

Hochschule Luzern

Bachelorthesis Herbstsemester 2022
Institut für Maschinen- und Energietechnik

Feuchtigkeitscontroller zur Bestimmung von Kriechdehnung für Dämmmaterial

Marco Fuchs

Betreuer: Prof. Dr. Ludger Fischer, verantwortlicher Dozent
Sebastian Ammann, Hauptbetreuung
Experte: Kai Lieball

Abgabedatum: Horw, 2. Januar 2023

Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel **Feuchtigkeitscontroller zur Bestimmung von Kriechdehnung von Dämmmaterial**

Diplomandin/Diplomand **Fuchs, Marco**

Bachelor-Studiengang **Bachelor Maschinentechnik**

Semester **HS22**

Dozentin/Dozent **Fischer, Ludger**

Expertin/Experte **Lieball, Kai**

Abstract Deutsch

Für ein Forschungsprojekt zusammen mit der Swisspor AG wird ein System entwickelt, das es erlaubt, grossräumige saisonale thermische Energiespeicher (STES) kostengünstig zu bauen. Dafür wird das gedämmte Abdichtungssystem (GEAS) eingesetzt, welches dafür sorgt dass aus dem genutzten Raum kein Wasser austreten kann und gleichzeitig thermisch gedämmt ist. Die vorliegende Bachelor-Thesis befasst sich mit dem Verhalten des Dämmmaterials aus Polyisocyanuraten (PIR) unter mechanischer und thermischer Belastung und der daraus resultierenden Kriechdehnung. Der Schwerpunkt liegt auf der Regelung der Luftfeuchtigkeit in einem Setup, welches die Belastungen simulieren kann und bis zum Zeitpunkt vor dieser Arbeit die Luftfeuchtigkeit nur gemessen und nicht beeinflusst hat. Damit wurden bereits mehrere Versuche durchgeführt, die ergaben, dass das Dämmmaterial durch erhöhte Luftfeuchtigkeit aufquillt. Nach einer Literaturrecherche zum Stand der Technik in der Luftbefeuchtung und -trocknung wird mittels Experimenten ein Konzept für den Umbau des Prüfstands entwickelt, damit die Luftfeuchtigkeit reguliert werden kann. Anschliessend wird der Prüfstand umgebaut und es werden erste Experimente mit stabilisierter Luftfeuchtigkeit im Testkanal durchgeführt und ausgewertet. Die Auswertung von drei erfolgreichen Experimenten ergeben einen direkten Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und Ausdehnung des Dämmmaterials. Zum Ende dieser Arbeit ist jedoch nicht klar ob der Zusammenhang linear ist oder nicht. Auf Basis der erstellten Python-Skripts können in Zukunft weitere Experimente durchgeführt und ausgewertet werden.

Abstract Englisch

For a research project together with Swisspor AG, a system is being developed that will allow large-scale seasonal thermal energy storage (STES) at low building cost. For this purpose, the insulated sealing system (GEAS) is used, which ensures that no water is able to escape from the storage system and is at the same time thermally insulated. The presented bachelor thesis deals with the behavior of the insulating material made of polyisocyanurates (PIR) under mechanical and thermal stress and the resulting creep strain. The focus is on the control of the humidity in a setup that can simulate the loads and up to the time before this thesis only measured the humidity and did not influence it. Several tests have already been carried out with this test stand, which showed that the insulation material swells due to increased humidity. After a literature research on the state of the art in air humidification and drying, by means of experiments a concept for the modification of the test rig is developed, so that the air humidity can be regulated. Subsequently, the test rig will be modified and first experiments with stabilized humidity in the test channel will be carried out and evaluated.

The evaluation of three successful experiments shows a direct correlation between air humidity and expansion of the insulation material. At the end of this work, however, it is not clear whether the correlation is linear or not. Based on the created Python scripts, further experiments can be performed and evaluated in the future.

Ort, Datum Horw, 04.01.2023
© **Marco Fuchs, Hochschule Luzern – Technik & Architektur**

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche verwendeten Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.



Horw, 2. Januar 2023

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Bachelor Thesis für das Kompetenzzentrum Thermische Energiespeicher (CC-TES) an der Hochschule Luzern Technik & Architektur. Ein grosser Dank geht an die fachliche Betreuung von Sebastian Ammann, der mit seinem gesamten Wissen und seiner Expertise stets verfügbar und hilfsbereit war. Ein weiterer Dank geht an Prof. Dr. Ludger Fischer, als verantwortlicher Dozent, Reto Hendry und David Schiffmann, welche mit enormem Fachwissen und zielführenden Inputs eine weitere wesentliche Unterstützung gaben.

Abstract Deutsch

Für ein Forschungsprojekt zusammen mit der Swisspor AG wird ein System entwickelt, das es erlaubt, grossräumige saisonale thermische Energiespeicher (STES) kostengünstig zu bauen. Dafür wird das gedämmte Abdichtungssystem (GEAS) eingesetzt, welches dafür sorgt dass aus dem genutzten Raum kein Wasser austreten kann und gleichzeitig thermisch gedämmt ist.

Die vorliegende Bachelor-Thesis befasst sich mit dem Verhalten des Dämmmaterials aus Polyisocyanuraten (PIR) unter mechanischer und thermischer Belastung und der daraus resultierenden Kriechdehnung. Der Schwerpunkt liegt auf der Regelung der Luftfeuchtigkeit in einem Setup, welches die Belastungen simulieren kann und bis zum Zeitpunkt vor dieser Arbeit die Luftfeuchtigkeit nur gemessen und nicht beeinflusst hat. Damit wurden bereits mehrere Versuche durchgeführt, die ergaben, dass das Dämmmaterial durch erhöhte Luftfeuchtigkeit aufquillt. Nach einer Literaturrecherche zum Stand der Technik in der Luftbefeuchtung und -trocknung wird mittels Experimenten ein Konzept für den Umbau des Prüfstands entwickelt, damit die Luftfeuchtigkeit reguliert werden kann. Anschliessend wird der Prüfstand umgebaut und es werden erste Experimente mit stabilisierter Luftfeuchtigkeit im Testkanal durchgeführt und ausgewertet.

Die Auswertung von drei erfolgreichen Experimenten ergeben einen direkten Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und Ausdehnung des Dämmmaterials. Zum Ende dieser Arbeit ist jedoch nicht klar ob der Zusammenhang linear ist oder nicht. Auf Basis der erstellten Python-Skripts können in Zukunft weitere Experimente durchgeführt und ausgewertet werden.

Abstract English

For a research project together with Swisspor AG, a system is being developed that will allow large-scale seasonal thermal energy storage (STES) at low building cost. For this purpose, the insulated sealing system (GEAS) is used, which ensures that no water is able to escape from the storage system and is at the same time thermally insulated. The presented bachelor thesis deals with the behavior of the insulating material made of polyisocyanurates (PIR) under mechanical and thermal stress and the resulting creep strain. The focus is on the control of the humidity in a setup that can simulate the loads and up to the time before this thesis only measured the humidity and did not influence it. Several tests have already been carried out with this test stand, which showed that the insulation material swells due to increased humidity. After a literature research on the state of the art in air humidification and drying, by means of experiments a concept for the modification of the test rig is developed, so that the air humidity can be regulated. Subsequently, the test rig will be modified and first experiments with stabilized humidity in the st channel will be carried out and evaluated.

The evaluation of three successful experiments shows a direct correlation between air humidity and expansion of the insulation material. At the end of this work, however, it is not clear whether the correlation is linear or not. Based on the created Python scripts, further experiments can be performed and evaluated in the future.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Ausgangslage	1
1.3	Ziele	2
2	Theorie	3
2.1	Bestehendes Setup	3
2.1.1	Schematischer Aufbau	3
2.2	Dämmmaterial	4
2.3	Luftfeuchtigkeit	4
2.3.1	Absolute Luftfeuchtigkeit	4
2.3.2	Spezifische Luftfeuchtigkeit	4
2.3.3	Relative Luftfeuchtigkeit	5
2.3.4	Natürliche Einflüsse auf die Luftfeuchtigkeit	5
3	Engineering	6
3.1	Luftbefeuchtung	6
3.1.1	Wasser über Düse einspritzen	7
3.1.2	Wasserdampf einspritzen	7
3.2	Luftentfeuchtung	8
3.2.1	Silicagel	9
3.2.2	Tonerde	9
3.2.3	Molekularsieb	9
3.3	Fazit der Engineeringphase	10
4	Umsetzung der gewählten Lösung	11
4.1	Dampfzufuhr	11
4.2	Trocknungskolonne	11
4.3	Thermische Dämmung	12
4.4	Abschliessende Experimente	12
5	Ergebnisse	14
5.1	Experiment 1	16
5.2	Experiment 2	16
5.3	Experiment 3	16
5.4	Experiment 4	17
5.5	Vergleich Experimente 1, 2 & 4	17
6	Schlusswort	18
6.1	Rückblick	18
6.2	Ausblick und Handlungsempfehlung	18
A	Anhang	20

1 Einleitung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts, zusammen mit der Swisspor AG wird ein System entwickelt, das es erlaubt, grossräumige Saisonale Thermische Energiespeicher (STES) kostengünstig zu bauen. Das Novum des Systems ist, dass ein bestehender, ausreichend stabiler Raum von innen her wärmegeklämt und gegen Durchdringung des Wassers abgedichtet wird. Somit werden die Kosten gegenüber einem Aushub oder Bau erheblich gesenkt. Ein Beispiel für die Implementierung des gedämmten Abdichtungssystems (GEAS) ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Das System kann unterschiedlich konfiguriert werden und so zum Beispiel mittels zwei Wärmeübertragern überschüssige thermische Energie speichern oder bei Warmwasserbedarf abgeben [1].

Diese Arbeit fokussiert sich auf die Hartschaumplatten aus Polyisocyanuraten (PIR), welche als thermische Dämmung funktionieren. Diese müssen dem hohen Wasserdruck, den Temperaturschwankungen und der Feuchtigkeitslast über lange Zeit standhalten. Für die Simulation dieser Belastungen existiert ein bereits funktionierender Prüfstand, welcher die Druckbelastung und Temperaturschwankungen abbilden kann. Der bestehende Prüfstand wird in Kapitel 2 genauer erklärt.



Abbildung 1.1: Aufbau GEAS

1.1 Aufgabenstellung

Die Arbeit ist in fünf Teilschritte unterteilt. In einem ersten Schritt wird der bestehende Prüfstand analysiert, damit dessen Funktion und die Bedienung des Analyseprogramms verstanden ist. Parallel werden die bestehenden Python Skripts und die daraus resultierenden Diagramme untersucht und bei Bedarf erweitert. In einem zweiten Schritt wird eine Literaturrecherche zum Thema Luftbefeuchtung und -trocknung durchgeführt. Mit diesem Wissen werden in einem dritten Schritt Vorschläge zur Regelung und Konstanthaltung der Luftfeuchtigkeit im Luftkanal gesammelt. Zusammen mit dem Forschungsteam wird anschliessend die beste Möglichkeit ausgewählt und allfällige Bauteile werden bestellt. Der vierte Schritt beinhaltet den Umbau des Prüfstands mit darauf folgendem Testdurchlauf zur Überprüfung, ob die ursprünglichen Funktionen erhalten bleiben. In einem fünften und letzten Schritt werden mehrere Experimente durchgeführt womit neue Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit im Testkanal und Dehnung, beziehungsweise Stauchung des Dämmmaterials gewonnen werden sollen.

1.2 Ausgangslage

Der Prüfstand ist ein bereits funktionsfähiges Setup mit welchem die Temperatur und die Druckbelastung, die auf das Dämmmaterial wirken, geregelt werden können. Aus den Resultaten vorgängiger Experimente zeigt sich, dass die Luftfeuchtigkeit zusätzlich zur mechanischen Belastung einen Einfluss auf die Stauchung des Dämmmaterials hat. Dies wird in Abbildung 1.2 dargestellt. Darin ist ersichtlich, dass der PIR-Hartschaum bei höherer Luftfeuchtigkeit aufquillt. Da die Luftfeuchtigkeit bei dem bisher vorhandenen Setup nicht beeinflusst werden kann, ist sie rein von den Umgebungsbedingungen beim Prüfstand abhängig. Dies soll in dieser Arbeit verbessert werden.

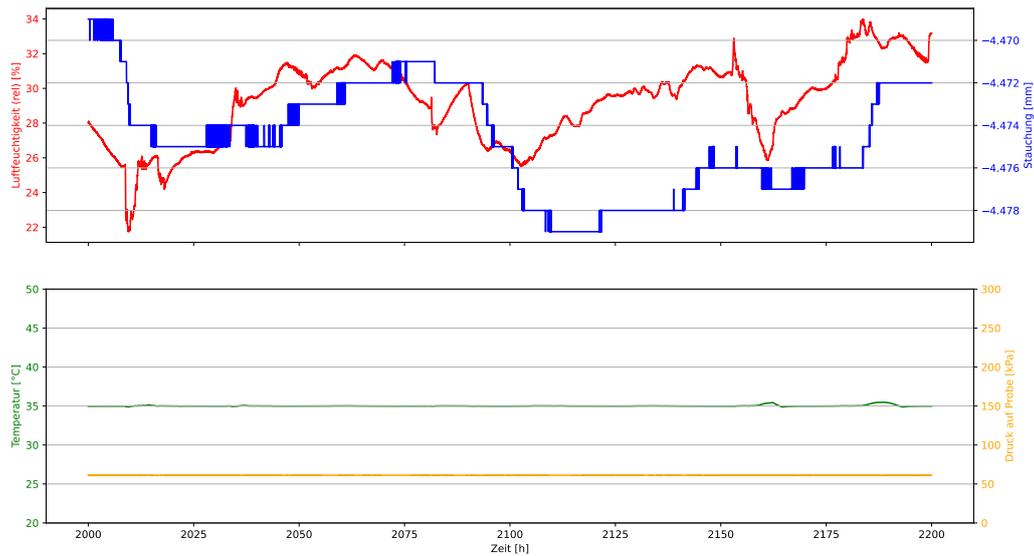


Abbildung 1.2: Auszug aus den Ergebnissen vom Langzeitversuch mit einer konstanten Temperatur von 35 °C und Belastung von 60 kPa. Die nicht regelbare, von Umgebungseinflüssen abhängige Luftfeuchtigkeit, hat einen signifizierten Einfluss auf die Dehnung.

1.3 Ziele

Das Setup soll so umgebaut, beziehungsweise erweitert werden, sodass die Luftfeuchtigkeit im Luftkanal geregelt werden kann. Es soll eine gewünschte Luftfeuchtigkeit konstant gehalten werden können. In Anlehnung an diese Arbeit sollen genauere Rückschlüsse auf den Einfluss von Feuchtigkeit auf das Kriechverhalten, beziehungsweise die Ausdehnung durch die ändernde Luftfeuchtigkeit, des Dämmmaterials ermittelt werden.

2 Theorie

Für die Sammlung von Vorschlägen für den Umbau des Prüfstands ist es wichtig, dass die Eigenschaften des bestehenden Setups, seinen Komponenten und dem zu untersuchenden Dämmmaterial verstanden sind. Zusätzlich werden in diesem Kapitel die Grundlagen für die Kontrolle der Luftfeuchtigkeit erarbeitet.

2.1 Bestehendes Setup

In Abbildung 2.1 ist der Luftkanal des bestehenden Prüfstands dargestellt. In der Realität befindet sich dieser im Thermolabor der Hochschule Luzern und kann acht Proben gleichzeitig aufnehmen und unter einheitlichen Bedingungen testen. Der Luftkanal ist, um thermische Verluste so weit wie möglich zu vermeiden, mit Dämmmaterial verkleidet. Dies ist vor allem wichtig, weil mit hohen Temperaturen von bis zu 95 °C gearbeitet wird und dies zwangsläufig zu erheblicher Wärmeabgabe an die Umgebung führt. Das zu prüfende Dämmmaterial wird in Würfel mit 10 cm Kantenlänge geschnitten und wie in Abbildung 2.1 ersichtlich unter Pneumatikzylindern angeordnet. Oberhalb der Zylinder, welche den Wasserdruck simulieren, befindet sich

pro Probe je eine Digitale Messuhr welche die Verschiebung der Kolben der Pneumatikzylinder und somit die Stauchung der Würfel misst. Diese Daten werden an das Analyseprogramm übertragen und am für jeden Versuch manuell definierten Speicherort gespeichert.

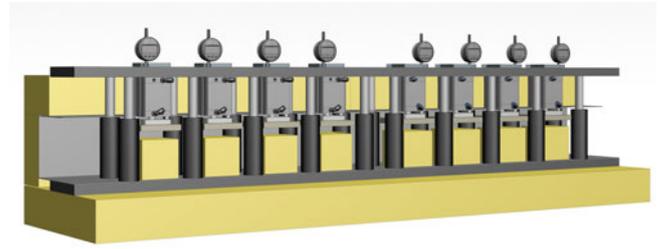


Abbildung 2.1: Rendering des bestehenden Setups

2.1.1 Schematischer Aufbau

In Abbildung 2.3 ist der schematische Aufbau des Setups vor dem Umbau mit den wichtigsten Aktoren und Sensoren ersichtlich. Die Temperatur der Luft wird nach dem Lufterhitzer und auf beiden Seiten des Testkanals gemessen. Nach dem Testkanal wird die relative Luftfeuchtigkeit erfasst.

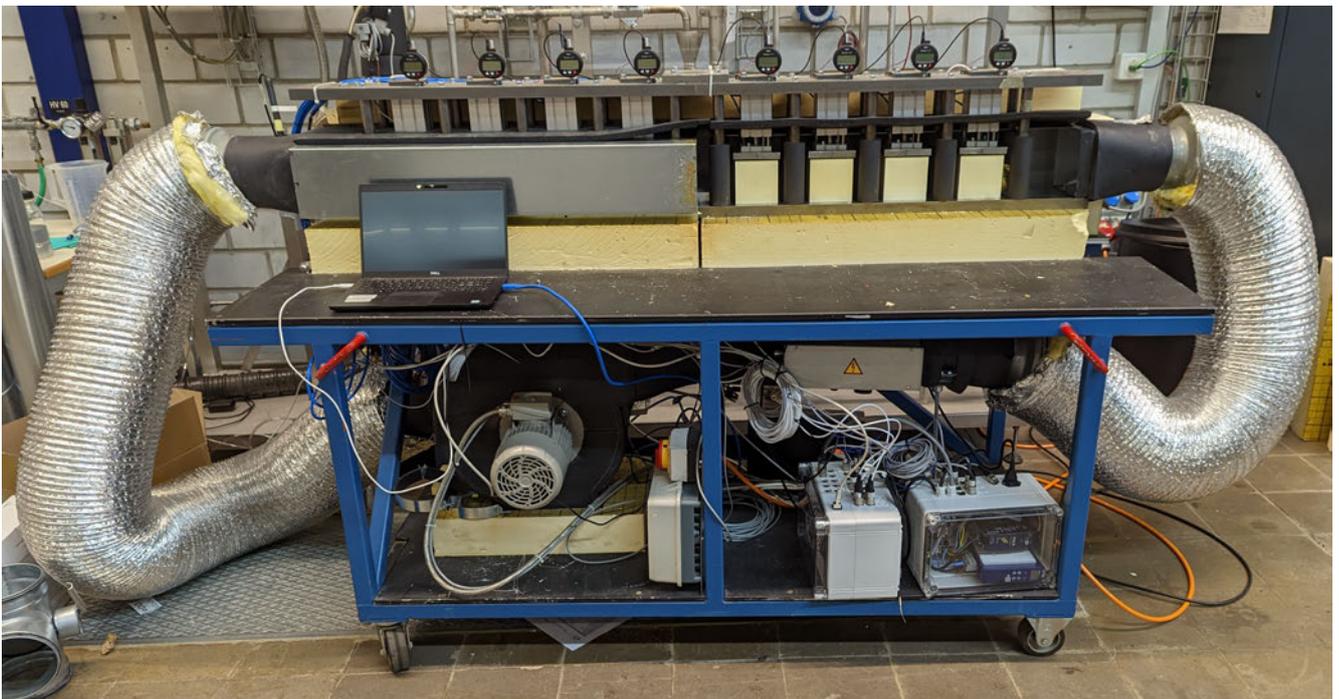


Abbildung 2.2: Vorhandenes Setup vor dem Umbau

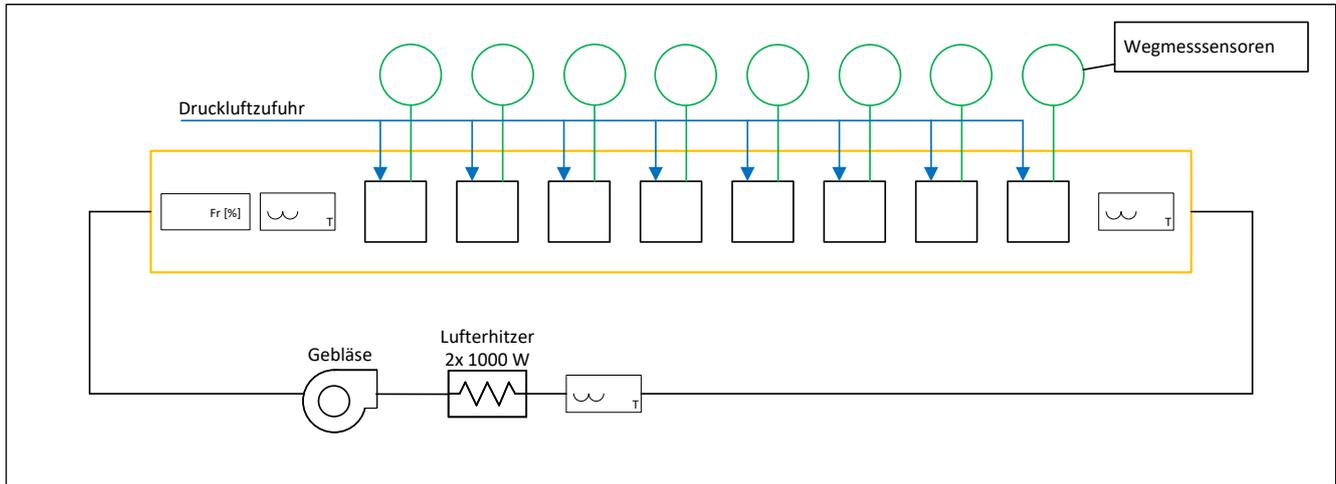


Abbildung 2.3: Schema des Prüfstands vor dem Umbau

2.2 Dämmmaterial

Das zu untersuchende Dämmmaterial besteht aus Polyisocyanuraten (PIR). Diese Kunststoffe sind den Polyurethanen (PUR) verwandt und werden speziell zur Wärmedämmung in der Gebäudehülle eingesetzt. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden sie auch als Leichtbeton bezeichnet [2]. PIR kann gemäss Datenblatt eine Druckbeanspruchung von bis zu 25 kPa aushalten ohne sich physisch zu verändern und lediglich eine Dichte von 30 $\frac{kg}{m^3}$ hat [3]. Als Nennwert für die Wärmeleitfähigkeit werden 0.022 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ angegeben. Steinwolle hat zum Vergleich bei gleicher Dichte eine Wärmeleitfähigkeit von 0.036 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ [4]. Als Deckschicht auf der Ober- und Unterseite der PIR-Blöcke ist Aluminiumfolie aufgeklebt (Abbildung 2.4). Diese dient als Dampfsperre und schützt vor mechanischen Beschädigungen.

In vorhergehenden Versuchen mit dem bestehenden Prüfstand wurde das Kriechverhalten, in anderen Worten die Stauchung, von Dämmmaterialproben bei bestimmten Temperaturen und Druckbelastungen untersucht [5]. Im Rahmen dieser Arbeit wird ergänzend dazu das Kriechverhalten und die Ausdehnung bei unterschiedlich hoher Luftfeuchtigkeit analysiert. Es ist zu erwarten dass der PIR-Hartschaum, wie es im Langzeitversuch (Abbildung 1.2) der Fall ist, das in der Luft enthaltene Wasser absorbiert und dadurch aufquillt.

2.3 Luftfeuchtigkeit

In dieser Arbeit wird zwischen absoluter, spezifischer und relativer Luftfeuchtigkeit unterschieden. Im Testkanal, mit einem Luftfeuchtigkeitsfühler vom Typ HygroClip2 ADVANCED vom Hersteller Rotronic, wird die relative Luftfeuchtigkeit in Prozent und die Temperatur in $^{\circ}C$ gemessen [6]. Mit diesen beiden Angaben kann mithilfe eines Psychrometrischen Diagramms nach Mollier (Abbildung A.1) die spezifische Luftfeuchtigkeit X bestimmt werden. Als Vereinfachung wird der Luftdruck p als konstant bei 970 $mbar$ angenommen.

2.3.1 Absolute Luftfeuchtigkeit

Die absolute Luftfeuchtigkeit kann als Wasserdampfdichte oder Dampfdichte beschrieben werden und wird in dieser Arbeit mit dem Formelzeichen ρ_v bezeichnet. Hierbei handelt es sich um die Menge an Wasserdampf, welche in einem Luftvolumen enthalten ist und ergibt sich aus folgender Formel:

$$\rho_v = \frac{p_v}{R_v \cdot T} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (2.1)$$

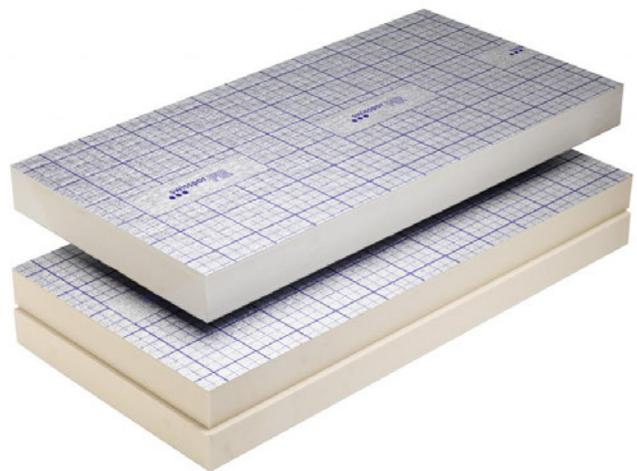


Abbildung 2.4: Platten aus PIR-Hartschaum [3]

2.3.2 Spezifische Luftfeuchtigkeit

Das Verhältnis zwischen der Wassermasse m_W und der Trockenluftmasse m_L bezeichnet die spezifische Luftfeuchtigkeit X . Im Mollier-Diagramm (Abbildung A.1) ist sie an der X-Achse abzulesen. Berechnet wird sie folgendermassen:

$$x = \frac{m_W}{m_L} \quad \left[\frac{kg_{Wasser}}{kg_{trockeneLuft}} \right] \quad (2.2)$$

2.3.3 Relative Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit wird auch als Sättigungsgrad bezeichnet. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen der Wasserdampfmasse in einem bestimmten Volumen feuchter Luft und der Menge, die bei Sättigung und gleicher Temperatur im selben Volumen maximal enthalten sein kann. Die relative Luftfeuchtigkeit wird in % ausgedrückt.

2.3.4 Natürliche Einflüsse auf die Luftfeuchtigkeit

Da der Prüfstand nicht hermetisch abgeschlossen ist, kommt es zu einem geringen Luftaustausch zwischen Luftkanal und Umgebungsluft. Dies bewirkt, dass sich die Bedingungen im Kanal, wenn kein Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit oder die Temperatur genommen wird, den Umgebungsbedingungen anpassen.

Während eines Tages schwankt die Luftfeuchtigkeit bis zu $\pm 5\%$ des Tagesmittelwerts, was für die Fragestellung dieser Arbeit vernachlässigbar ist [7]. Die saisonalen Veränderungen haben dagegen eine wesentlich grössere Differenz zum Jahresmittelwert, dies ist in Abbildung 2.5 ersichtlich.



Abbildung 2.5: Verlauf der spezifischen Luftfeuchtigkeit über ein Jahr in Bern. Datenquelle: MeteoSchweiz [8]

3 Engineering

In diesem Kapitel werden verschiedene Vorschläge für die Luftbefeuchtung und -trocknung beschrieben. Dazu werden grundsätzliche Berechnungen und Abschätzungen durchgeführt. Anschliessend wird mittels Experimenten die Funktion der Methoden getestet und bewertet. Aus den Vorschlägen wird die beste Möglichkeit für die jeweilige Art der Beeinflussung der Luftfeuchtigkeit ausgewählt.

3.1 Luftbefeuchtung

Der Wasserdampfgehalt der Luft in einem System kann z.B. adiabatisch oder isotherm erhöht werden. Eine adiabatische Befeuchtung ergibt sich bei einer direkte Verdunstung des Wassers in der Luft ohne Energiezufuhr von aussen. Die für die Verdunstung benötigte Wärme muss somit von der befeuchteten Luft bereit gestellt werden, was eine Temperaturabsenkung bewirkt. Um eine möglichst schnelle Verdunstung zu ermöglichen, sollte eine grosse Kontaktfläche zwischen der Luft und dem Wasser im flüssigen Zustand geschaffen werden. Um dies zu erreichen werden in der Gebäudetechnik und in der Industrie häufig Zerstäuber eingesetzt [7]. In Abschnitt 3.1.1 wird dies genauer erklärt.

Wenn die Luftbefeuchtung mittels Zuführung von Satt-dampf in einen Luftstrom geschieht, wird von einer näherungsweise isothermen Luftbefeuchtung gesprochen. Dadurch dass die Zustandsänderung des Wassers von flüssig zu dampfförmig bereits vor der Einspritzung geschieht, kühlt sich die Luft während der Befeuchtung nicht ab, sondern die Temperatur wird sogar leicht erhöht. In Abbildung 3.1 sind die beiden Befeuchtungsmethoden beispielhaft dargestellt.

Um zu die zuzuführende Dampfmenge zu bestimmen, muss zunächst das Volumen und die Masse der Luft im Setup bestimmt werden. Aus einer gesamten Länge des Luftkanals von ca. 7.2 m, einer durchschnittlichen Querschnittsfläche von 0.03 m³ und der Dichte von trockener Luft von 1.078 $\frac{kg}{m^3}$ folgt folgende Berechnung:

$$m_{TrockeneLuft} = 7.2m * 0.03m^2 * 1.078 \frac{kg}{m^3} = 0.233kg \tag{3.1}$$

Mit diesem Wissen und einem Psychrometrischen Diagramm nach Mollier (oder rechnerisch) kann nun bestimmt werden wie viel Wasserdampf in g bei der gewünschten relativen Luftfeuchtigkeit im Testkanal enthalten sein muss. In Abbildung 3.2 ist in blau der Bereich dargestellt, in dem sich die Umgebungsbedingungen je nach Tages- und Jahreszeit in der Zentralschweiz üblicherweise bewegen können [9] (vgl. Abschnitt 2.3.4). In Gelb ist der festgelegte Regelbereich des Setups dargestellt. Die Temperatur des Regelbereichs ist nie unter 35 °C da im Testkanal nicht gekühlt werden kann und so auch bei sommerlichen Temperaturen im Labor alle Tests durchgeführt werden können. Aus Abbildung 3.2 folgt für die Befeuchtung eine maximale Differenz der

absoluten Luftfeuchtigkeit von 28 $\frac{g}{kg}$, was multipliziert mit der Masse der trockenen Luft im Kanal eine Massendifferenz des Wasserdampfes von 6.52 g ergibt. Auf die Entfeuchtung wird in Abschnitt 3.2 eingegangen.

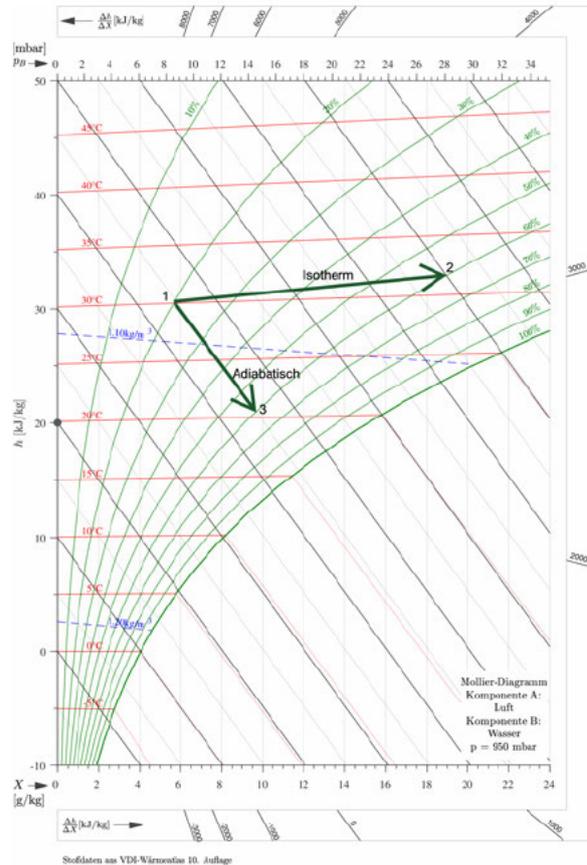


Abbildung 3.1: Adiabatische und Isotherme Befeuchtung im h, X Diagramm

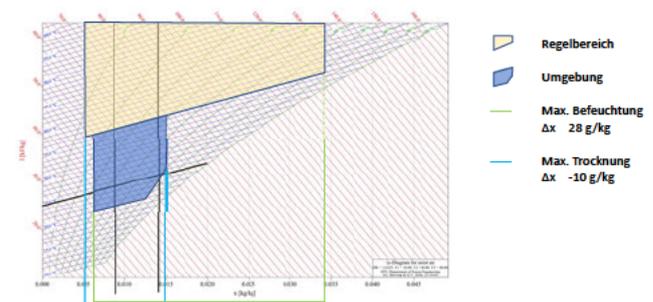


Abbildung 3.2: Regelbereich der Luftfeuchtigkeitskontrolle

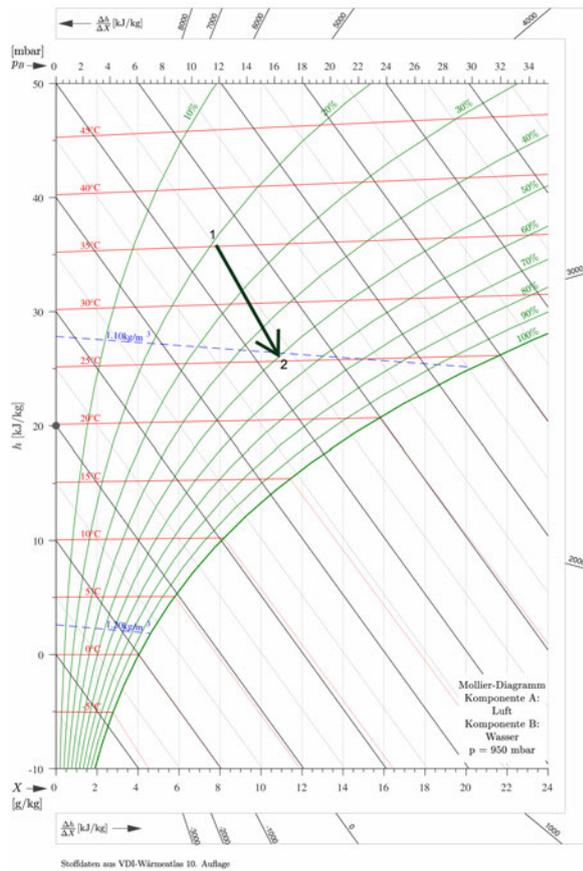


Abbildung 3.3: Messergebnis der Befeuchtung mittels Zerstäuberdüse im h, x Diagramm

3.1.1 Wasser über Düse einspritzen

Bei einer Luftbefeuchtung mittels flüssigem Wasser, das der Luft über eine Zerstäuberdüse zugeführt wird, findet eine adiabate Befeuchtung statt. Dies hat eine Abkühlung der Luft im Kanal zur Folge. Die Lufterhitzer, welche sich in Strömungsrichtung nach dem Gebläse befinden, müssen die Luft anschliessend wieder auf die gewünschte Temperatur erwärmen. In einem ersten Versuch wird eine Zerstäuberdüse des Typs Airfog AF-1 des Herstellers GKK® (Abbildung 3.4) am Setup installiert. Dieser verfügt über einen Wasser- und Druckluftanschluss. Durch die Beimischung der Druckluft wird das Wasser, um eine möglichst schnelle Verdunstung zu gewährleisten, in feine Tropfen mit einer Tropfengrösse von maximal $500 \mu\text{m}$ aufgeteilt. Das Ergebnis des Versuches ist in Abbildung 3.3 dargestellt. In diesem h, X Dia-

gramm sind die realen Messdaten vor und nach dem Befeuchten dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich die Luft merklich abkühlt und die Lufterhitzer nicht genügend Leistung haben, um dem entgegen zu wirken. Zudem sammelt sich das nicht verdunstete Wasser im Luftkanal an und sorgt dafür, dass auch wenn kein Wasser mehr eingespritzt wird, die Befeuchtung nicht zu Ende ist. Dies verhindert eine zuverlässige Regelung.

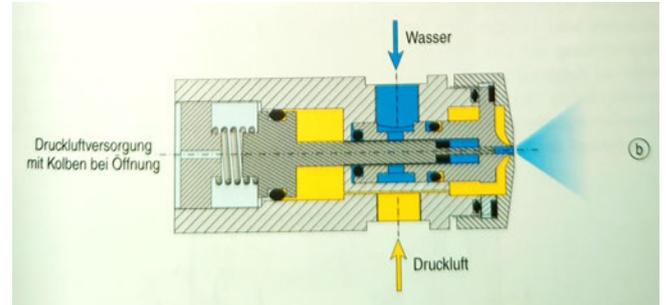


Abbildung 3.4: Funktionsschema einer Druckluftdüse [7]

3.1.2 Wasserdampf einspritzen

Wenn Wasserdampf in einen Luftstrom eingeführt wird, wird die Luftfeuchtigkeit erhöht. Da die Zustandsänderung von flüssig zu gasförmig bereits im vornherein stattfindet, erfolgt keine Temperaturabsenkung der befeuchteten Luft wie dies bei einer Wasserzerstäubung oder -verdunstung typisch ist [7]. Um die Umsetzbarkeit einer Luftbefeuchtung mittels Wasserdampf zu überprüfen, wird am Setup eine Düse installiert, die dem Luftstrom Sattdampf von einem Dampferzeuger zuführt. Aus Kostengründen wird hierbei auf die bestehende Infrastruktur im Thermolabor zurückgegriffen und deshalb ein stark überdimensionierter Dampferzeuger des Typs PS200 vom Hersteller Stritzel Dampftechnik GmbH mit 20 kW Heizleistung und einer maximalen Dampfmenge von $28 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ angeschlossen [10].

Für den Versuch wird der Luftkanal auf konstant 45 °C erwärmt und anschliessend Sattdampf zugeführt. In Abbildung 3.5 ist ersichtlich dass die Luftfeuchtigkeit bei einer vollständigen Öffnung des Ventils innerhalb von drei Minuten von $10 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$ auf $38 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$ erhöht werden kann. Da das System Luftkanal nicht hermetisch abgeschlossen ist, kann eine relative Luftfeuchtigkeit von 100% bei dieser Temperatur nicht erreicht werden. Verglichen mit den definierten Anforderungen des Regelbereichs aus Abbildung 3.2 ergibt sich eine genügende Befeuchtungsleistung mittels Dampfzuführung.

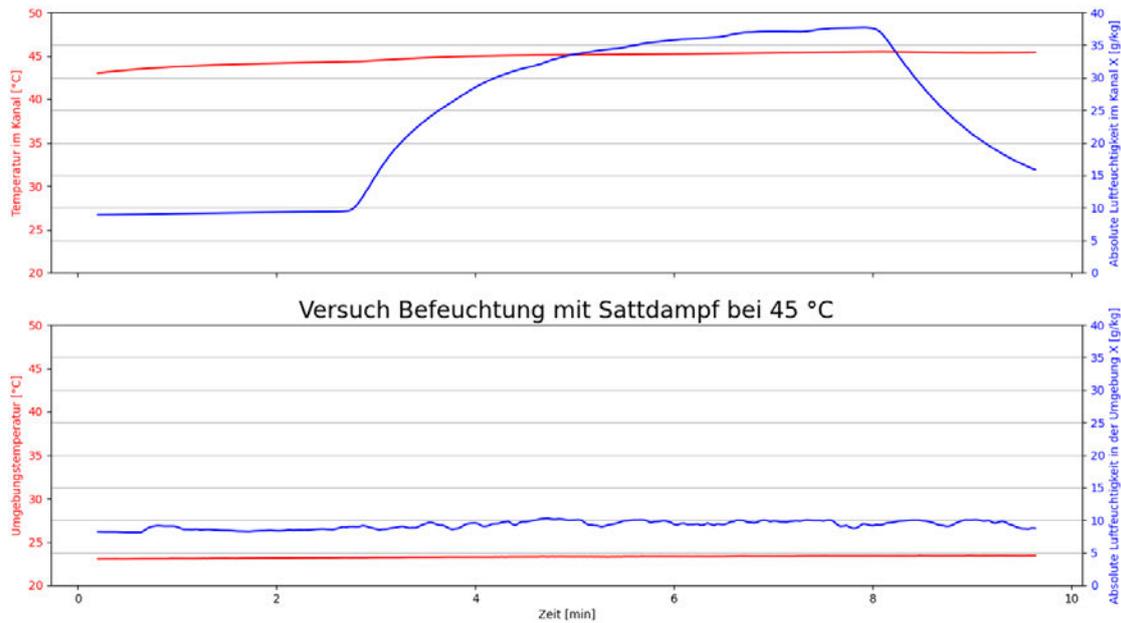


Abbildung 3.5: Messergebnis der Befeuchtung mittels Sattdampfzuführung.

3.2 Luftentfeuchtung

Um den Wasserdampfgehalt der Luft in einem System zu senken, werden in der Industrie und Gebäudetechnik hauptsächlich Kondensations- und Adsorptionsverfahren eingesetzt. Das erste Verfahren wird auch als **Entfeuchtung durch Taupunktunterschreitung** bezeichnet. Hierbei wird die zu entfeuchtende Luft abgekühlt, wodurch die relative Luftfeuchtigkeit steigt und bei Erreichen des Sättigungszustandes der überschüssige Wasserdampf abgeschieden wird [11]. Da eine Temperatursenkung im Luftkanal nicht in Frage kommt, wird diese Art der Luftentfeuchtung nicht weiter berücksichtigt.

Die sorptive Luftentfeuchtung basiert auf dem Einsatz von Hygroskopischen Materialien. Beispiele dafür sind Silicagel, Tonerde und Zeolith (Molekularsieb). Je nach Struktur und Material weisen diese unterschiedliche Partialdrücke auf. Solange der Partialdruck des Wassers in der Luft höher ist als der des Adsorbens, findet ein Partialdruckausgleich statt, der dafür sorgt, dass der Wasserdampf aus der Luft an das Hygroskopische Material abgegeben und die Luft somit entfeuchtet wird. Sobald das Adsorbens gesättigt ist, kann es kein Wasser mehr adsorbieren und muss regeneriert werden. Dies kann entweder in einem Ofen durch Erhöhung der Umgebungstemperatur erreicht werden oder indem der Partialdruck des Wasserdampfes in der Umgebungsluft gesenkt wird. In der Praxis wird jedoch fast ausschliesslich die Temperaturerhöhung angewendet [11]. In Abbildung 3.6 sind die Sorptionsisothermen von verschiedenen hygroskopischen Materialien dargestellt. Es ist ersichtlich, dass Zeolith auch bei niedrigsten Umgebungs-Luftfeuchtigkeiten fä-

hig ist, Wasser zu adsorbieren. Somit kann damit die Luft theoretisch komplett entfeuchtet werden.

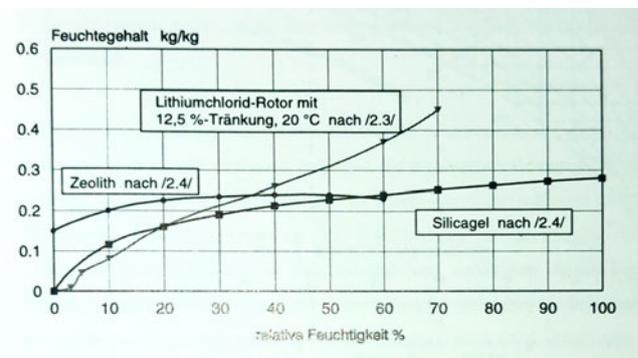


Abbildung 3.6: Sorptionsisothermen von Lithiumchlorid, Zeolith und Silicagel bei 25 °C [11]

Häufige Anwendungen in der Praxis sind sogenannte **Sorptionsregeneratoren**. Diese bestehen grundsätzlich aus einem langsam rotierenden Rad, durch welches im Gegenstrom von zwei Luftströmen durchströmt wird. Auf dem Regeneratrorrad ist ein Adsorbens angebracht, das in einem kontinuierlichen Prozess die einströmende Luft entfeuchtet und auf der anderen Seite Wasserdampf an die ausströmende Luft abgibt [11].

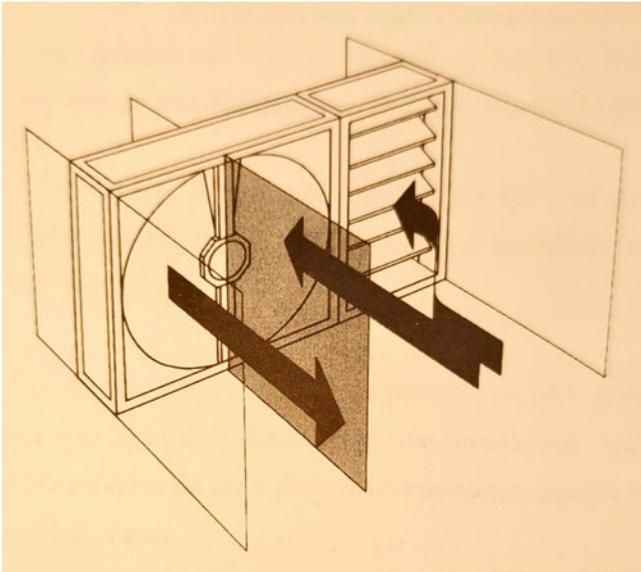


Abbildung 3.7: Aufbau eines Sorptionsregenerators [11]



Abbildung 3.8: Silicagel als Pulver mit Korngrösse 0.2 - 1.0 mm [12]

3.2.1 Silicagel

Silicagel ist ein farbloser, geruchloser, nicht brennbarer Feststoff, der aus Siliciumdioxid hergestellt wird und eine grosse spezifische Oberfläche von ca. $800 \frac{m^2}{g}$ besitzt. Daher ist Silicagel in der Lage, unter anderem Wassermoleküle zu adsorbieren. Das in dieser Arbeit verwendete Silicagel hat folgende Adsorptionseigenschaften in Gewichtsprozent bei $25^\circ C$ [12]:

- 11 % bei 20 % rF
- 22 % bei 40 % rF
- 33 % bei 80 % rF

Silicagel kann in einem Ofen durch Ausheizen bei $120 - 130^\circ C$ regeneriert und so wiederverwendet werden.

In einem Versuch werden selbst hergestellte Beutel aus PTFE mit Silicagel gefüllt und anschliessend in den Testkanal gelegt. Die Messdaten, bei einer Temperatur von $25^\circ C$ und einem Trockengewicht des Silicagels von

$220 g$, ergeben eine Trocknung von weniger als 10 % Änderung der Luftfeuchtigkeit.

3.2.2 Tonerde

Als weiteres Trockenmittel wird in der Industrie Tonerde verwendet. Hierbei handelt es sich um ungiftiges Naturmaterial, das durch seine poröse Struktur eine hohe Adsorptionsfähigkeit besitzt. Es wird überwiegend in Verpackungen zum Schutz vor Luftfeuchtigkeit verwendet. Gemäss Datenblatt kann Tonerde bei $25^\circ C$ und 40 % rF 1 - 2 Gew. % Wasserdampf adsorbieren [13]. Dies ist im Vergleich zu Silicagel sehr wenig, jedoch kann wegen des geringen Einkaufspreises und der hohen Verfügbarkeit von Tonerde mehr davon eingesetzt werden.

Im Experiment zur Überprüfung, ob die Feuchtigkeitsregelung mithilfe dieses Trockenmittels durchgeführt werden kann wurden insgesamt $2 kg$ Tonerde in Beuteln in den Luftkanal gelegt. Der Versuch zeigt dass Tonerde fähig ist, die Luftfeuchtigkeit zu senken. Bei einer Temperatur von $30^\circ C$ wird jedoch nur eine minimale relative Luftfeuchtigkeit von knapp 40 % erreicht. Dies ist nicht ausreichend tief und somit kommen die mit Tonerde gefüllten Trocknungsbeutel nicht in Frage für den Einsatz im umgebauten des Prüfstand. Die Messdaten sind in Abbildung 3.9 dargestellt.

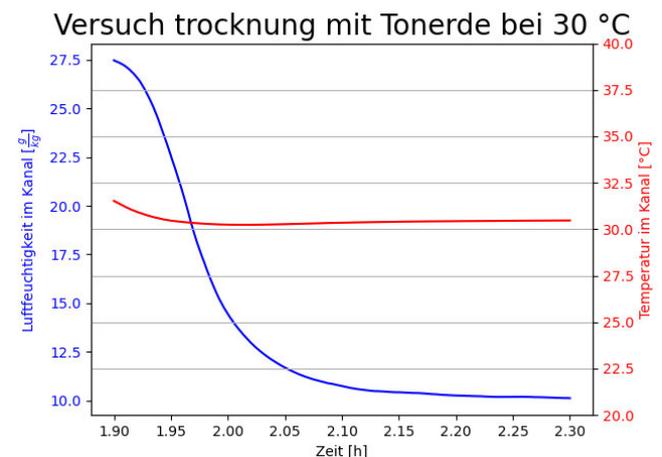


Abbildung 3.9: Messergebnis der Trocknung mittels mit Tonerde gefüllten Beuteln

3.2.3 Molekularsieb

Molekularsiebe aus Zeolith weisen eine sehr hohe Adsorptionskapazität für Gase, Dämpfe und gelöste Stoffe auf. Somit sind sie auch geeignet um Wasserdampf aus der Luft aufzunehmen und so die Luftfeuchtigkeit zu senken [11]. Wie in Abbildung 3.6 ersichtlich, ist Zeolith nicht so stark von der Umgebungsfeuchtigkeit abhängig und kann auch bei einer extrem tiefen relativen Luftfeuchtigkeit knapp 20 Gew. % Wasserdampf adsorbieren. Die maximale Wasserdampfaufnahme beträgt gemäss Datenblatt mindestens 27 Gew. %. Ausserdem kann Zeolith bei $250^\circ C$ wiederholt regeneriert werden [14]. Da in der Konzeptionsphase nur $60 g$ der Perlen aus Zeolith verfügbar sind, kann kein aussagekräftiges Experiment durchgeführt werden.



Abbildung 3.10: Molekularsieb 13X Perlen [14]

3.3 Fazit der Engineeringphase

Aus den Versuchen geht hervor, dass die Befeuchtung der Luft mit Satttdampf ohne weiteres möglich und umsetzbar ist. Da auf die vorhandene Infrastruktur im Labor zurückgegriffen wird, müssen keine neuen Bauteile oder Gerätschaften beschafft werden.

Die Lufttrocknung stellt eine erhöhte Herausforderung dar. Da die Entfeuchtung durch Taupunktunterschreitung eine Temperatursenkung bedingt, kommt dies, da die Temperatur gemäss den Anforderungen an das Setup konstant gehalten werden soll, nicht in Frage. Tonerde als Sorptionsmittel kann unterhalb einer relativen Luftfeuchtigkeit von 40 % keinen Wasserdampf aufnehmen und scheidet somit aus der engeren Auswahl ebenfalls aus. Wegen der kleinen Korngrösse des Silicagel-Pulvers ist es schwierig, einen geeigneten Behälter dafür zu finden, der dafür sorgt, dass während den weiterführenden Experimenten kein Trocknungsmittel verloren geht. Somit sind Molekularsiebe aus Zeolith in Perlenform am besten geeignet um die Luftfeuchtigkeit im Testkanal zu senken.

4 Umsetzung der gewählten Lösung

Das Regelprogramm, die Steuerung der verschiedenen Aktoren und die Datenspeicherung ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Es wird rein die physische Grundlage für ein System gebaut, womit zusätzlich zu den ursprünglichen Funktionen, in anderen Worten der Regelung der Temperatur und mechanischen Belastung, die Luftfeuchtigkeit im Setup auf einem voreingestellten Wert konstant gehalten werden kann.

Als beste Möglichkeit für die Feuchtigkeitsregelung erweist sich ein geteilter Kanal der auf der einen Seite eine Trocknungskolonie und auf der anderen Seite einen Bypass besitzt. Mithilfe einer Bypassklappe für Wickelfalzhöhre [15] und einem Servomotor für deren Steuerung [17] kann der Luftstrom im Kreislauf so umgelenkt werden, dass ein Teil der Luft durch die Trocknungskolonie strömt. Darin wird die Luft so trocken wie möglich gemacht und anschliessend wieder mit dem Luftstrom, der durch den Bypasskanal strömt, vermischt.

4.1 Dampfzufuhr

Die Dampfzufuhr findet in Strömungsrichtung vor dem Gebläse statt. Die Turbulenzen, welche im Lüfter und in den Rohrleitungen entstehen sorgen anschliessend für eine gute Durchmischung. Der Sattdampf wird über ein direktwirkendes 2-Wege-Standard-Proportionalventil vom Typ 2873 des Herstellers Bürkert am bezeichneten Ort, wie in Abbildung 4.2 ersichtlich, zugeführt. Dieses Ventil kann gemäss Datenblatt stufenlos geregelt werden und ist für Temperaturen bis +90 °C geeignet. Diese Maximaltemperatur wird mit

dem Sattdampf überschritten und kann dafür sorgen, dass die Dichtung aus Fluorkautschuk (FKM) undicht wird [16].

4.2 Trocknungskolonie

Nach den Lufterhitzern wird der Luftstrom mithilfe eines Bypassventils, das mit einem Ventilantrieb des Typs NRQ24A-SR vom Hersteller Belimo® betätigt wird, geteilt [17]. Ein Teil der Luft strömt dadurch in den Trocknungskanal und wird mittels der Trocknungseinsätze (Abbildung 4.1) getrocknet. Ein Einsatz beinhaltet ungefähr 1 kg Molekularsieve aus Zeolith in Perlenform. Mit einer maximalen Wasserdampfaufnahme des Zeoliths von >27 Gew. % kann ein Einsatz mindestens 270 g Wasser aus der Luft adsorbieren. Für einen zuverlässigen Betrieb mit einer konstanten absoluten Luftfeuchtigkeit, die nicht tiefer ist als $5 \frac{g}{kg}$ unterhalb der Umgebungfeuchtigkeit, reichen dadurch zwei der vier hergestellten Einsätze während mindestens 24 Stunden aus. Die anderen beiden können in dieser Zeit in einem Ofen bei 250 °C regeneriert werden. Sobald die Trocknungseinsätze, welche sich im Trocknungskanal befinden mit Wasser gesättigt sind, können sie, ohne den laufenden Versuch zu unterbrechen, ausgetauscht werden.



Abbildung 4.1: Trocknungseinsatz mit Molekularsieben aus Zeolith für die Lufttrocknung im Trocknungskanal.

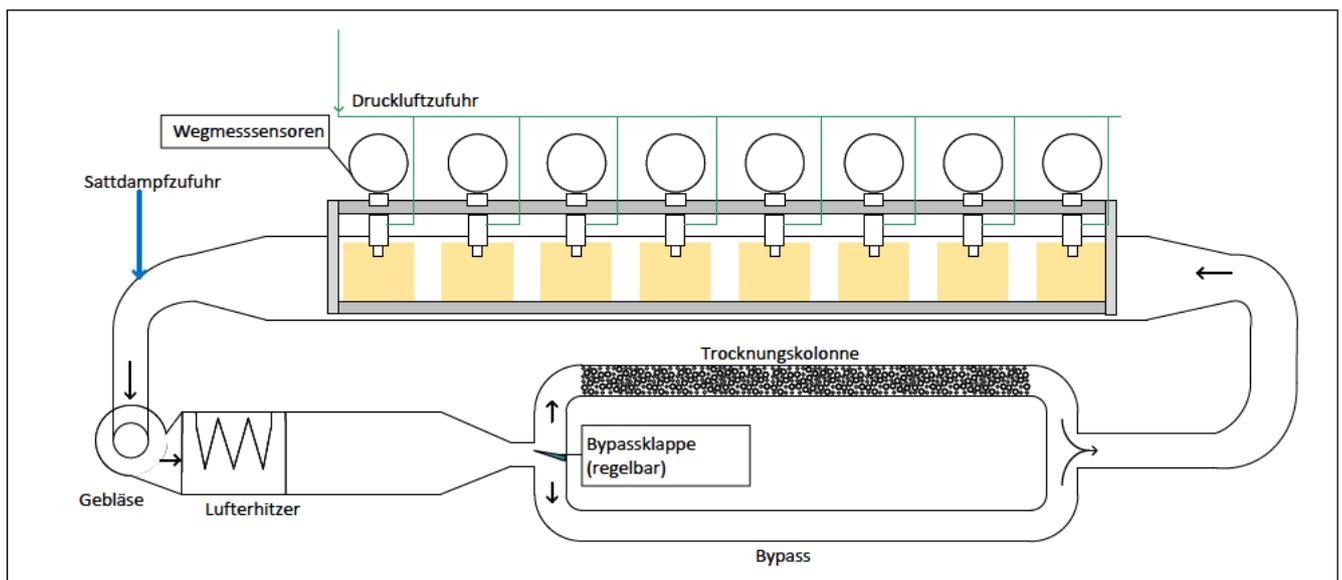


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau des Prüfstands nach dem Umbau.

4.3 Thermische Dämmung

Der Prüfstand ist darauf ausgelegt, Tests bei Temperaturen von bis zu 95 °C durchzuführen. Um thermische Abstrahlungsverluste über die Rohrwände zu vermeiden, wird jedes Rohrstück wärmegeämmt. Dafür wird Armaflex® von armacell® verwendet. Dies ist ein hochflexibles, geschlossenzelliges Dämmmaterial mit einem hohen Wasserdampf-Diffusionswiderstand mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit von $0.033 \frac{W}{m \cdot K}$. Es ist als Schlauch, Platte, Streifen und selbstklebendes Band erhältlich und besteht aus Elastomerschaum auf Basis von synthetischem Kautschuk [18]. Da die Rohrteile alle unterschiedliche Formen aufweisen, wird Armaflex® in Plattenform von 50 mm Dicke verwendet und individuell zugeschnitten. An Kritischen Stellen wird die Wärmedämmung mit selbstklebendem Band ergänzt. Das Ergebnis der Verkleidung der Rohrteile mit Armaflex® ist in den Abbildungen 4.4 und 4.3 ersichtlich.



Abbildung 4.3: Wärmegedämmte Rohrkrümmer mit Armaflex®-Mantel.



Abbildung 4.4: Umgebauter Prüfstand mit Trocknungskolonnen, Bypasskanal und Bypassklappe.

4.4 Abschliessende Experimente

Um einen Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und Ausdehnung des Dämmmaterials herzuleiten werden alle Experimente bei einer Temperatur von 35 °C und einer mechanischen Belastung von 10 kPa durchgeführt. Die Dämmmaterialproben werden vor jedem Versuch durch neue ersetzt. Es werden Versuche auf drei verschiedenen Feuchtigkeitsniveaus durchgeführt und anschliessend verglichen. Der grundsätzliche Ablauf sieht folgendermassen aus:

- **Initialisieren**
Das Gebläse wird eingeschaltet und die Luft wird auf den Sollwert der Temperatur erwärmt. Anschliessend wird die Luftfeuchtigkeitsregelung eingeschaltet. Dieser Schritt dient der Akklimatisierung der Proben ohne mechanische Belastung.
- **Nullhöhe bestimmen**
Die Proben werden mit 10 kPa belastet um deren Höhe zu Beginn des Versuchs zu bestimmen. Aus dieser Initialhöhe kann in der Datenauswertung die Prozentuale Dehnung bzw. Stauchung berechnet werden.
- **Befeuchten (Hauptphase 1)**
Die mechanische Belastung verharrt bei 10 kPa und die Luftfeuchtigkeit im Testkanal wird auf einen voreingestellten Wert erhöht.
- **Trocknen (Hauptphase 2)**
In diesem Schritt wird die Luftfeuchtigkeit im Setup wieder auf den Wert während der Akklimatisierung gesenkt. Dies dient der Analyse des Dämmmaterials wenn es im vornherein erhöhter Luftfeuchtigkeit ausgesetzt war.

Nach jedem Versuch wurden neue Erkenntnisse gewonnen, wodurch einzelne Parameter für den nächsten Versuch geändert wurden. Die Ergebnisse der Experimente und die geänderten Parameter werden im Abschnitt 5 erklärt.

Experiment Nummer	Beschreibung	Zeitdauer [h]	rF [%]	Druckbelastung [kPa]	Temperatur [°C]
1	Initialisieren	2	25	0	35
	Nullhöhe Bestimmen	10	25	10	35
	Befeuchten	42	75	10	35
	Trocknen	42	25	10	35
2	Initialisieren	2	25	0	35
	Nullhöhe Bestimmen	10	25	10	35
	Befeuchten	52	90	10	35
	Trocknen	52	25	10	35
3	Initialisieren	2	20	0	35
	Nullhöhe Bestimmen	10	20	10	35
	Befeuchten	52	60	10	35
	Trocknen	52	60	10	35
4	Initialisieren	2	15	0	35
	Nullhöhe Bestimmen	10	15	10	35
	Trocknen	80	15	10	35

Tabelle 4.1: Ablauf der vier abschliessenden Experimente

5 Ergebnisse

Dieser Abschnitt dient der Erklärung der Entscheidungen, die zu den jeweiligen Parametern der Experimente führten. Zudem werden die Ergebnisse diskutiert und

mögliche Zusammenhänge zwischen der Luftfeuchtigkeit und der Ausdehnung der Dämmmaterialproben hergeleitet.

Der genaue Ablauf der einzelnen Versuche ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

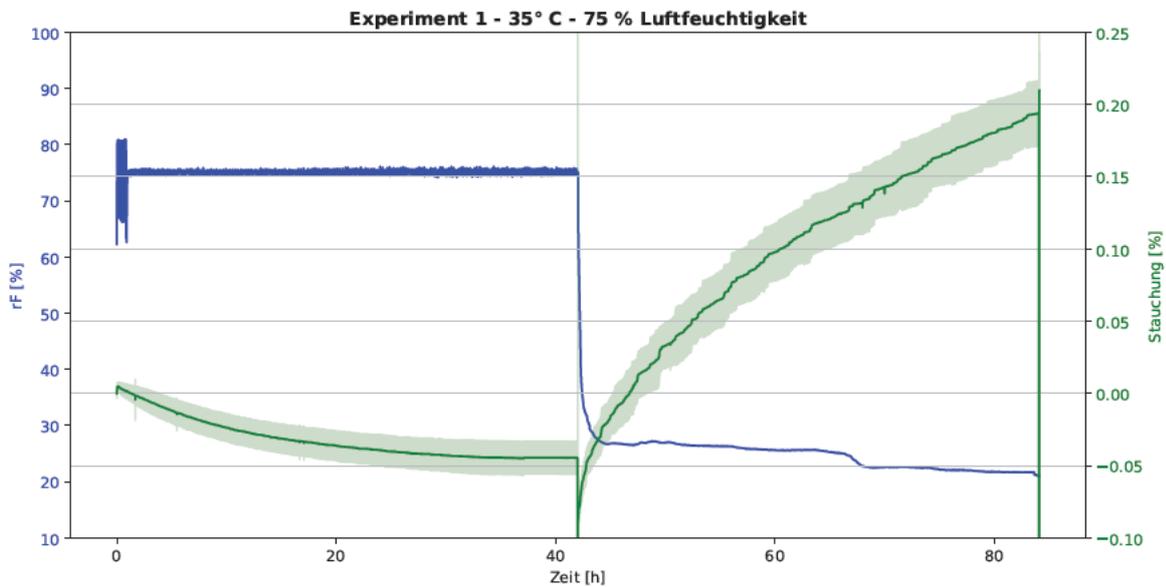


Abbildung 5.1: Messdaten von Experiment 1. Dargestellt wird die gemessene relative Luftfeuchtigkeit und der Mittelwert, sowie die Standardabweichung der Stauchung aller Proben.

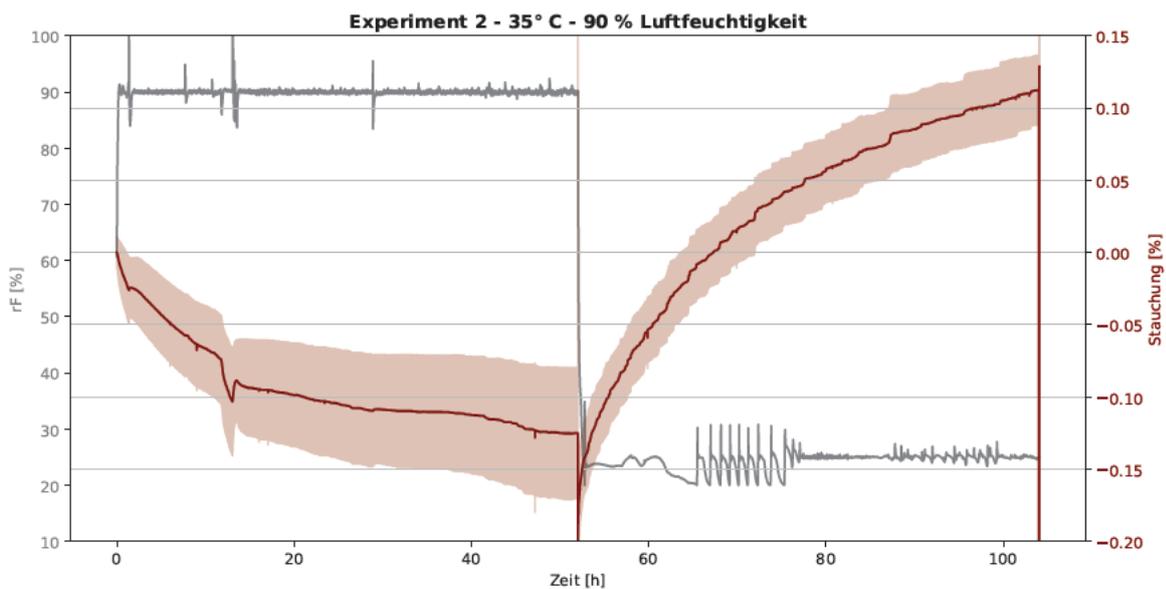


Abbildung 5.2: Messdaten von Experiment 2. Dargestellt wird die gemessene relative Luftfeuchtigkeit und der Mittelwert, sowie die Standardabweichung der Stauchung aller Proben.

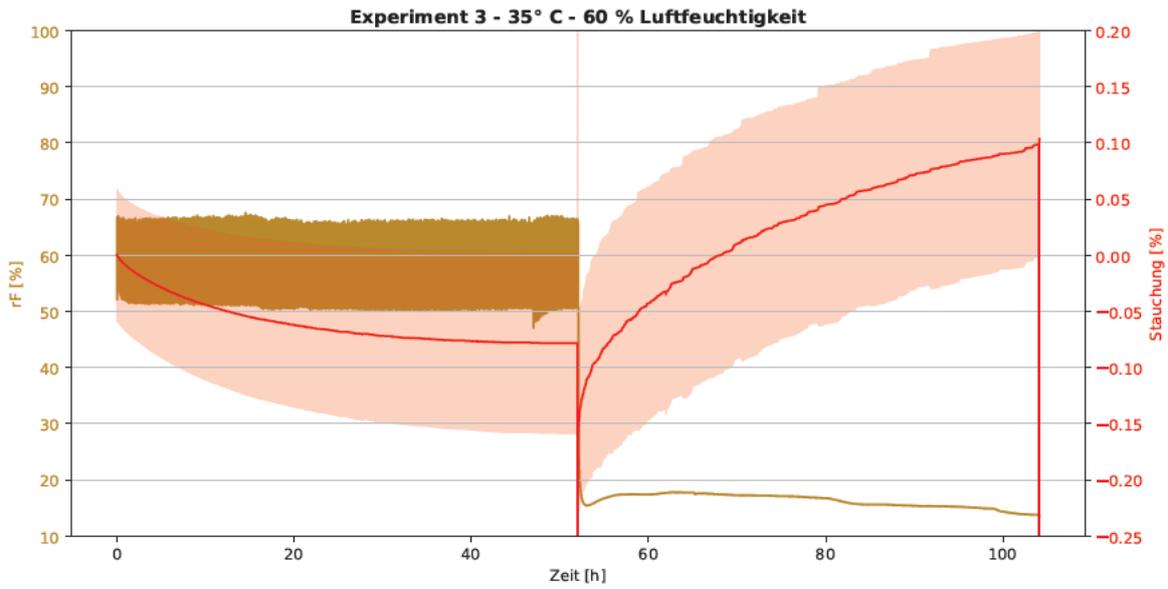


Abbildung 5.3: Messdaten von Experiment 3. Dargestellt wird die gemessene relative Luftfeuchtigkeit und der Mittelwert, sowie die Standardabweichung der Stauchung aller Proben.

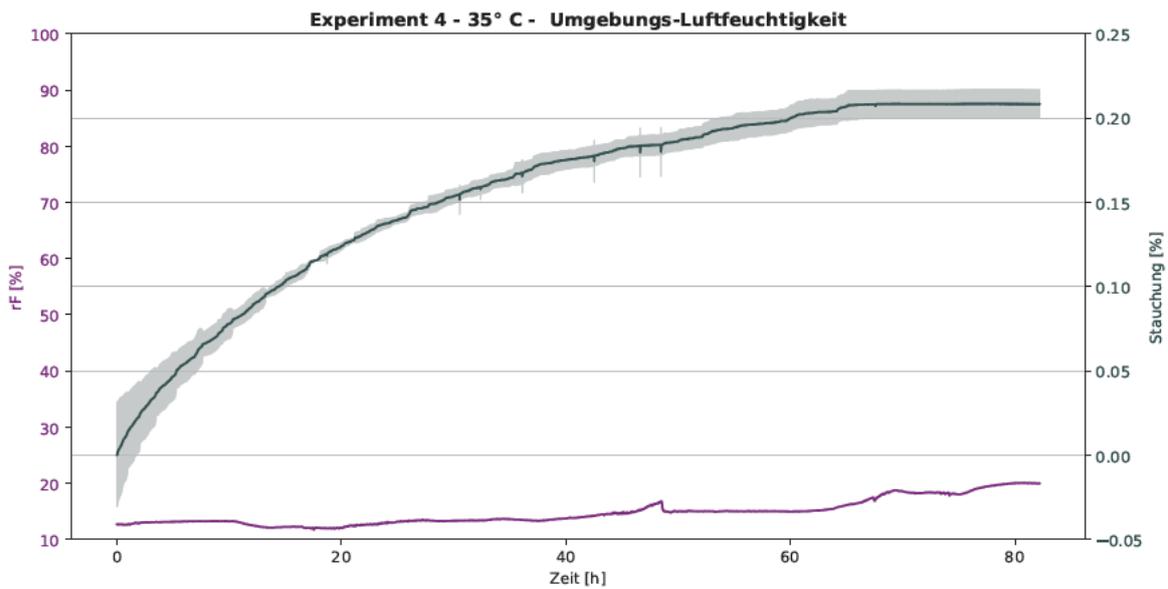


Abbildung 5.4: Messdaten von Experiment 4. Dargestellt wird die gemessene relative Luftfeuchtigkeit und der Mittelwert, sowie die Standardabweichung der Stauchung aller Proben.

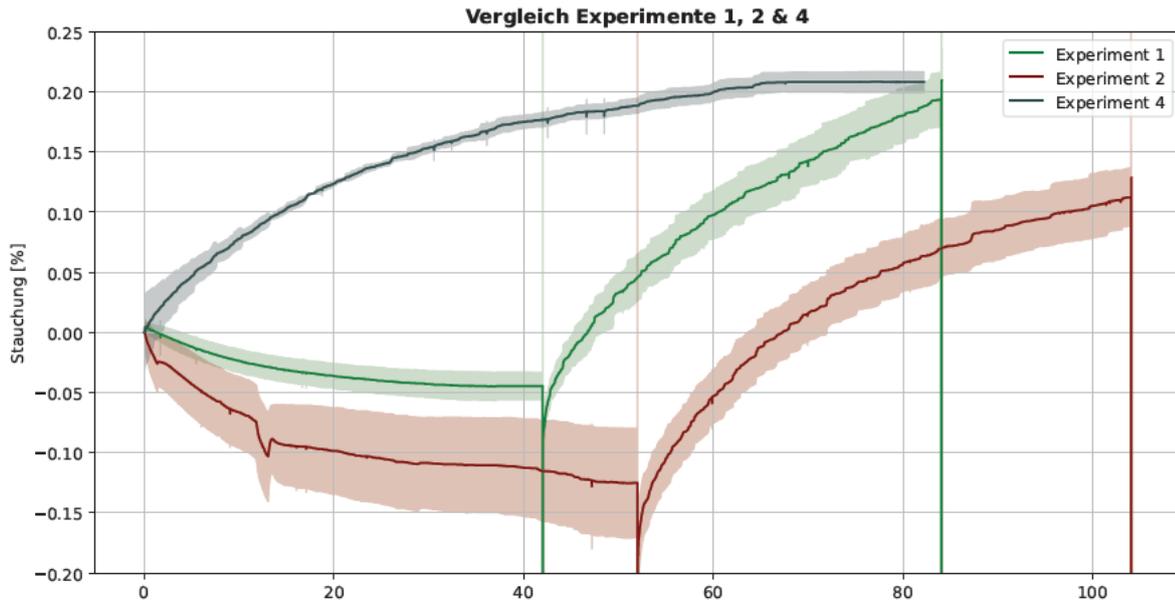


Abbildung 5.5: Stauchung der Experimente 1, 2 & 4 zum Vergleich der Endwerte.

5.1 Experiment 1

Das erste abschliessende Experiment wird mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 % während der Befeuchtungsphase durchgeführt. In einem Versuch wurde ermittelt, dass sich der PIR-Schaum nach ~ 40 h der geänderten Luftfeuchtigkeit anpasst (Abbildung A.2). Aus diesem Grund dauern die Befeuchtungs- und Trocknungsphase für dieses Experiment 42 Stunden. Die beiden Hauptphasen (befeuchten & trocknen) sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Stauchung in grün zeigt die Prozentuale Änderung der Höhe der Dämmmaterialproben im Verhältnis zur Initialhöhe. Aus den Messdaten der Wegmessensensoren wird für jeden Zeitpunkt der Mittelwert und die Standardabweichung über alle Proben berechnet.

Es ist ersichtlich, dass sich die Proben in den ersten 42 Stunden, mit erhöhter Luftfeuchtigkeit, erwartungsgemäss ausdehnen (vgl. Abschnitt 2). Nach dieser Phase werden die Druckluftzylinder angehoben und anschliessend wieder gesenkt. Dies führt dazu, dass das Dämmmaterial kurzzeitig nicht belastet ist, und sich zusätzlich ausdehnt. In der Trocknungsphase beträgt die über alle Proben gemittelte Änderung der Stauchung bis zum Zeitpunkt des Abbruchs des Experiments 0.3 %. Es ist jedoch offensichtlich, dass die Trocknungsphase zu wenig lange dauert, denn die grüne Linie erreicht nach 42 Stunden keinen Endwert.

5.2 Experiment 2

Da bei Experiment 1 die Trocknungsphase zu wenig lange dauerte, werden die beiden Hauptphasen beim zweiten Experiment (Abbildung 5.2) auf 52 Stunden verlängert. Die relative Luftfeuchtigkeit während dem be-

feuchten wird auf 90 % eingestellt. Aus den Messdaten folgt im Mittel eine dreimal so grosse Ausdehnung nach vierzig Stunden, als dies beim ersten Experiment der Fall ist. Die Standardabweichung ist während der ersten Hauptphase beachtlich grösser. Dies ist auf die Schwankungen der Feuchtigkeitsregelung zurückzuführen. Dass diese einen grossen Einfluss haben, wird vor allem bei der Unregelmässigkeit der Stauchung nach ca. 15 h ersichtlich. Während der Trocknungsphase treten bei der relativen Luftfeuchtigkeit ebenfalls erhebliche Schwankungen auf. Diese haben aber keinen offensichtlichen Einfluss auf die Stauchung des Dämmmaterials. Der Stufenförmige Verlauf der kastanienbraunen Kurve wird durch die Haftreibung der Druckluftzylinder hervorgerufen. Eine kontaktlose Höhenmessung hat das Potential, die Stufen in den Messdaten auszumerzen.

5.3 Experiment 3

Um eine weitere Messreihe zu analysieren und diese in die Gesamtanalyse mit einzubeziehen, wird ein drittes Experiment durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Wider Erwarten fällt die mittlere Ausdehnung während dem Befeuchten stärker aus als bei Experiment 1, das mit einer höheren Luftfeuchtigkeit durchgeführt wurde. Die Standardabweichung der Stauchungen entspricht über die gesamte Aufzeichnung der Trocknungsphase 100 % des Endwerts. Dies und die starken Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit während der Befeuchtungsphase führt zur Entscheidung, dass Experiment 3 wiederholt werden muss um aussagekräftige Daten zu erheben.

5.4 Experiment 4

Zur Analyse der Stauchung bei einer dauerhaft tiefen relativen Luftfeuchtigkeit, in diesem Fall bei 15 % rF, wird ein viertes Experiment über eine Zeitdauer von 80 Stunden durchgeführt. Die Messdaten (Abbildung 5.4) zeigen über alle Proben einen gleichmässigen Verlauf mit einer vergleichsweise geringen Standardabweichung.

5.5 Vergleich Experimente 1, 2 & 4

Die Experimente 1, 2 und 4 weisen eine hohe Qualität der Messdaten auf und können somit verglichen werden. Es kann gesagt werden, dass sich das Dämmmaterial abhängig von der Luftfeuchtigkeit ausdehnt. Mit den Messdaten zweier Versuche, in denen Befeuchtet wurde, kann keine zuverlässige Aussage getroffen werden, ob der Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und Ausdehnung linear ist oder nicht. Speziell ist jedoch, dass die Stauchung der PIR-Blöcke bei den Experimenten 1 und 4 zum Ende der Aufzeichnungen gleich stark ausfallen. Daraus kann die Erkenntnis abgeleitet werden, dass sich die Struktur des Dämmmaterials bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 % und einer Temperatur von 35 °C (dies entspricht einer absoluten Luftfeuchtigkeit von $28.9 \frac{g}{kg}$) nicht nachhaltig verändert. Bei rF = 90 % während der Befeuchtungsphase, kann es sein, dass es eine längere Zeit als 52 Stunden dauert bis sich die PIR-Blöcke den neuen Umgebungsbedingungen anpassen.

6 Schlusswort

6.1 Rückblick

Diese Bachelor-Thesis bildet die Grundlage für weiterführende Analysen der Kriechdehnung von Dämmmaterial aus PIR. Dazu wurde der bereits vorher existierende Prüfstand erfolgreich umgebaut. Die Luftfeuchtigkeit im Testkanal kann erhöht, gesenkt und stabil gehalten werden. Es wurden bisher nur Experimente mit einer Temperatur von 35 °C durchgeführt und ausgewertet. Aus den Messergebnissen ergibt sich, dass es mindestens vierzig Stunden dauert, bis sich das Dämmmaterial an veränderte Umgebungsbedingungen anpasst. Somit sind Experimente, die weniger als 40 *h* bei denselben Bedingungen verharren, nicht sinnvoll.

6.2 Ausblick und Handlungsempfehlung

Es wird empfohlen, das in Abschnitt 5.3 beschriebene Experiment zu wiederholen. Anschliessend können Experimente nach demselben Muster wie in Tabelle 4.1 auf einem höheren Temperaturniveau durchgeführt werden. Dabei ist es von Vorteil, wenn für jeden neuen Versuch nur ein Parameter verändert wird. Dadurch werden Fehlinterpretationen vermieden. Als Ergänzung zum Langzeitversuch, der in Abbildung 1.2 dargestellt ist, wird eine erneute Durchführung mit stabilisierter Luftfeuchtigkeit empfohlen.

Das 2-Wege-Proportionalventil, das für die Dampfzufuhr sorgt, ist nicht für Dampf mit einer Temperatur von 130 °C geeignet und sollte durch ein geeignetes Ventil ersetzt werden.

Literatur

- [1] SWISSPOR AG ; SWISSPOR AG (Hrsg.): *Technologie: Neue Werkstoffe und Technologien*. <https://www.swisspor.ch/warum-swisspor/technologie>. Version:2022
- [2] CASERI, Walter: *Polyisocyanurate*. Thieme Gruppe, 2009 <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-16-03343>
- [3] SWISSPOR AG ; SWISSPOR AG (Hrsg.): *PIR Alu: Produktbeschreibung*. <https://www.swisspor.ch/pir-alu?breadcrumbReferer=product-line>. Version:2022
- [4] SWISSPOR AG ; SWISSPOR AG (Hrsg.): *ROC Typ 1 Produktbeschreibung*. 2022
- [5] CC-TES ; CC-TES (Hrsg.): *Messdaten Experiment 12: PALUHD, (35 °C, 60 kPa)*. 2022
- [6] ROTRONIC AG ; ROTRONIC AG (Hrsg.): *HygroClip2 Advanced: Feuchte-Temperatur-Fühler*. https://www.rotronic.com/pub/media/productattachments/files/h/y/hygroclip_2_advanced_manual_v1.6_en.pdf
- [7] LAZZARIN, Renato: *Die Luftbefeuchtung : Technik, Gesundheit und Energie*. 2. Neudr. Brugine : CAREL, 2006
- [8] METEOSCHWEIZ ; METEOSCHWEIZ (Hrsg.): *Messdaten Wetterstation Bern 09/19-09-21*. Messdaten Wetterstation, 2021
- [9] METEOBLUE ; METEOBLUE (Hrsg.): *Wetterarchiv Luzern*. https://www.meteoblue.com/de/wetter/historyclimate/weatherarchive/luzern_schweiz_2659811?fcstlength=1y&year=2021&month=1. Version: 2021
- [10] STRITZEL DAMPFTECHNIK GMBH ; STRITZEL DAMPFTECHNIK GMBH (Hrsg.): *Dampferzeuger PS200*. <https://www.dampf.com/dampferzeuger-ps200/>. Version: 2020
- [11] HEINRICH, Günter (Hrsg.) ; FRANZKE, Uwe (Hrsg.): *Sorptionsgestützte Klimatisierung: Entfeuchtung und DEC in der Klima-Kälte-Technik*. 1. Aufl. Heidelberg : Müller, 1997. – ISBN 3-7880-7552-X
- [12] DRY & SAFE GMBH ; DRY & SAFE GMBH (Hrsg.): *Silicagel Pulver*. <https://www.trockenmittel.ch/silicagel-pulver-zum-trocknen-von-blumen.html.html>. Version: 2021
- [13] DRY & SAFE GMBH ; DRY & SAFE GMBH (Hrsg.): *Trockenmittelbeutel DESI PAK: 500 g Bentonit*. <https://www.trockenmittel.ch/trockenmittel/trockenmittelbeutel/trockenmittelbeutel-desi-pak-16-tme-500-g-bentonit.html.html>. Version: 2021
- [14] DRY & SAFE GMBH ; DRY & SAFE GMBH (Hrsg.): *Molekularsieb 13X*. <https://www.trockenmittel.ch/trockenmittel/molekularsieb/molekularsieb-13-x-3-5-mm-perlen.html>. Version: 2021
- [15] MKK-SHOP ; MKK-SHOP (Hrsg.): *Bypassklappe für Wickelfalzhöhre*. <https://mkk-shop.de/Bypassklappe-fuer-Wickelfalzhöhre>. Version: 2022
- [16] BÜRKERT GMBH ; BÜRKERT GMBH (Hrsg.): *Typ 2873: Direktwirkendes 2-Wege-Standard-Proportionalventil*. <https://www.buerkert.ch/de/type/2873>. Version: 2021
- [17] BELIMO HOLDING AG ; BELIMO HOLDING AG (Hrsg.): *NRQ24A-SR: Technisches Datenblatt*. https://www.belimo.com/mam/general-documents/datasheets/de-ch/belimo_NRQ24A-SR_datasheet_de-ch.pdf. Version: 2022
- [18] ARMACELL ENTERPRISE GMBH & Co. KG ; ARMACELL ENTERPRISE GMBH & Co. KG (Hrsg.): *AF/Armaflex*. https://local.armacell.com/fileadmin/cms/downloads/product-catalogues/de/AFArmaflex_SpecialPage_DE.pdf. Version: 2019

A Anhang

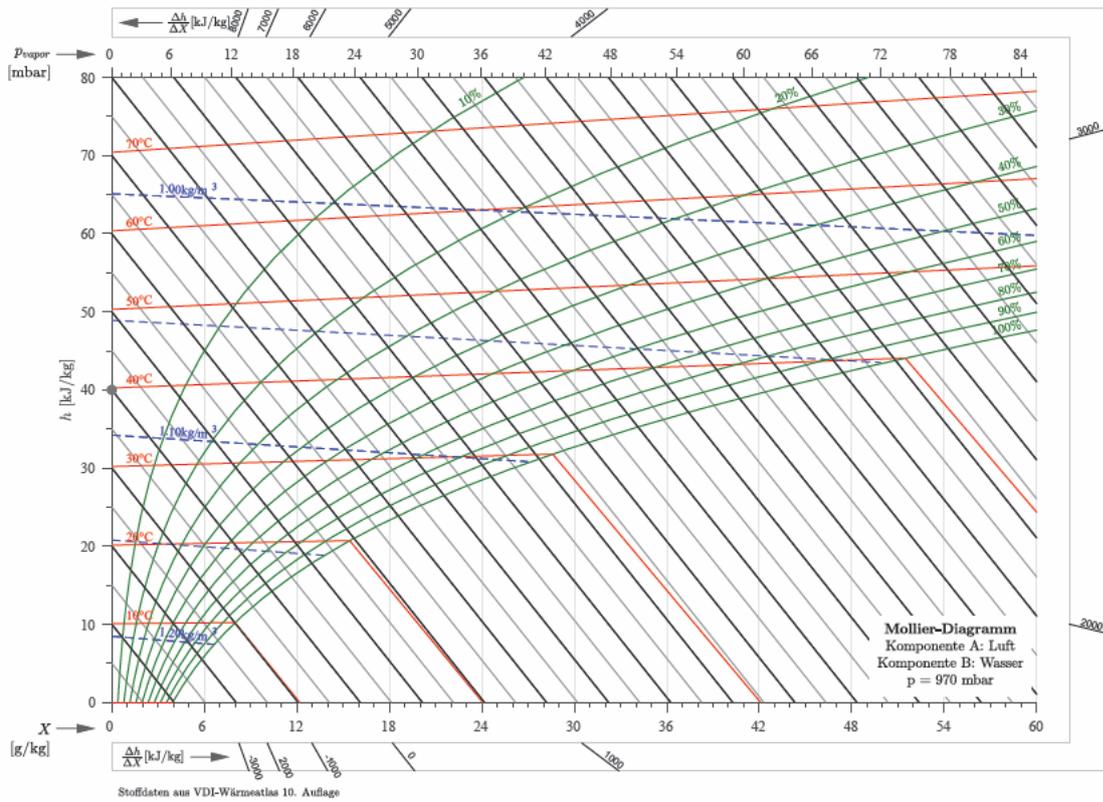


Abbildung A.1: Psychrometrisches Diagramm nach Mollier

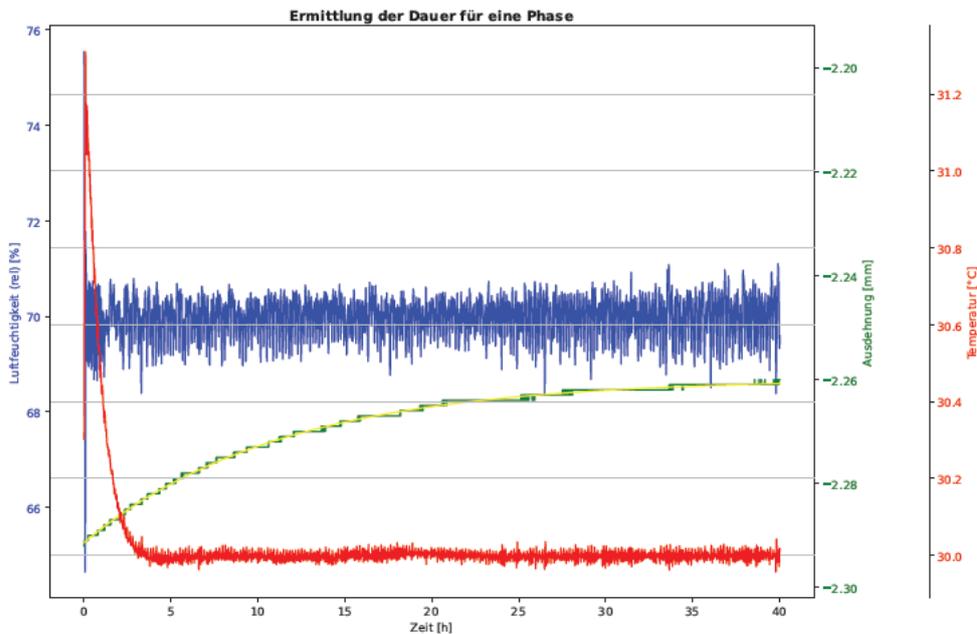


Abbildung A.2: Experiment für die Ermittlung der Dauer einer Phase für die abschliessenden Experimente

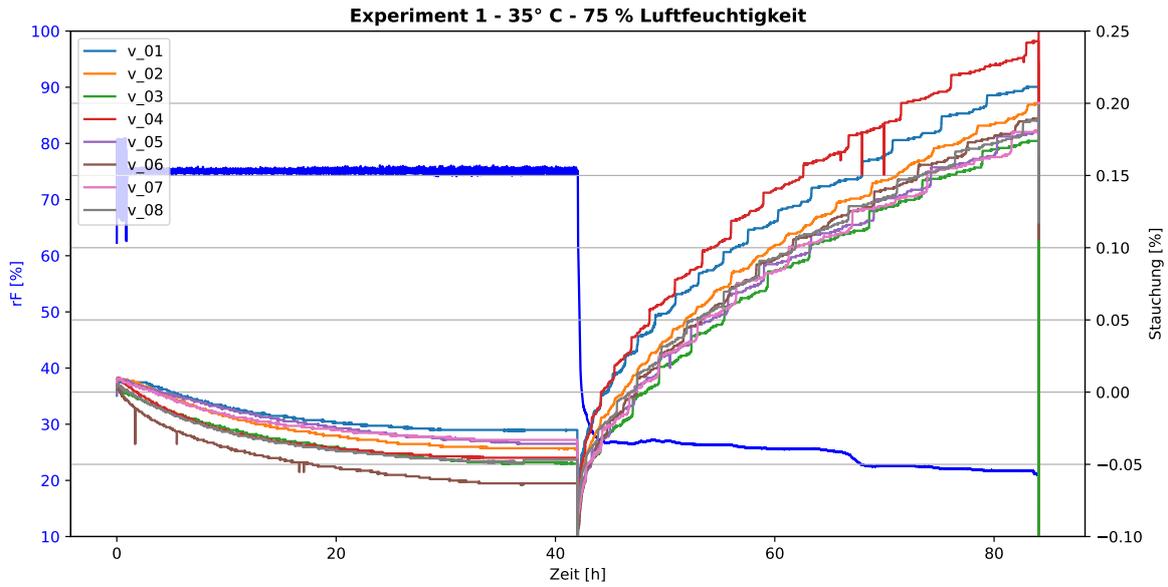


Abbildung A.3: Messdaten von Experiment 1. Dargestellt wird die gemessene relative Luftfeuchtigkeit und die Stauchung aller Proben einzeln.

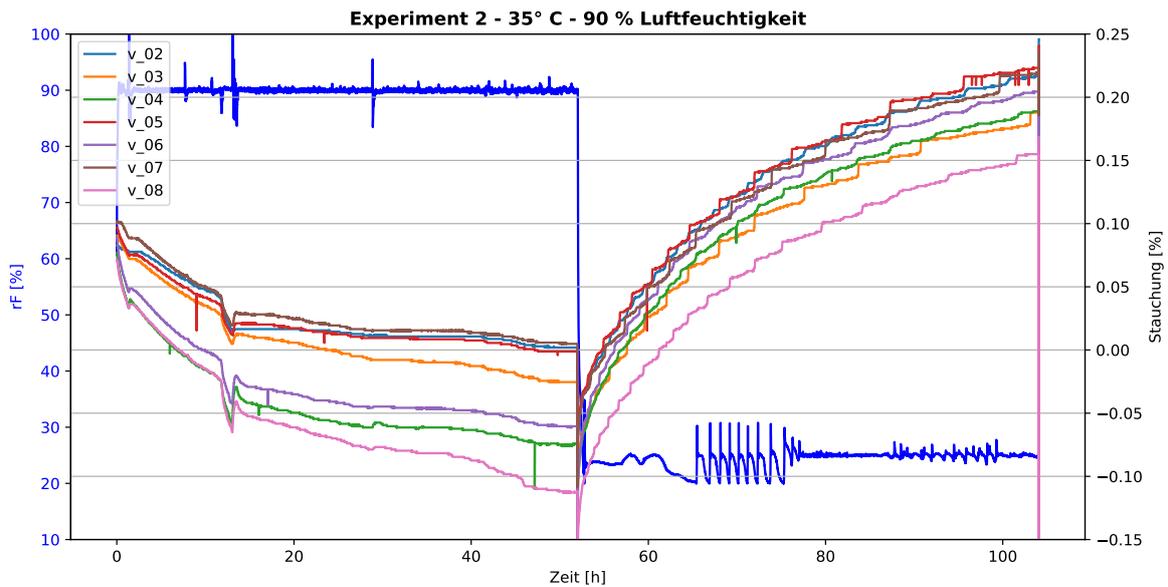


Abbildung A.4: Messdaten von Experiment 2. Dargestellt wird die gemessene relative Luftfeuchtigkeit und die Stauchung aller Proben einzeln.

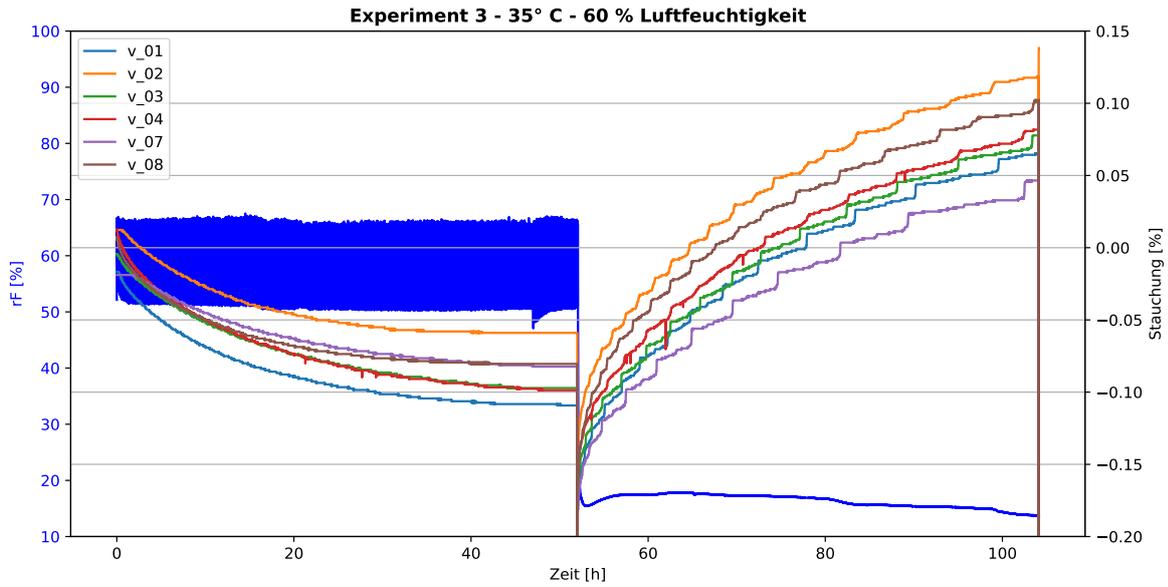


Abbildung A.5: Messdaten von Experiment 3. Dargestellt wird die gemessene relative Luftfeuchtigkeit und die Stauchung aller Proben einzeln.

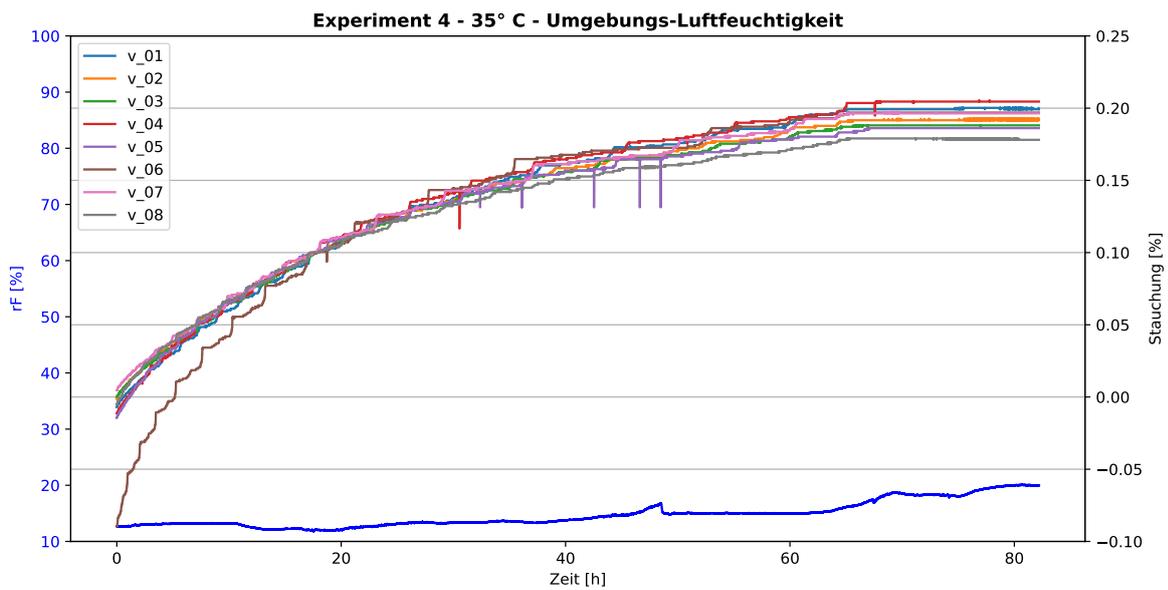


Abbildung A.6: Messdaten von Experiment 4. Dargestellt wird die gemessene relative Luftfeuchtigkeit und die Stauchung aller Proben einzeln.