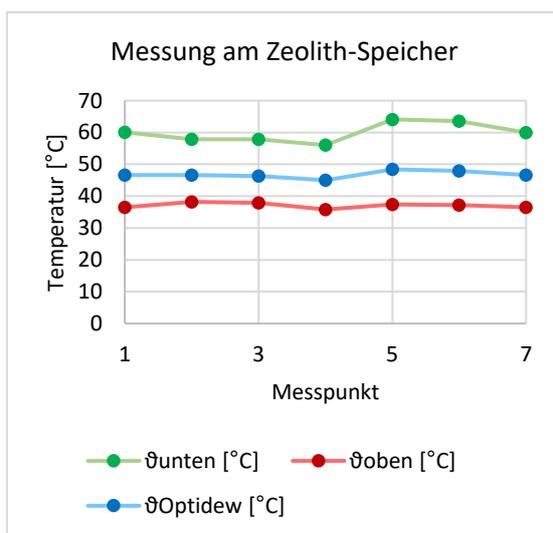


Abb. 21 Temperatur am Zeolith-Speicher

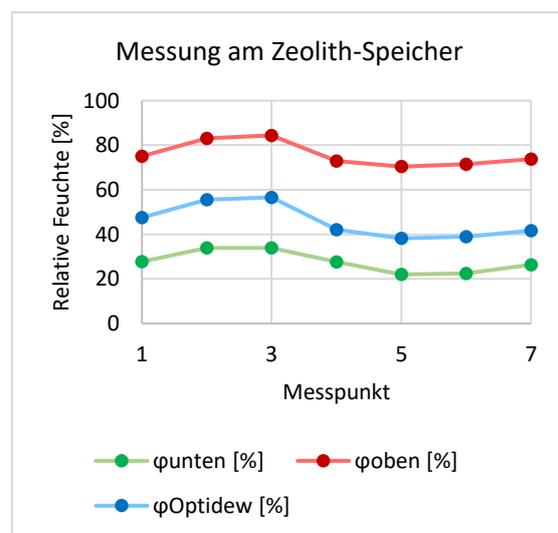


Abb. 22 Relative Feuchte am Zeolith-Speicher

8.2 Messungen mit dem Taupunktspiegel am Klimaschrank

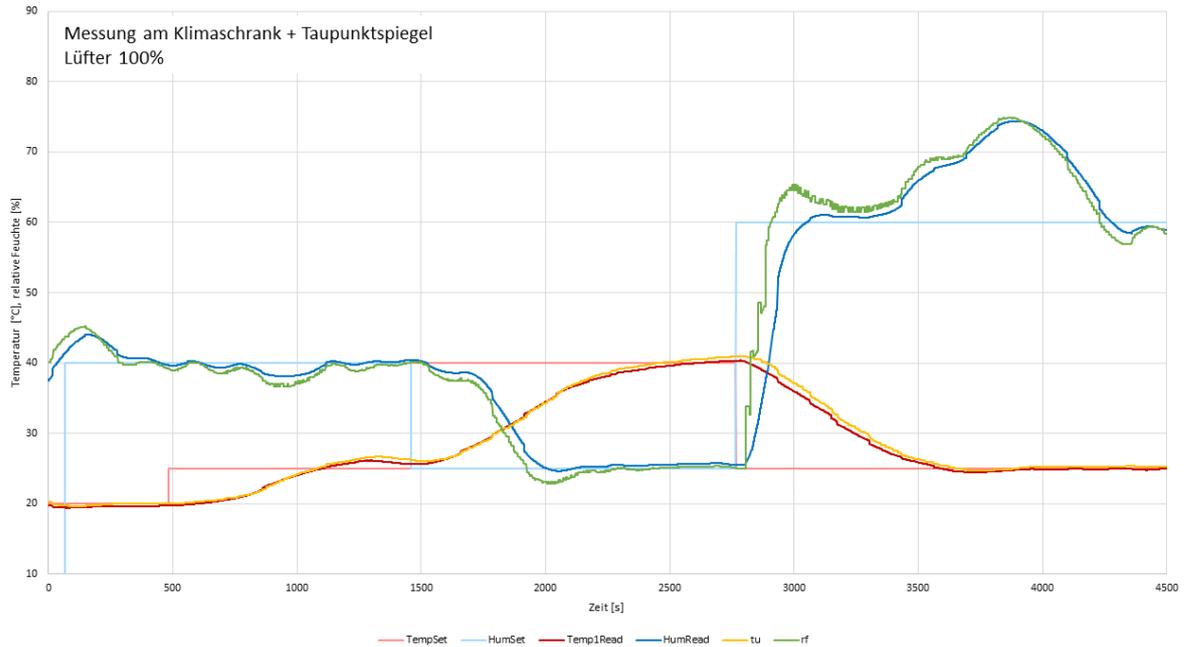


Abb. 23 Messungen mit dem Taupunktspiegel am Klimaschrank

Für den Klimaschrank ist am Ende keine weitere Konstruktion benötigt worden. Hier reicht das Einsetzen in die Durchlassbohrung völlig aus. Die Messungen des Taupunktspiegel und des Klimaschrank liegen sehr nah beieinander. Der Temperaturverlauf verhält sich stabiler als der der relativen Feuchte. Doch nachdem der Klimaschrank seinen "eingeschwungenen" Zustand erreicht, verlaufen beide Kennlinien nahe dem Sollwert. Die Temperatur weicht meist nur wenig, meist unter 0,5 K vom Sollwert ab. Die relative Feuchte schwingt in dieser Hinsicht etwas mehr, doch eine Abweichung von mehr als 5 % ist auch nicht aufgetreten.

9 Zusammenfassung und Fazit

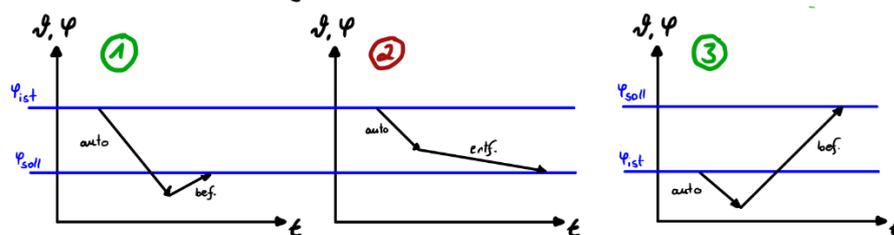
Das Aspirationspsychrometer hat sich als sehr gute Methode zur Feuchtemessung bewährt. Während der Versuche hat es einwandfrei funktioniert und erstaunlich nahe Werte zu dem des Taupunktspiegel geliefert. Mit der Berechnung, anstelle des Diagramms kamen die Werte sogar noch näher. Es kann den Taupunktspiegel nicht ersetzen, doch für den Laborversuch handelt es sich um ein ausgezeichnetes Werkzeug um die Umgebungsbedingungen abschätzen zu können. Es wurde jedoch auch deutlich, dass schon kleine Abweichungen im Ablesen der Temperatur zu großen Auswirkungen in der relativen Feuchte führen. Zu dem hier verwendeten Modell gibt es auch Modelle mit einer feineren Temperaturskala. Somit kann dort der Ablesefehler verringert werden.

Bei den Konstruktionen verhielt es sich schon schwieriger. Der erste Anlauf für die Entwicklung eines Ansatzes am Klimaschrank schien vielversprechend. Doch konnte dieser nicht die Funktionalität gewährleisten und ist somit unbrauchbar. Hier hat sich die einfachere Methode, das direkte Anbringen in den Klimaschrank bewährt. Diese Methode liefert Werte die nahe an denen des Klimaschrank sind, was sie plausibel macht.

Die für den Zeolith-Speicher entworfenen Konstruktion hat in allen Punkten überzeugt. Es ist eine einfache Ausführung, die ihren Zweck erfüllt. Das Problem hier ist der umgebene Versuchsaufbau, durch die hohe Temperaturdifferenz können die Messung nur als plausibel eingeschätzt werden, jedoch nicht qualitativ mit den vorhandenen Messinstrumenten verglichen werden.

Die Entwicklung der LabVIEW Umgebung hat deutlich länger gedauert als zu Beginn abschätzbar war. Das kam durch immer wieder auftretende Probleme bei der Messwertübertragung und das damit verbundene Problem der Synchronisation der Messwerte. Letztendlich konnte eine funktionsfähige Umgebung geschaffen werden, die mit allen auftretenden Problemen klarkommt.

Temperaturerhöhung



Temperatursenkung

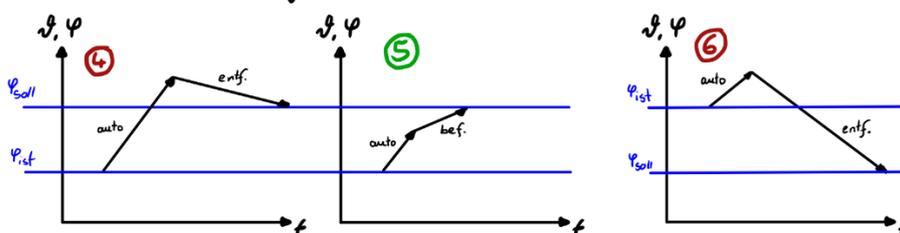


Abb. 24 Auswirkung von Temperatur und Feuchte

"auto" steht für die Feuchteänderung nur aufgrund der Temperaturänderung. Zum Erreichen der gewünschten Feuchte muss ggf. durch den Klimaschrank entfeuchtet (entf.) oder befeuchtet (bef.) werden

Zusammenfassung und Fazit

Für den Laborversuch ist deutlich geworden, dass die abzufahrenden Klimaprüfpunkte und deren Reihenfolge von bedeutender Rolle sein können was die Zeit anbelangt. In den durchgeführten Versuchsreihen ergaben sich deutliche Unterschiede für die Dauer, die der Klimaschrank braucht, um sich auf die neuen Werte einzustellen. Das hängt damit zusammen, dass die Feuchte eine Funktion der Temperatur ist. Bei steigender Temperatur und gleichbleibender absoluten Feuchte verringert sich die relative Feuchte. Umgekehrt wenn die Temperatur sinkt, steigt die relative Feuchte. Es hat sich gezeigt, dass der Klimaschrank verhältnismäßig länger braucht zum Entfeuchten. Daher wird ausgehend vom Startpunkt die folgende Reihenfolge für einen Verkürzten Ablauf vorgeschlagen.

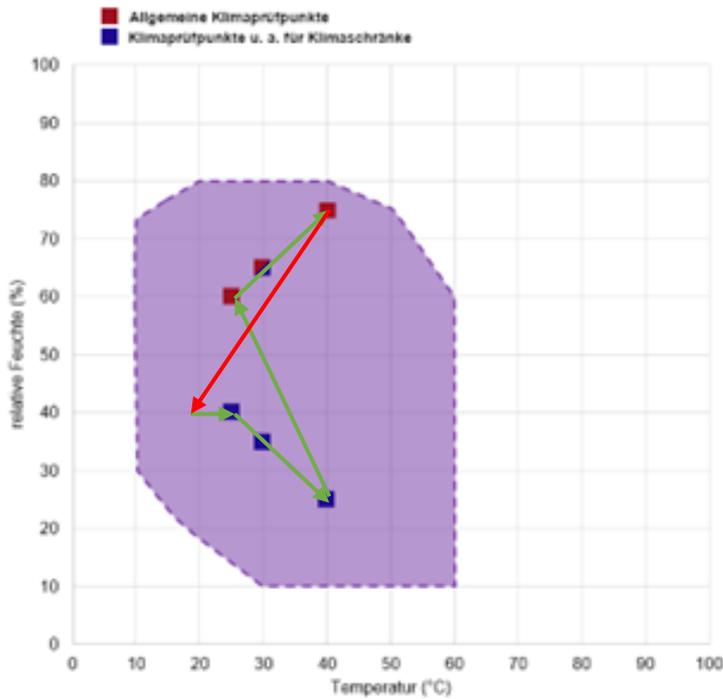


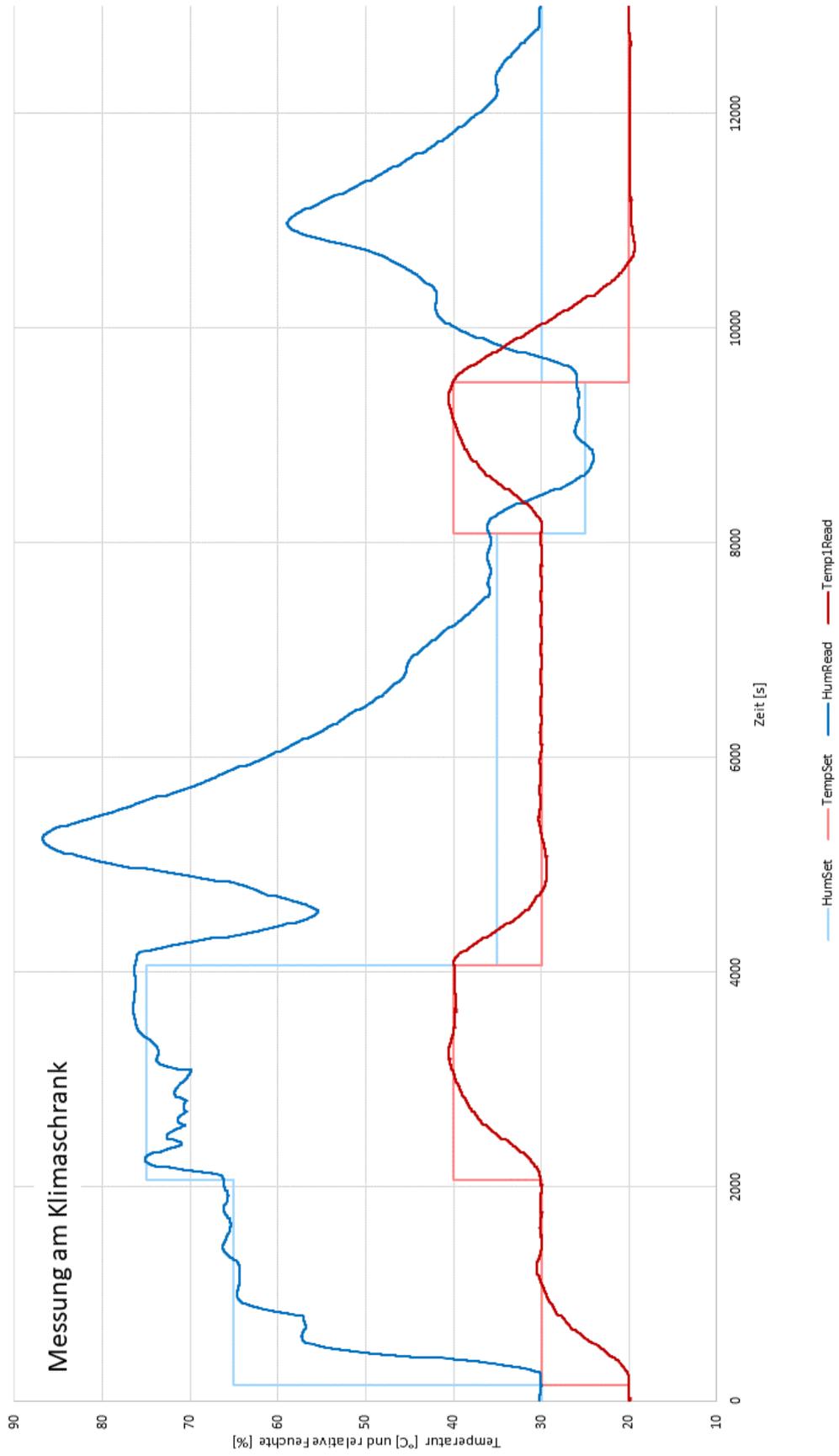
Abb. 25 Empfohlener Abfahrplan der Klimaprüfpunkte

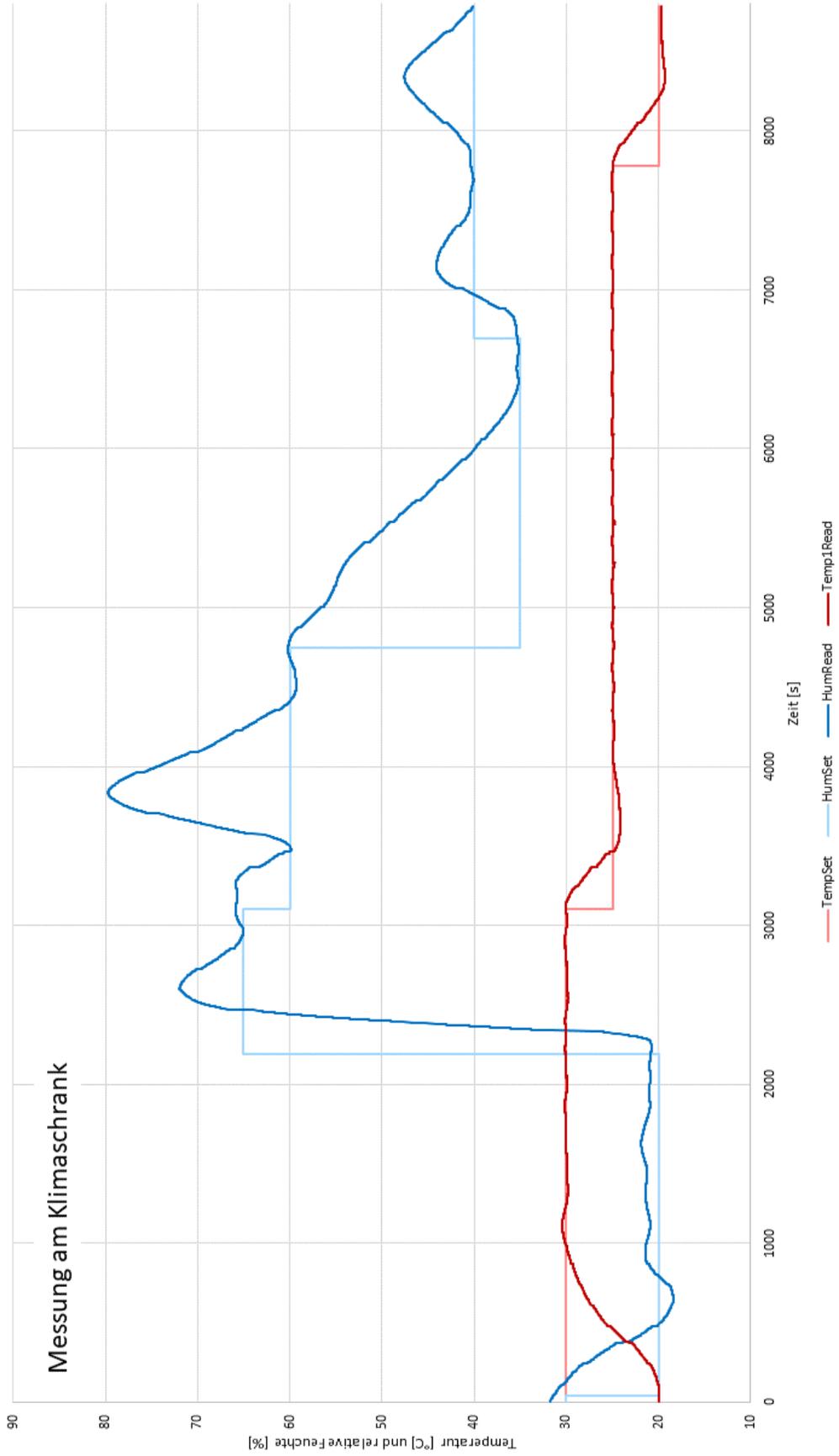
10 Literatur

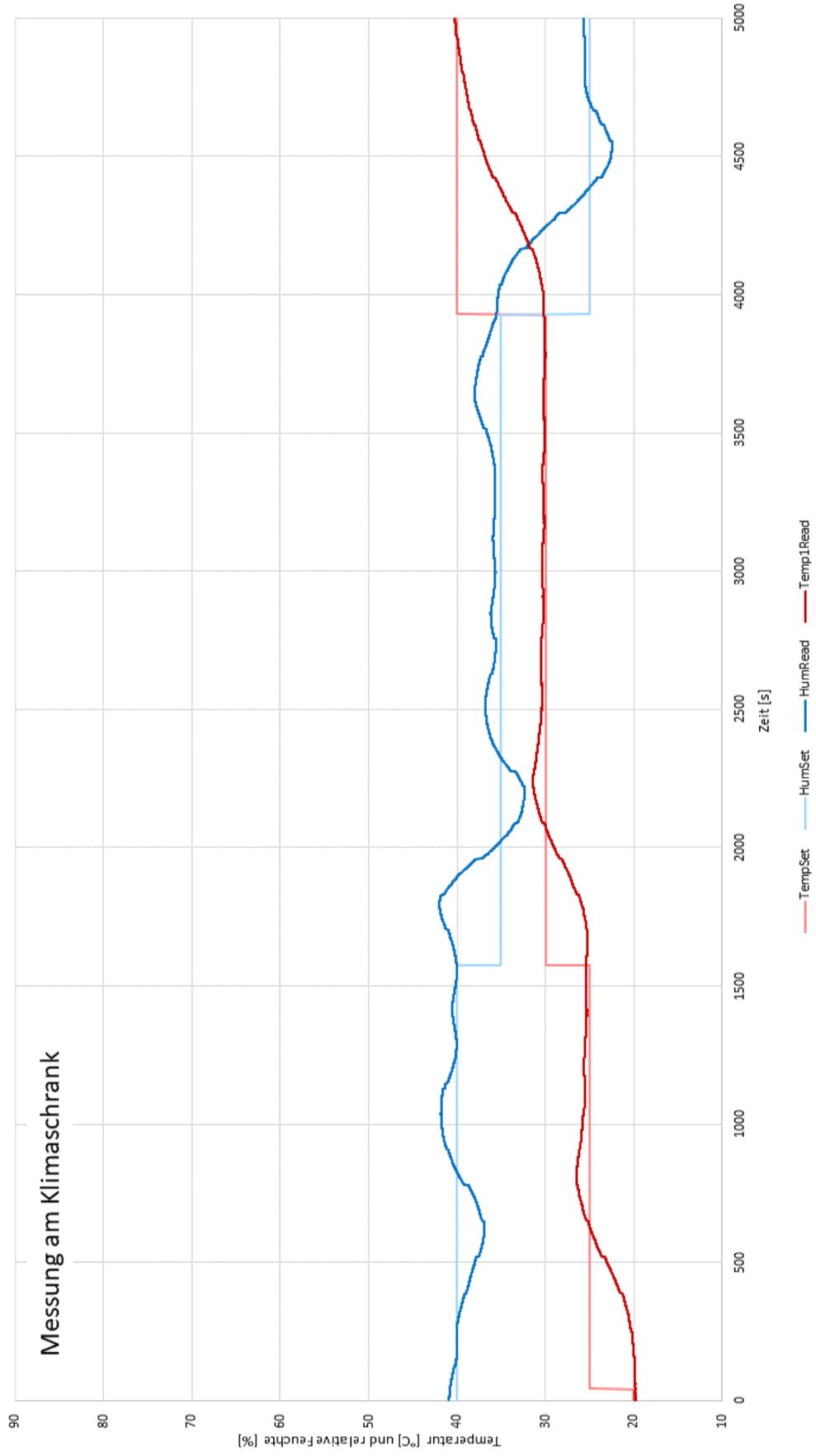
- [1] *Klimatechnik - Skript*, 2019.
- [2] Memmert GmbH + Co. KG, *Der Klimaschrank im Prüflabor*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.memmert.com/de/produkte/klimaschraenke/> (Zugriff am: 8. Mai 2022).
- [3] *Gasfeuchtemessung - Messverfahren - Blatt 2*, VDI/VDE 3514 Blatt 2, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin.
- [4] B. Klose, *Meteorologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [5] *Psychrometertafel*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.schulbiologiezentrum.info/Wetter%20Materialien/Das%20Einfach-Psychrometer.pdf> (Zugriff am: 1. Mai 2022).
- [6] M. Prior, *Der Sättigungsdampfdruck*. [Online]. Verfügbar unter: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/4887> (Zugriff am: 1. Mai 2022).
- [7] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, *VDI-Wärmeatlas: Mit 320 Tabellen*, 11. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [8] Verein Deutscher Ingenieure, *Gasfeuchtemessung - Kenngrößen und Formelzeichen - Blatt 1*.
- [9] B. Hardy und v. nach, *ITS-90 Formulations for Vapor Pressure, Frost point Temperature, Dew point Temperature and Enhancement Factors in the Range –100 to 100 °C. Proceedings of the Third International Symposium on Humidity & Moisture*. London, 1998. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.decatour.de/javascript/dew/resources/its90formulas.pdf>
- [10] R. W. Hyland, „A Correlation for the Second Interaction Virial Coefficients and Enhancement Factors for Moist Air“ (eng), *Journal of research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and chemistry*, 79A, Nr. 4, S. 551–560, 1975, doi: 10.6028/jres.079A.017.
- [11] L. Greenspan, „Functional Equations for the Enhancement Factors for CO₂-Free Moist Air“ (eng), *Journal of research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and chemistry*, 80A, Nr. 1, S. 41–44, 1976, doi: 10.6028/jres.080A.007.
- [12] Michell Instruments, *Optidew & Optidew Vision Leistungsstarker optischer Taupunktmesser Bedienungsanleitung*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.michell.com/downloads/manuals/Optidew-Series-97430-DE-Manual-V1.2.pdf> (Zugriff am: 7. Mai 2022).
- [13] *Memmert-Klimaschrank-Betriebsanleitung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.memmert.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=3259&token=13c0fd4b3934991fcbccc56e0efc6160f8640791> (Zugriff am: 7. Mai 2022).
- [14] J. Brodersen, E. Nitzte und F. Vinnemeier, „Strömungslehre 1 LaborSkript“, Zentrum für Energietechnik, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hamburg, 2016.
- [15] *Memmert-Klimaschrank-ICH110-Produktspezifikationen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.memmert.com/de/produkte/klimaschraenke/klimaschrank/ICH110/pdf/> (Zugriff am: 7. Mai 2022).
- [16] Memmert GmbH + Co. KG, *AtmoWEB: REST-Interface*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.memmert.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=5708&token=e46b35fe2d26d6e83f1db73c13c9314db165a9f0> (Zugriff am: 8. Mai 2022).
- [17] International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use, *Stability testing of new drug substances and products Q1A(R2)*. [Online]. Verfügbar unter:

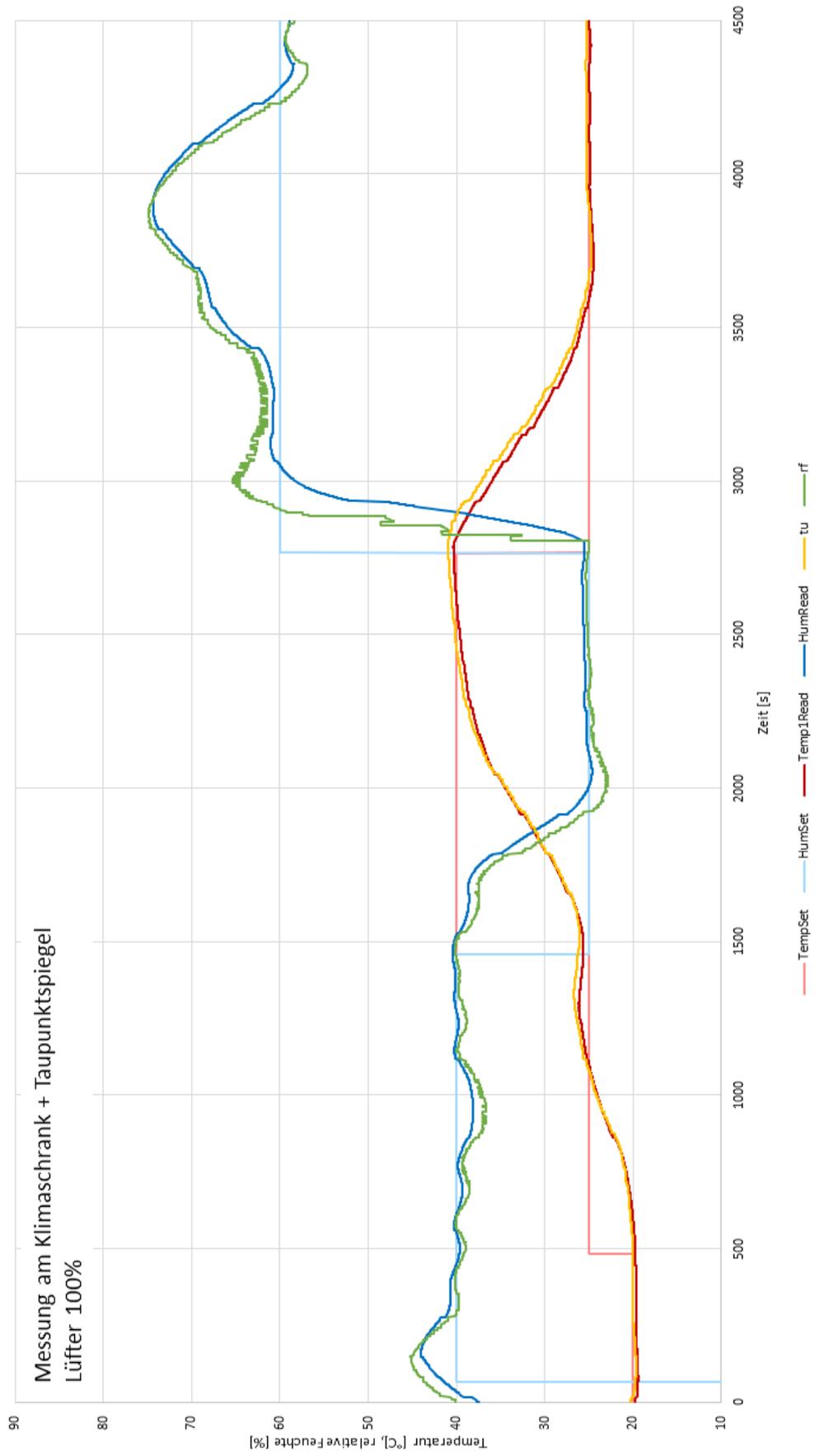
Literatur

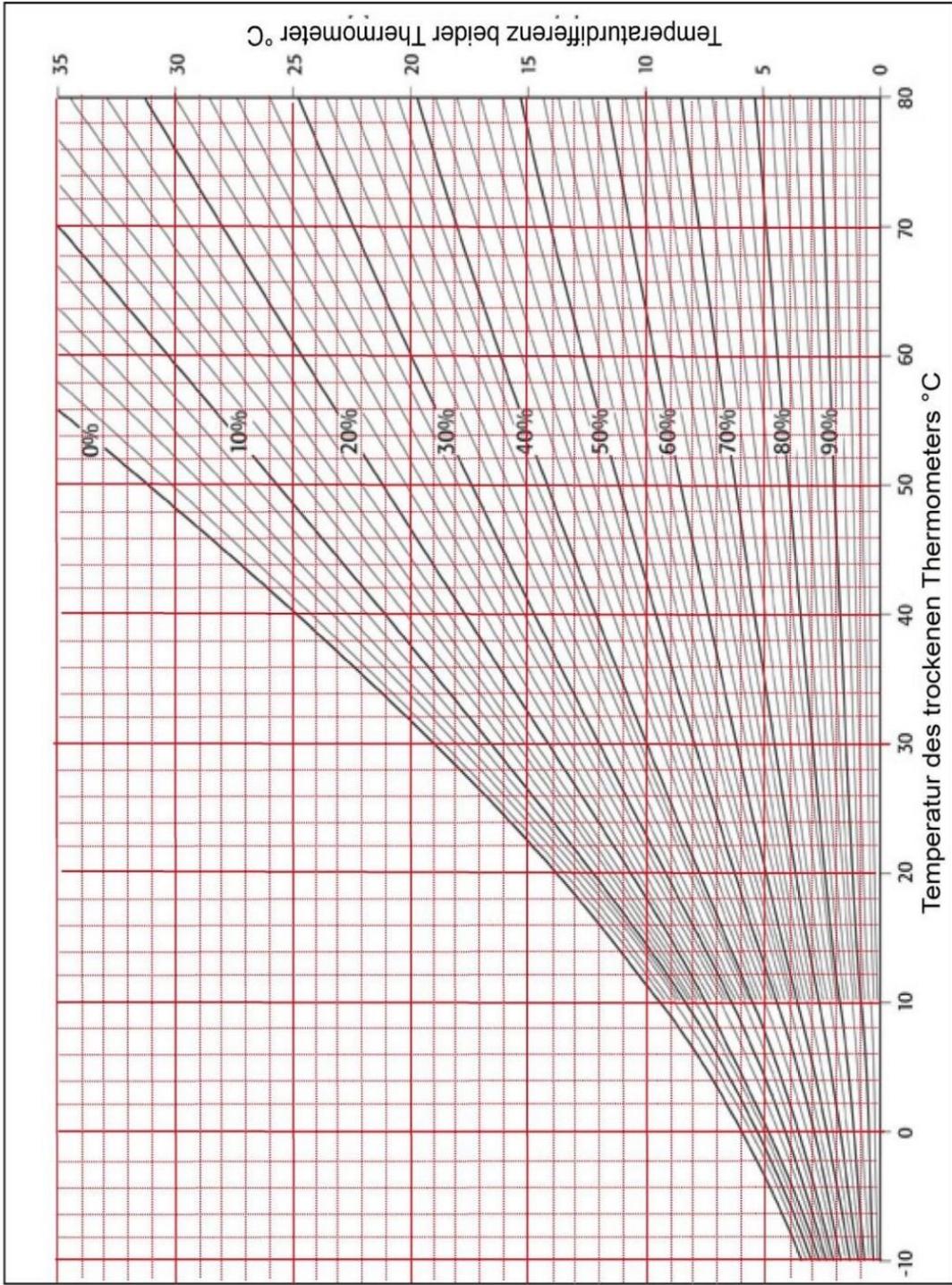
<https://database.ich.org/sites/default/files/Q1A%28R2%29%20Guideline.pdf> (Zugriff am: 9. April 2022).











Grafik: Ingo Mennerich