

Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel **Systemverhalten und Regelstrategie für einen Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte**

Diplomandin/Diplomand **Baumann, Marius**

Bachelor-Studiengang **Bachelor Maschinentechnik**

Semester **FS22**

Dozentin/Dozent **Gruber, Peter**

Expertin/Experte **Haller, Ruedi**

Abstract Deutsch

Der Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte des Instituts für Gebäudetechnik und Energie hat eine Regelung, die nicht zufriedenstellend funktioniert. Um diese zu verbessern wird in dieser Arbeit in einem ersten Schritt die Regelung des Vorkühlers der Aussenluft neu angeschaut. Es wird ein Modell des Wärmetauschers erstellt und anhand dieses Modells werden die Regelparameter für einen PI-Regler mit Gain-Scheduling bestimmt. Parallel wird dasselbe für das System Umweltsimulationskammer gemacht, an welchem dann schliesslich auch ein Teil des Reglers getestet wird.

Abstract Englisch

The control system for the test bench for compact ventilation units at the Institute of Building Technology and Energy is currently not working as intended. The goal of this thesis is to take the first step by looking at the control system of the first stage of the outdoor air cooler. A model of the heat exchanger is created with the help of which the control parameters for a PI-controller with gain scheduling are determined. At the same time a model of the system "Umweltsimulationskammer" is made, which is then finally used to test the determined control system.

Ort, Datum **Altdorf, 10.06.22**

© **Marius Baumann, Hochschule Luzern – Technik & Architektur**

Systemverhalten und Regelstrategie für einen Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte

Themengebiet Produktentwicklung und Mechatronik

BAT 2022

Marius Baumann

Verantwortlicher Dozent
Prof. Dr. Peter Gruber

Kontatkpersonen
Martin Hämmerle
Erich Stauffer
Jasin Jasari

Industriepartner
Institut für Gebäudetechnik und Energie, Labor Gebäudetechnik

Experte
Ruedi Haller

Hochschule Luzern - Studiengang Maschinentechnik
10. Juni 2022
Version 1.0

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
2	Stand der Technik	2
2.1	Prüfstand	2
2.2	Arten von Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung	3
2.2.1	Plattenwärmetauscher	3
2.2.2	Rotationswärmetauscher	4
2.2.3	Abluftwärmepumpen	4
2.3	Normen	5
2.4	Hydraulische Schaltungen	6
2.4.1	Labornetz	7
3	Methode	8
3.1	Herangehensweise	8
3.2	Vorkühler Aussenluft	8
3.3	Umweltsimulationskammer	8
3.4	Subsysteme	9
3.4.1	Modell einer Zelle	9
3.4.2	Modell Ventil	11
3.4.3	Modell Wärmetauscher	11
3.5	Modell VK AUL	12
3.5.1	Bestimmung der Parameter VK AUL	12
3.6	Modell USK	13
3.6.1	Messung	13
3.6.2	Bestimmung der Parameter USK	14
3.7	Regelung	15
3.7.1	Ansatz	15
3.7.2	Bestimmung Regelparameter	16
4	Resultate	19
4.1	Bestimmung der Regelparameter	19
4.1.1	Parameter VK AUL	19
4.1.2	Parameter USK	20
4.2	Funktion der Regler	21

4.2.1	Regler VK AUL	22
4.2.2	Regler USK	22
4.3	Testen des Reglers der Umweltsimulationskammer	23
4.3.1	Implementierung des Reglers	23
4.3.2	Ergebnisse Reglertest	23
5	Diskussion	25
5.1	Reglertest	25
5.2	Fazit	25
5.3	Ausblick	26
A	Dank	IV
B	Anhang	V

Akronyme

ABL Abluft. 4, 5

AUL Aussenluft. I, 4, 5, 8, 11, 12

FOL Fortluft. 4

NK Nachkühler. 2

RLT Raumlufotechnisch. 1

SPS Speicherprogrammierbare Steuerung. 23

USK Umweltsimulationskammer. I, IV, 8, 9, 11, 13

VK Vorkühler. I, 8, 11, 12

ZUL Zuluft. 4

Formelzeichen und Abkürzungen

$\dot{m}$	Massenstrom
A	Fläche
c	spezifische Wärmekapazität
in	Eingang
K_P	Verstärkung
K_S	Statische Verstärkung
L	Luft
m	Masse
n	Anzahl Zellen
out	Ausgang
T	Temperatur
T_G	Ausgleichszeit
T_N	Nachstellzeit
T_U	Verzugszeit
U	Innere Energie
W	Wasser (Glykol-Gemisch)

1. Einleitung

1.1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Der Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte wird vom Institut für Gebäudetechnik und Energie verwendet, um verschiedene Normen und Zulassungen zu prüfen. Geprüft werden dabei hauptsächlich folgende Raumlufthechnische Geräte (RLT-Geräte)

- Kompaktlüftungsgeräte mit Wärmetauscher
- Rekuperative und regenerative Wärmerückgewinnungsgeräte
- Abluftwärmepumpen für die Zulufterwärmung

Alle genannten Geräte bilden die Schnittstelle zwischen Raum und Umgebung. Um die verschiedenen Luftarten in einem RLT-Gerät zu unterscheiden, werden in dieser Arbeit die Begriffe gemäss EN 13799 verwendet.

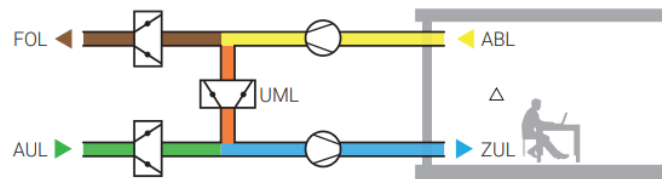


Abbildung 1.1.: Begriffe der Luftarten (BELIMO, 2021)

Die Prüfung erfolgt durch das Koppeln der vier Luftströme des Prüflings mit dem Prüfstand. Der Prüfstand bringt mit sogenannten Monoblöcken die Luftströme auf die gewünschten Temperaturen, Feuchtigkeiten, Massenströme und Drücke. Diese Grössen können je nach Prüfung stark variieren, was den Anspruch an den Prüfstand erhöht. Zudem kann der Prüfstand auch mit Umluft betrieben werden. Um die genannten Grössen während des Prüfvorgangs konstant zu halten, werden sie geregelt. Daraus entsteht die Aufgabenstellung für diese Arbeit: **Die Regelung des Prüfstandes funktioniert derzeit ungenügend und soll überarbeitet werden.** Um eine Prüfung durchzuführen müssen im Moment von Hand Einstellungen an einzelnen Ventilen vorgenommen werden, um einen stationären Zustand zu erreichen. Dies braucht sehr viel Zeit und auch Erfahrung mit dem Prüfstand.

In dieser Arbeit wird die Regelung eines ersten Teilstücks, dem Vorkühler der Ausenluft, angeschaut. Mit einem Modell wird das Systemverhalten simuliert und daraus wird eine Regelung abgeleitet. Da der Prüfstand häufig verwendet wird und nicht genügend Möglichkeiten für Messungen bietet, werden die Modelle und Regler an einem vergleichbaren System getestet.

2. Stand der Technik

2.1. Prüfstand

Der Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte und Komfortlüftung wurde im Jahr 2005 (Furter et al., 2005) fertiggestellt. Ursprünglich diente er dazu, ein eigens ausgearbeitetes Prüfreglement zu prüfen. Schon während des Baus des Prüfstandes wurde das Prüfreglement regelmässig überarbeitet und normativen Entwicklungen angepasst. Heute werden weitgehend Europäische Normen sowie auch Zulassungen von verschiedenen unabhängigen Institutionen geprüft. Geprüft werden die in Kapitel 1 genannten Geräte, die in Kapitel 2.2 genauer beschrieben werden. Der Prüfstand wurde so konzipiert, dass er möglichst viele Anforderungen erfüllen kann; somit deckt er einen sehr grossen Bereich von möglichen Luftzuständen ab.

Luftkonditionen	Aussenluft	Abluft
Temperatur [°C]	ca. -12 bis +21	20 bis 26
Feuchtigkeit [% r.F.]	70 bis 80	30 bis 60
Volumenstrom [m ³ /h]	50 bis ca. 1200	50 bis 1200

Tabelle 2.1.: Mögliche Betriebsbereiche des Prüfstands (Furter et al., 2005)

Die Aussenluft und die Abluft werden in separaten Luftaufbereitungsgeräten, auch Monoblöcke genannt. Wie man in Abbildung 2.1 sehen kann, unterscheiden sich die beiden Monoblöcke nur gering. Der grösste Unterschied liegt darin, dass bei der Aussenluftaufbereitung ein zweiter Nachkühler (NK) parallel installiert wird. Dieser ist erforderlich durch die tiefen Temperaturen, die den NK zum Einfrieren bringen können. So werden die beiden NK abwechselnd verwendet, wobei die Klappen automatisch umgeschaltet werden, sobald eine zu grosse Vereisung mittels Druckdifferenz gemessen wird. Um den Nachkühler aufzutauen wird jeweils das Kühlwasser aufgeheizt. So kann die Aussenluftaufbereitung durchgehend funktionieren.

Aufgrund der verwendeten Monoblöcke gibt es einen Mindestvolumenstrom von ungefähr $800 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, der durch die Geräte strömen muss, um eine optimale Luftkonditionierung zu erreichen. Benötigt der Prüfling weniger als diesen Mindestvolumenstrom, wird der restliche Volumenstrom durch Bypässe zurückgeführt (Furter et al., 2005).

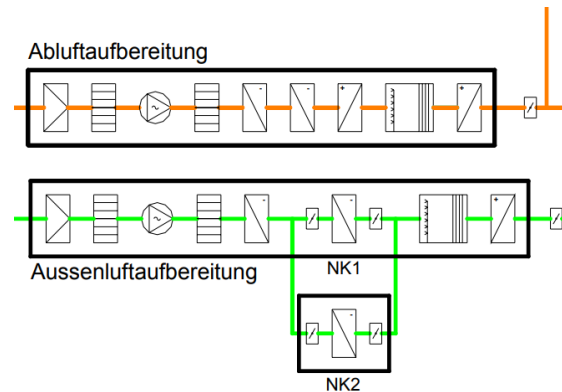


Abbildung 2.1.: Abluft- und Aussenluftaufbereitung (Furter et al., 2005)

2.2. Arten von Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung

Im Folgenden werden die wichtigsten Arten von Lüftungsgeräten zur Wärmerückgewinnung erläutert. Man unterscheidet dabei zwischen Wärmeübertragung mit und ohne Feuchterückgewinnung. Geräte mit Feuchterückgewinnung werden häufig auch Enthalpieübertrager genannt. Das Prinzip der Wärmeübertragung wird auch unterschieden. Bei Rekuperatoren wird die Wärme direkt übertragen, bei Regeneratoren wird diese über ein Zwischenmedium indirekt übertragen. Eine wichtige Kennzahl zur Klassifizierung der verschiedenen Lüftungsgeräte ist der Temperaturänderungsgrad. Er gibt den Anteil der übertragenen Wärme bei gleichen Zu- und Abluftvolumenströmen an.

2.2.1. Plattenwärmetauscher

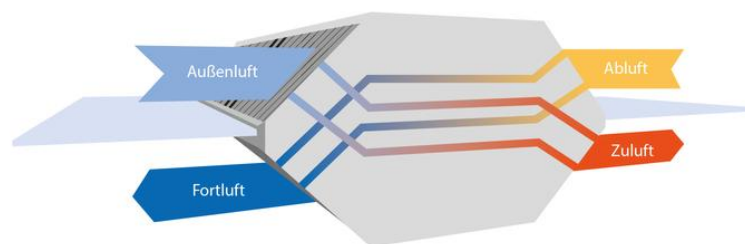


Abbildung 2.2.: Gegenstrom-Plattenwärmeübertrager (ZEWOTHERM, 2022)

Plattenwärmeübertrager sind sehr verbreitet. Sie werden typischerweise für kleine bis mittlere Volumenströme verwendet, je nach Ausführung. Kreuzstrom-Wärmeübertrager werden bei eher grösseren Anlagen verwendet, haben aber den Nachteil eines relativ kleinen Temperaturänderungsgrads zwischen 50 % und 77 %. Bei kleineren Volumenströmen wie beispielsweise in Kompaktlüftungsgeräten, die im Prüfstand geprüft werden, werden Gegenstrom-Wärmeübertrager verwendet. Bei einer Gegenstrom-Ausführung befindet sich der Temperaturänderungsgrad ein wenig höher, zwischen 70 % und 85 %. Gesteuert wird die Wärmeübertragung durch eine Bypass-Klappe entweder in AUL oder FOL. Bei Verwendung von Membranen anstatt von undurchlässigen Materialien sind auch Platten-Enthalpieübertrager, die auch Feuchte übertragen, möglich (BELIMO, 2021).

2.2.2. Rotationswärmetauscher

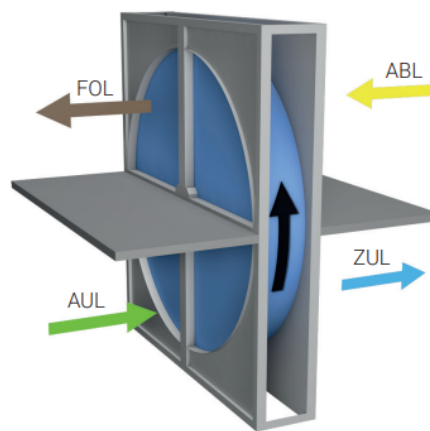


Abbildung 2.3.: Rotationswärmeübertrager (BELIMO, 2021)

Rotationswärmeübertrager werden bei kleinen bis sehr grossen Volumenströmen eingesetzt und haben einen Temperaturänderungsgrad zwischen 70 % und 90 %. Sie funktionieren indem ein Rad mit einer Speichermasse konstant rotiert. Die Wärme wird dabei in der Ablufthälfte aufgenommen und in der Zuluft Hälfte abgegeben. Die Wärmeübertragung wird gesteuert durch die Rotationsgeschwindigkeit der Speichermasse. Ein Nachteil der Rotationswärmetauscher ist, dass ZUL und ABL nicht fest voneinander getrennt sind. So ist es möglich, dass verschmutzte Abluft in die Zuluft gelangen kann. Auch bei Rotationswärmetauschern ist es möglich, mit Beschichtungen der Speichermasse einen Rotations-Enthalpiewärmeübertrager herzustellen.

2.2.3. Abluftwärmepumpen

Eine Abluftwärmepumpe gewinnt Wärme aus der Abluft. Es wird Kältemittel verwendet, dass schon bei tiefen Temperaturen im Verdampfer verdampft. Der entstandene Dampf wird danach im Verdichter komprimiert und erhitzt sich so weiter. Diese Wärme gibt

das Kältemittel dann im zweiten Wärmetauscher, dem Verflüssiger ab, und verflüssigt sich wieder. Zum Schluss wird der restliche Druck durch ein Expansionsventil entspannt. Der Vorteil einer Abluftwärmepumpe gegenüber einer klassischen Wärmepumpe liegt darin, dass die Abluft besonders im Winter viel wärmer als die Aussenluft ist, was zu einer höheren Effizienz führt. Gegen den Einsatz einer Abluftwärmepumpe spricht jedoch, dass Abluft im Gegensatz zur Aussenluft nur begrenzt verfügbar ist.

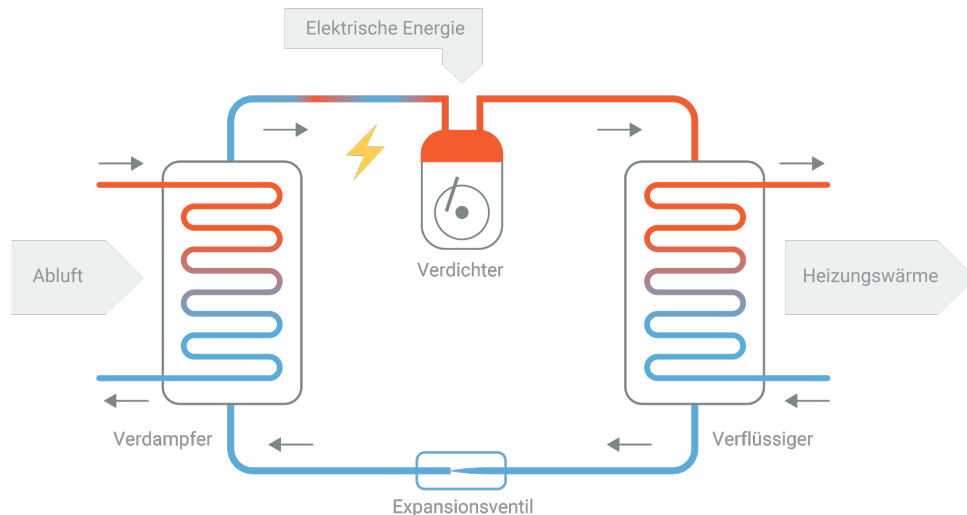


Abbildung 2.4.: Funktionsweise einer Abluftwärmepumpe (Nguyen, 2020)

2.3. Normen

Die meisten Prüfungen, die am Prüfstand vorgenommen werden, basieren auf den Europäischen Normen EN 13141-7:2010 (Europäisches Komitee für Normung, 2010) und EN 13141-8:2014 (Europäisches Komitee für Normung, 2014). Die Normen sehen Prüfungen an vier verschiedenen Betriebspunkten vor, von denen je nach Kategorie des Wärmetauschers einer oder mehrere geprüft werden. An jedem Prüfpunkt werden für die Abluft sowie die Aussenluft jeweils die Temperatur und die Feuchtkugelttemperatur vorgegeben. Daraus können die Anforderungen bezüglich möglicher Temperaturenbereichen abgeleitet werden. Wichtig für die Regelung des Prüfstands sind die zulässigen Abweichungen von den vorgegebenen Werten, die in 2.2 tabelliert sind. Diese werden jeweils mit einer Abweichung des Mittelwertes zur eingestellten Grösse sowie der Abweichung der Messwerte zur eingestellten Grösse. So ist auch ein periodisches Schwanken aufgrund der Regelung zulässig, solange es innerhalb der zulässigen Abweichungen liegt.

Um eine Prüfung durchzuführen, müssen vor Beginn der Messung alle Messgrößen eine Stunde lang ausgenommen der zulässigen Abweichungen konstant bleiben, ohne dass dabei Einstellungen verändert werden. Danach kann die Messung beginnen, wobei alle Messgrößen mindestens einmal alle 30 Sekunden aufgezeichnet werden müssen. Die

Messgrösse	Zulässige Abweichung der arithmetischen Mittelwerte	Zulässige Abweichung der einzelnen Messwerte
Trockenkugel	$\pm 0.3K$	$\pm 1K$
Feuchtkugel	$\pm 0.3K$	$\pm 1K$
Volumenstrom	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$

Tabelle 2.2.: Zulässige Abweichungen von den eingestellten Werten

Dauer einer Messung dauert im Anschluss danach mindestens 30 Minuten.

2.4. Hydraulische Schaltungen

In Luftkühlern oder -erhitzern sind wie in Abbildung 2.5 zu sehen verschiedene hydraulische Schaltungen möglich. Die wichtigsten Unterschiede bestehen darin, welche Grössen beim Betrieb der Schaltungen konstant bleiben. Bei einer Drossel- und einer Umlenkschaltung ist es die Eintrittstemperatur des Wassers in den Wärmetauscher, die konstant bleibt. Die Wärmeübertragung wird in diesen Schaltungen durch den Massenstrom, der durch den Wärmetauscher fliesst gesteuert. Im Gegensatz dazu bleibt bei einer Beimischschaltung oder einer Einspritzschaltung der Massenstrom konstant. Die Wärmeübertragung wird dann durch die Eintrittstemperatur des Wassers gesteuert. Die Auswahl einer geeigneten Schaltung hängt von den Anforderungen des Wärmeübertragers ab, aber auch von den Anforderungen des Erzeugers, also des Kältenetzes.

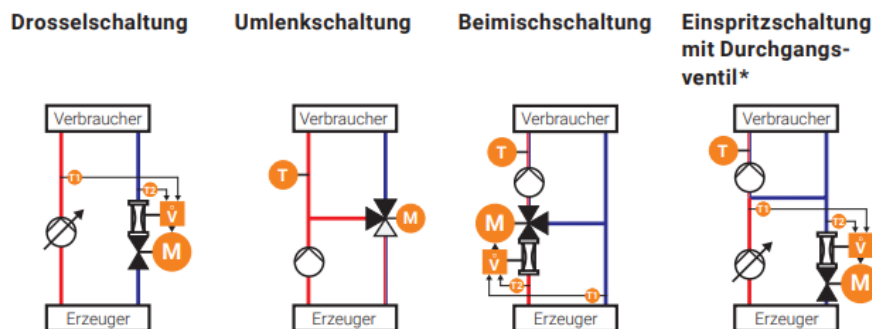


Abbildung 2.5.: Mögliche hydraulische Schaltungen (BELIMO, 2021)

2.4.1. Labornetz

Die Kälte wird im Labor von zwei Netzen mit verschiedenen Temperaturen bereitgestellt. Beide Netze bestehen jeweils aus einer Kältemaschine und einem Speicher, welche Kühlmittel über Leitungen im ganzen Labor verteilen. Das Kühlmittel ist in diesem Fall eine Mischung aus Wasser und Glykol, wobei das Glykol hinzugefügt wird um den Gefrierpunkt zu senken. In dieser Arbeit wird das Gemisch der Einfachheit halber Wasser genannt und der Index w verwendet.

3. Methode

3.1. Herangehensweise

Weil die Luftkonditionierung aus vielen verschiedenen Teilen besteht, wird bei dieser Arbeit darauf gearbeitet, dass zuerst einzelne Komponenten modelliert werden und diese dann mit weiteren ergänzt und verknüpft werden. Als Anfang wurde dabei der Vorkühler (VK) AUL gewählt. Zum Modellieren der Komponenten wird MATLAB Simulink verwendet.

3.2. Vorkühler Aussenluft

Der VK AUL besteht aus einem Kältereiger, das mit dem Labornetz verbunden ist. Geregelt wird die Wärmeübertragung durch eine Drosselschaltung (siehe Abbildung 2.4) mit einer Pumpe und einem regelnden Ventil. Die Abbildung 3.1 zeigt die schematische Darstellung des VK AUL, wie sie im Steuerungsprogramm des Prüfstands zu sehen ist.

Da der Prüfstand regelmässig gebraucht wird um Geräte zu prüfen, kann kein neuer Regler an diesem ausgetestet werden. Aus diesem Grund werden Versuche und Messungen an der Umweltsimulationskammer (USK) im Labor durchgeführt. Die USK wurde ursprünglich für einen anderen Versuch erbaut. Sie eignet sich aber perfekt für die Messungen dieser Arbeit. Dank einem verbauten Wärmetauscher mit sehr vielen vorinstallierten Sensoren ist es möglich, alle wichtigen Daten aufzuzeichnen. Trotzdem ist die USK nicht identisch zum VK AUL, deshalb werden parallel zwei verschiedene Modelle erstellt. Die beiden Modelle basieren auf den gleichen Prinzipien, und es werden die selben Subsysteme verwendet. Der Hauptunterschied sind andere Parameter. Die USK wird in Kapitel 3.3 genauer beschrieben.

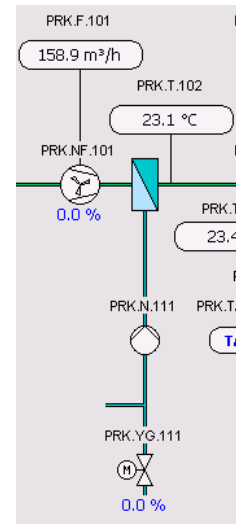


Abbildung 3.1.

3.3. Umweltsimulationskammer

Die Umweltsimulationskammer wurde im Labor ursprünglich im Rahmen der Masterarbeit von Michael Näf erbaut. Wie der Prüfstand ist sie auch an das Labornetz angeschlossen und besteht im Wesentlichen aus einem Wärmetauscher und einer Kammer. Der Vorteil der USK für diese Arbeit ist, dass schon sehr viele Sensoren verbaut sind und so bedeutend mehr Daten als beim Prüfstand aufgezeichnet werden können. Ebenfalls wichtig ist, dass sehr viele Grössen manuell eingestellt werden können. Die wichtigsten

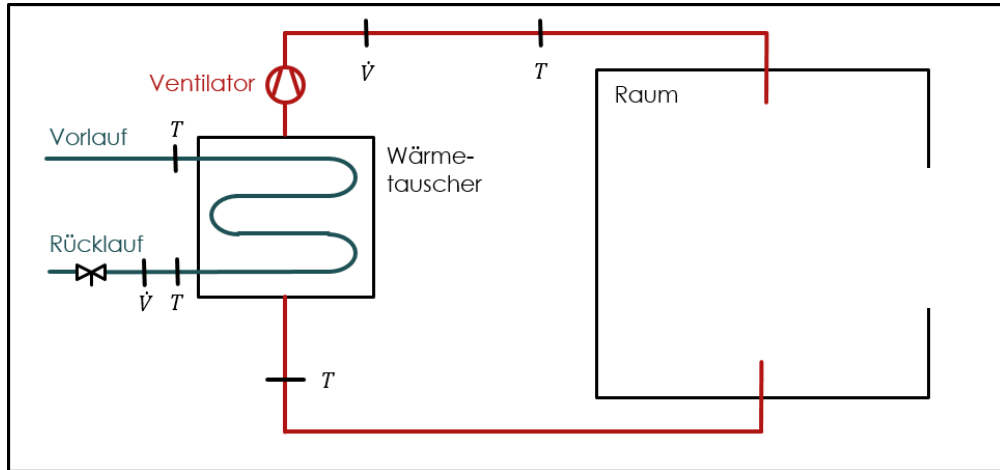


Abbildung 3.2.: Schema der Umweltsimulationskammer

Messgrößen für diese Arbeit sind im Schema in Abbildung 3.2 eingezeichnet. Die USK wird in zwei Teilen dieser Arbeit genutzt. Im ersten Teil werden an ihr Messungen für die Validierung der Modelle durchgeführt. Für diesen Teil wird die USK von einer Simatic-Steuerung gesteuert und die Messdaten der Sensoren werden über einen Datenlogger aufgezeichnet. Im zweiten Teil wird dann der gebildete Regler getestet. Für diesen Teil werden die benötigten Sensoren an eine Beckhoff-Steuerung angeschlossen, auf welcher der Regler in TwinCAT implementiert ist.

3.4. Subsysteme

3.4.1. Modell einer Zelle

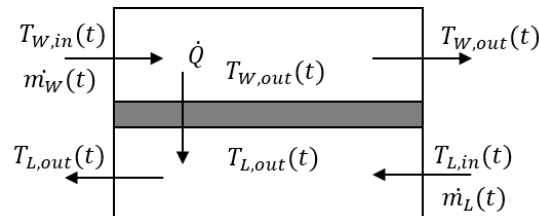


Abbildung 3.3.: Schema einer Zelle

Ein Kühlregister ist nichts anderes als ein Luft-Wasser-Wärmetauscher im Gegenstromprinzip. Ein Modell für diese Art von Wärmetauscher wurde nach dem Beispiel von Degunda, 2010 und Guzella, 2021 erstellt. Wichtig ist dabei, dass die Massen m_W , m_L und auch die spezifischen Wärmekapazitäten c_W und c_L als konstant angenommen werden. Weiter wird auch vorausgesetzt, dass die Massenströme am Ein- und Ausgang gleich gross sind.

In der Modellierung des Wärmetauschers wird dieser in mehrere Zellen unterteilt. Wie in der Abbildung 3.3 zu sehen ist besteht eine Zelle aus zwei Kammern, zwischen welchen eine Wärmeübertragung $\dot{Q}$ stattfindet. Innerhalb einer Kammer wird die Temperatur von Wasser und Luft als konstant angenommen. Das Verhalten dieser Zellen wird durch drei Gleichungen beschrieben. Das sind die beiden Energiebalancen für die Wasserseite (3.4.1) und für die Luftseite (3.4.1).

$$\frac{d}{dt}U_W = m_W \cdot c_W \cdot \frac{dT_{W,out}}{dt} = \dot{m}_W \cdot c_W \cdot (T_{W,in}(t) - T_{W,out}(t)) - \dot{Q}(t) \quad (3.1)$$

$$\frac{d}{dt}U_L = m_L \cdot c_L \cdot \frac{dT_{L,out}}{dt} = \dot{m}_L \cdot c_L \cdot (T_{L,in}(t) - T_{L,out}(t)) + \dot{Q}(t) \quad (3.2)$$

Verbunden werden sie durch die Wärmeübertragungsgleichung

$$\dot{Q}(t) = k \cdot A \cdot (T_{W,out}(t) - T_{L,out}(t)) \quad (3.3)$$

Aus mehreren solcher Zellen entsteht ein Modell des gesamten Wärmetauschers. Die Anzahl Zellen, die verwendet werden müssen, um das Verhalten des Wärmetauschers am besten nachzubilden, ist am besten experimentell zu bestimmen. Als Ansatz wurden in dieser Arbeit drei Zellen pro Wärmetauscher verwendet. Dies ergab bei späteren Messungen eine zufriedenstellende Genauigkeit.

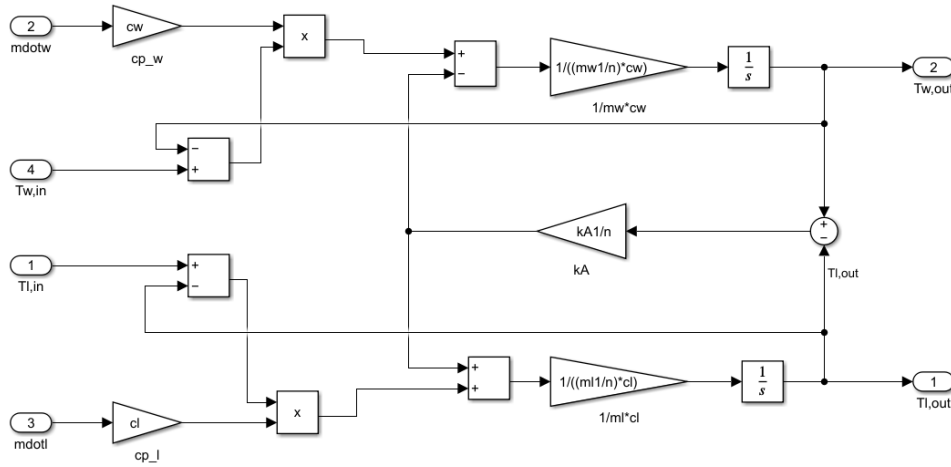


Abbildung 3.4.: Implementierung einer Zelle in Simulink als Subsystem

Diese Differenzialgleichungen werden in Simulink als Subsystem implementiert, wie in Diagramm 3.4 zu sehen ist. Dort kann man auch erkennen, dass die Massen von Wasser und Luft im Wärmetauscher massgebend sind für das dynamische Verhalten des Wärmetauschers. Der Faktor kA ist dagegen massgebend für das statische Verhalten. Da

mehrere Zellen für einen Wärmetauscher verwendet werden, müssen die Massen m_W und m_L sowie die Fläche A durch die Anzahl Zellen n dividiert werden.

Die Verwendung dieses Modells hat auch Nachteile. Einer davon ist, dass die Luft wie das Wasser auch als inkompressibel angesehen wird. Ein weiterer Nachteil liegt auch darin, dass die Masse des Wärmetauschers selbst und damit auch seine Wärmekapazität vernachlässigt wird. Damit die Zeitkonstante des Modells trotzdem mit dem realen System vergleichbar ist, werden die Massen von Wasser und Luft im Wärmetauscher leicht erhöht.

3.4.2. Modell Ventil

Um die Zeitkonstante des Ventils abzubilden, wird es als PT1-Glied mit Sättigung modelliert (MathWorks, 2022). Mit einer Verstärkung von 1 und der Zeitkonstante T ergibt das die Übertragungsfunktion:

$$G(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (3.4)$$

Zusätzlich zur Zeitkonstante wird für den Prüfstand auch die Ventilkennlinie berücksichtigt. Diese wird aus dem Datenblatt in eine Lookup Table übertragen, welche dann im gleichnamigen Simulink-Block verwendet wird.

3.4.3. Modell Wärmetauscher

Das Modell des Wärmetauschers entsteht durch die Verknüpfung mehrerer Zellen. In diesem Fall wurden mit drei Zellen pro Wärmetauscher ein gutes Modell erreicht. Im VK AUL sowie auch in der USK sind Wärmetauscher im Gegenstromprinzip verbaut, wie man in Abbildung 3.5 sieht. Im oberen Teil fließt das Wasser von rechts nach links, im unteren Teil die Luft in die andere Richtung. Zwischen den Zellen wird mit einer variablen Totzeit die Fließgeschwindigkeit des Wassers in den Rohren berücksichtigt. Die Totzeit wird in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit berechnet, welche wiederum vom Massenstrom abhängt. Damit keine unendliche Totzeit vorkommt, wird zusätzlich noch eine Begrenzung mithilfe eines Sättigungsblocks eingebaut.

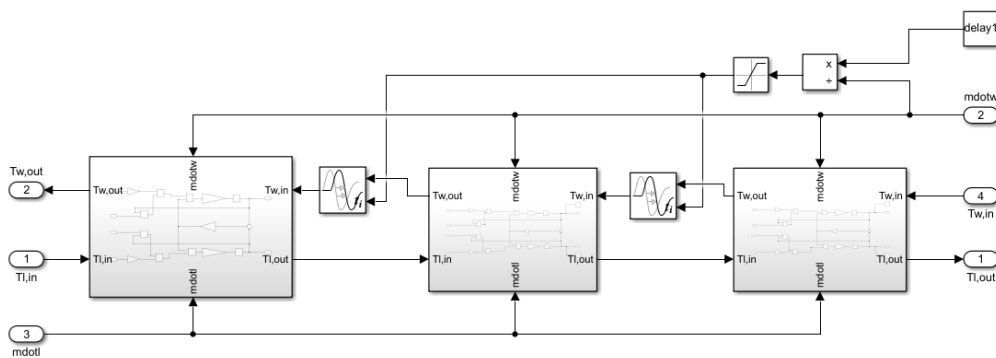


Abbildung 3.5.: Implementierung des Wärmetauschers in Simulink

Das Modell für den gesamten VK AUL setzt sich zusammen aus den in Kapitel 3.4 genannten Komponenten. Um das Arbeiten mit dem Modell zu erleichtern sind alle Parameter in Variablen, die in einem Matlab-Skript geändert werden können.

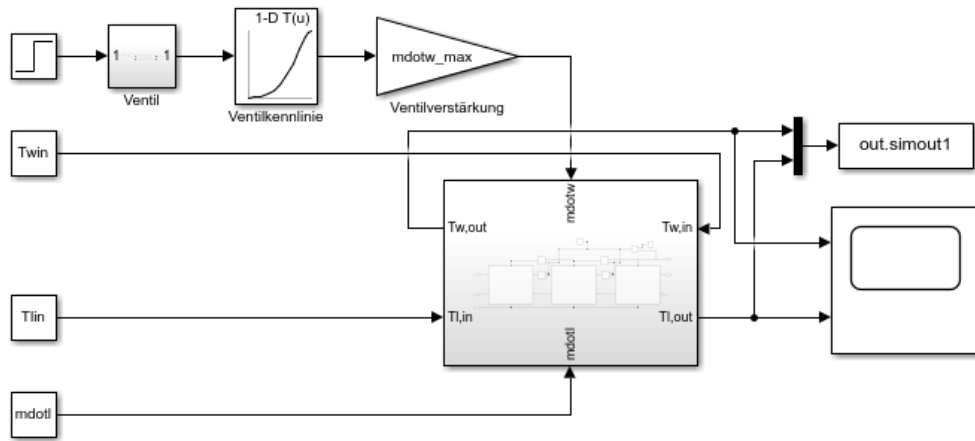


Abbildung 3.6.: Simulink-Modell vom VK AUL

3.5.1. Bestimmung der Parameter VK AUL

Die in den Modellen verwendeten Parameter gehen von den Datenblättern aus und werden dann angepasst, so dass das Modell die Messergebnisse am besten nachbildet. Die Grössen, die beim VK AUL gemessen werden können, sind dabei auf die bereits eingebauten Sensoren beschränkt. Wie man in Abbildung 3.7 sehen kann, wird das Verhalten der Sprungantwort vom Modell gut nachgebildet. Gemessen wurde beim VK AUL nur eine Sprungantwort, bei der das Ventil voll geöffnet wird. Weniger gut ist das Modell bei einem Sprung in die andere Richtung, also wenn das Ventil geschlossen wird. Weil das Modell keine Verluste berücksichtigt, verhält es sich wie Perfekt isoliert und wärmt sich so nur sehr langsam auf. Da dies aber keinen Einfluss auf die Regelung hat, wird das so hingenommen.

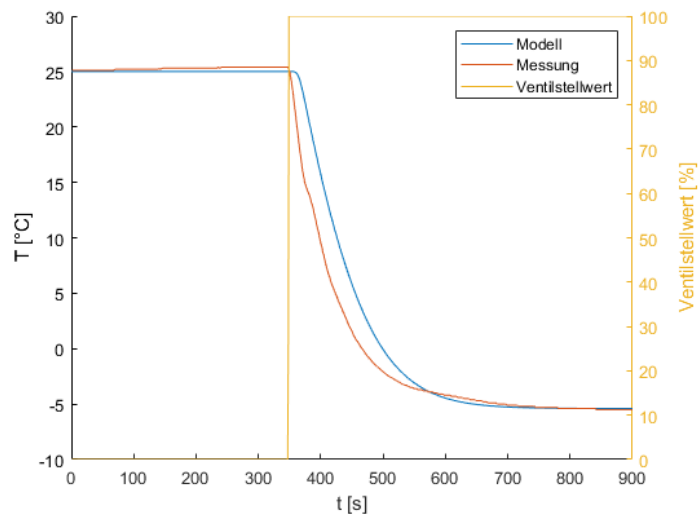


Abbildung 3.7.: Vergleich der Sprungantworten von Modell und Messung

3.6. Modell USK

Das Modell der USK unterscheidet sich nicht stark von dem des Prüfstandes. Der grösste Unterschied liegt darin, dass in der USK zwei Wärmetauscher in Serie geschaltet sind. Die beiden Wärmetauscher im Gegenstromprinzip werden in diesem Modell durch zwei subsysteme Wärmetauscher (3.4.3) mit je drei Zellen modelliert. Die beiden in Serie geschalteten Wärmetauscher sind unterschiedlich gross, deshalb unterscheiden sich auch ihre jeweiligen Parameter.

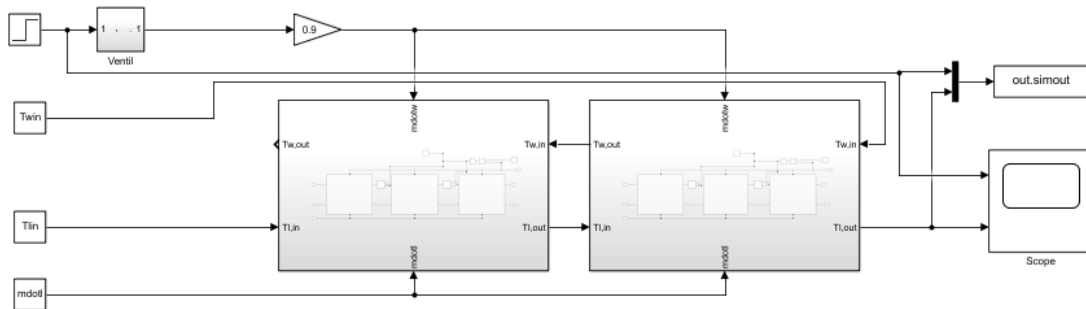


Abbildung 3.8.: Simulink-Modell der USK

3.6.1. Messung

Auch um das Modell der USK zu validieren wurden verschiedene Messungen durchgeführt. Dabei wird jeweils entweder der Massenstrom auf der Luftseite oder der Massenstrom

auf der Wasserseite verändert, alle anderen Größen werden so konstant wie möglich gehalten. Die vollständigen Messdaten befinden sich im Anhang. Wichtig anzumerken ist, dass man in Abbildung 3.9a erkennen kann, dass eine Änderung im Volumenstrom des Wassers ab etwa der Hälfte des maximalen Volumenstroms fast keinen Einfluss auf die Temperatur der Luft hat. Dies deutet darauf hin, dass das Ventil überdimensioniert ist.

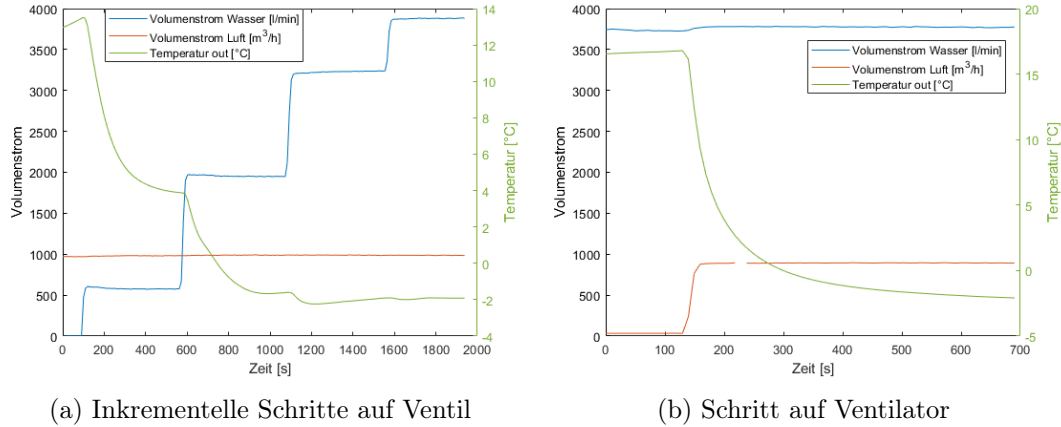


Abbildung 3.9.: Messungen an der USK

3.6.2. Bestimmung der Parameter USK

Die Parameter werden nach demselben Vorgehen wie in Abschnitt 3.5.1 bestimmt. Bei diesem Modell kommt die Schwierigkeit dazu, dass Parameter für beide Wärmetauscher gefunden werden müssen. Weil der Zustand von Wasser und Luft zwischen den beiden Wärmetauschern unbekannt ist, müssen einige Annahmen getroffen werden. Da das Verhältnis der Größen der beiden Wärmetauscher hingegen bekannt ist, wird angenommen, dass die grössenabhängigen Parameter etwa im selben Verhältnis zueinander stehen. Die bestimmten Parameter können dem Matlab-Skript im Anhang entnommen werden.

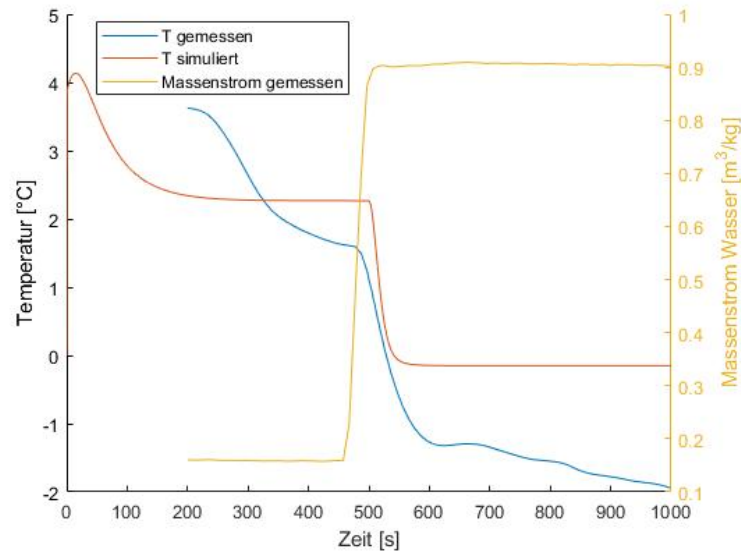


Abbildung 3.10.: Vergleich von Simulation und Modell USK

3.7. Regelung

3.7.1. Ansatz

Da in der Lüftungs- und Gebäudetechnik sehr häufig PI-Regler verwendet werden, wird auch in dieser Arbeit der Ansatz eines PI-Reglers verwendet. Das Problem bei der Temperaturregelung über eine Drosselschaltung (2.4) ist, dass Wassermassenstrom stark variabel ist. Aus diesem Grund wird in diesem Ansatz auch Gain Scheduling verwendet, um mit den verschiedenen Massenströmen zurechtzukommen. Das bedeutet, dass verschiedene Sets von Regelparametern bestimmt werden, die jeweils in einem Teil des gesamten Betriebsbereichs für die Regelung verwendet werden. Konkret sind diese Bereiche definiert von der Öffnung des Regelventils und dem Massenstrom auf der Luftseite.

Das Bestimmen der Regelparameter in einem PI-Regler mithilfe von verschiedenen Methoden gemacht werden. In dieser Arbeit werden die Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick verwendet. Diese Einstellregeln gelten als eine Weiterentwicklung des klassischen Verfahrens nach Ziegler und Nichols. Sie haben den Vorteil, dass sie unterteilt sind in optimiertes Störungsverhalten oder optimiertes Führungsverhalten (Wikipedia, 2022).

Um die Regelparameter K_P und T_N zu bestimmen, braucht man drei Werte, die aus einer Sprungantwort abzulesen sind, wie in 3.11 abgebildet. Diese Werte sind die statische Verstärkung K_S , die Verzugszeit T_U und die Ausgleichszeit T_G . Anhand von diesen Werten werden die Regelparameter nach der Tabelle in 3.12 berechnet.

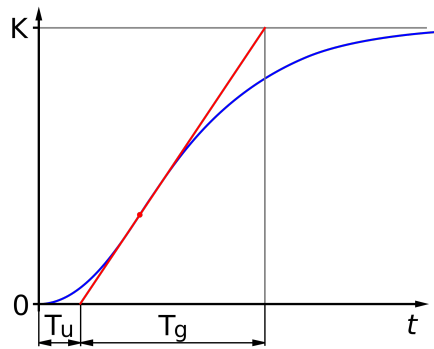


Abbildung 3.11.: Sprungantwort mit abzulesenden Werten

Regler		Aperiodischer Regelverlauf		Regelverlauf mit 20 % Überschwingen	
		Störung	Führung	Störung	Führung
P	K_p	$0,3 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0,3 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0,7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0,7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$
PI	K_p	$0,6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0,35 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0,7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0,6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$
	T_n	$4 \cdot T_u$	$1,2 \cdot T_g$	$2,3 \cdot T_u$	$1 \cdot T_g$
PID	K_p	$0,95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0,6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$1,2 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0,95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$
	T_n	$2,4 \cdot T_u$	$1 \cdot T_g$	$2 \cdot T_u$	$1,35 \cdot T_g$
	T_v	$0,42 \cdot T_u$	$0,5 \cdot T_u$	$0,42 \cdot T_u$	$0,47 \cdot T_u$

Abbildung 3.12.: Tabelle nach Chien, Hrones und Reswick (Wikipedia, 2022)

3.7.2. Bestimmung Regelparameter

Wie in 3.7.1 beschrieben wird der gesamte Betriebsbereich des Wärmetauschers in verschiedene Teile unterteilt. Dies wird gemacht, indem das Ventil in kleinen Schritten geöffnet wird, wobei bei jeder Sprungantwort die Werte abgelesen werden können, die für das Verfahren nach Chien, Hrones und Reswick benötigt werden. In Abbildung 3.13 sind diese schrittweisen Öffnungen dargestellt, zusammen mit den Sprungantworten der Lufttemperatur für verschiedene Luftmassenströme. Dort kann man auch bereits erkennen, dass sich die Schrittantworten stark verändern über dem Öffnungsbereich des Ventils.

Da es für diesen Ansatz für den VK AUL 30 verschiedene Sets von Regelparametern gibt, wird ein Matlab-Skript für die automatische Erkennung von K_S , T_U und T_G geschrieben. Das Bestimmen der statischen Verstärkung K_S ist dabei der einfachste Teil. Es wird die Differenz der Temperatur vor dem Schritt und der Temperatur im statischen Zustand, also am Ende der Simulation gebildet, welche dann durch die Schrittgröße geteilt wird. In diesem System sind alle Verstärkungen negativ, weil eine Öffnung des Ventils eine Senkung der Temperatur bewirkt.

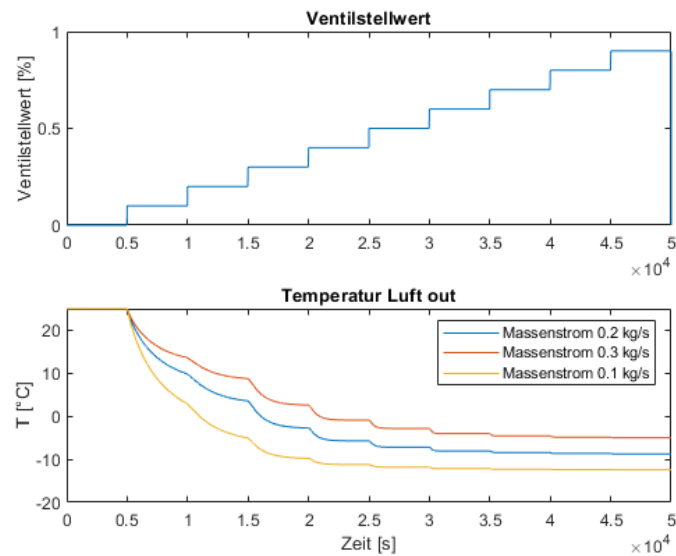


Abbildung 3.13.: Schrittweise Öffnung des Ventils

Erkennen der Wendetangente

Schwieriger ist die genaue Bestimmung von Verzugszeit T_U und Ausgleichszeit T_G , welche beide von der Wendetangente der Sprungantwort abhängen. Simulink arbeitet mit diskreten Werten, folglich kann die Wendetangente nicht einfach durch die erste und zweite Ableitung bestimmt werden. Natürlich könnten Ableitungen bei diskreten Werten durch Differenzen approximiert werden, diese sind aber sehr anfällig auf Rauschen und Numerische Ungenauigkeiten. Deshalb wird die Wendetangente, welche nichts anderes ist als die Tangente mit der betragsmässig grössten Steigung, mit der Hilfe von linearer Regression bestimmt. Dafür werden Regressionsgeraden für kleine überschneidende Bereiche berechnet. Wenn die Schar von Regressionsgeraden berechnet ist, wird am Schluss die steilste davon ausgewählt. Das vorgehen ist in Abbildung 3.14 veranschaulicht. Die Schar von Tangenten ist Schwarz gestrichelt, die Wendetangenete die schlussendlich verwendet wird ist Rot.

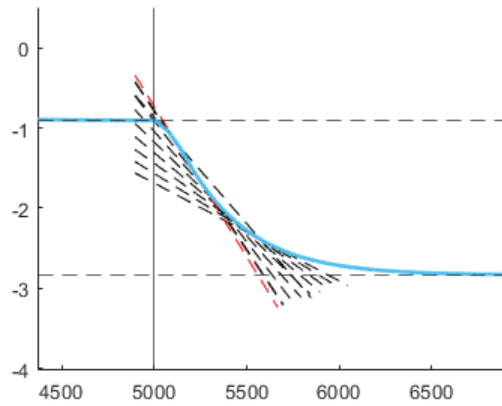


Abbildung 3.14.: Algorithmus zum bestimmen der Wendetangente

Berechnen von T_U und T_G

So bald die Wendetangente bestimmt ist, ist das Berechnen von T_U und T_G einfach. Dazu werden die Schnittpunkte der Wendetangente mit den stationären Werten berechnet. Aus der Differenz der Zeitwerte der beiden Schnittpunkte kann dann die Ausgleichszeit T_G berechnet werden. Die Verzugszeit T_U wird dann durch die Differenz der Zeitwerte des ersten Schnittpunktes und der Zeit des Schritts berechnet.

Dieses Prinzip des Bestimmens der Parameter der Schrittantwort wird mit Hilfe einer Schleife im Matlab-Skript für alle Schritte und Luftmassenströme durchgeführt. In den beiden Abbildungen in 3.7.2 sind alle Schritte für jeweils einen Massenstrom zu sehen. In diesen Abbildungen kann man auch sehen, dass für das Modell USK nur drei Parametersets pro Massenstrom berechnet werden. Dies ist so gewählt, weil die Out-Temperatur der Luft bei einer Ventilstellung grösser als 30 % kaum noch beeinflusst wird.

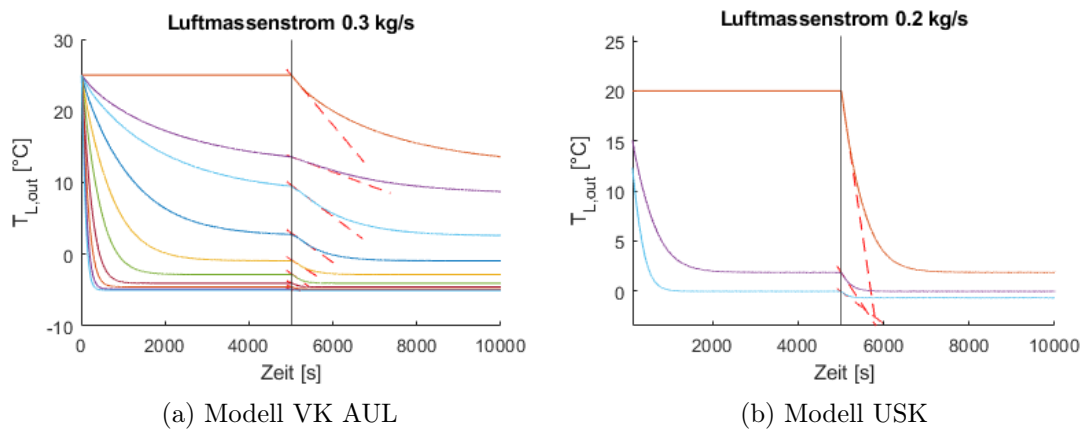


Abbildung 3.15.: Alle Schritte mit Wendetangenten

4. Resultate

4.1. Bestimmung der Regelparameter

Im ersten Abschnitt der Resultate wird auf die aus den Modellen berechneten Regelparameter eingegangen. Berechnet werden sie der Tabelle 3.12. Um die Regelung so schwingungsfrei wie möglich zu halten werden die Parameter für einen aperiodischen Regelungsverlauf verwendet. Aus der Tabelle ergeben sich die Berechnungen der Regelparameter für ein verbessertes Führungsverhalten.

$$K_P = 0.35 \cdot \frac{T_G}{T_U \cdot K_S} \qquad T_N = 1.2 \cdot T_G \qquad (4.1)$$

4.1.1. Parameter VK AUL

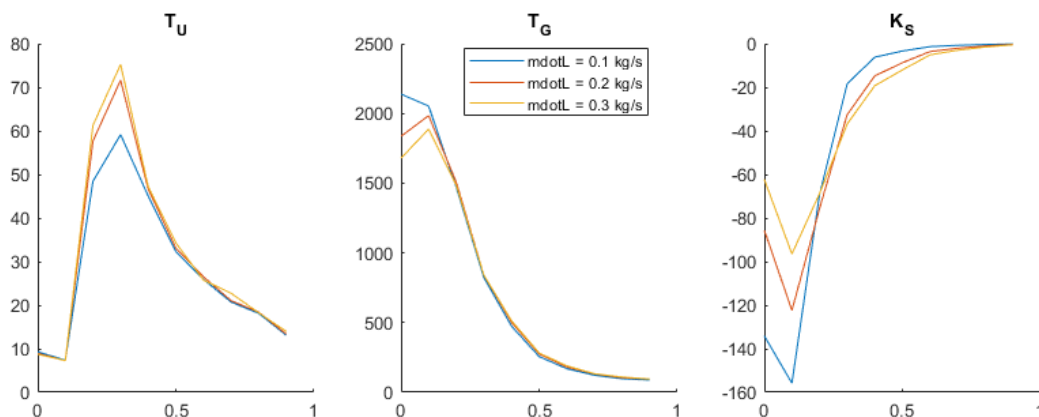


Abbildung 4.1.: Abgelesene Parameter am VK AUL in Abhängigkeit der Ventilposition

In Abbildung 4.1 kann man sehen, dass die abgelesenen Größen jeweils asymptotisch verlaufen. Einzig für kleine Ventilöffnungen entsprechen die Größen nicht den erwarteten. Besonders bei den ersten beiden Werten von K_S und T_U kann man eine Unregelmässigkeit sehen. Diese Unregelmässigkeit kann verschiedene Ursachen haben, kann aber leider nicht abschliessend erklärt werden. Die Regelparameter werden anschliessend nach den Formeln in 4.1 berechnet. Wie man in 4.2 sehen kann, wirken sich die Unregelmässigkeiten in den ersten zwei Positionen auch auf die Regelparameter aus.

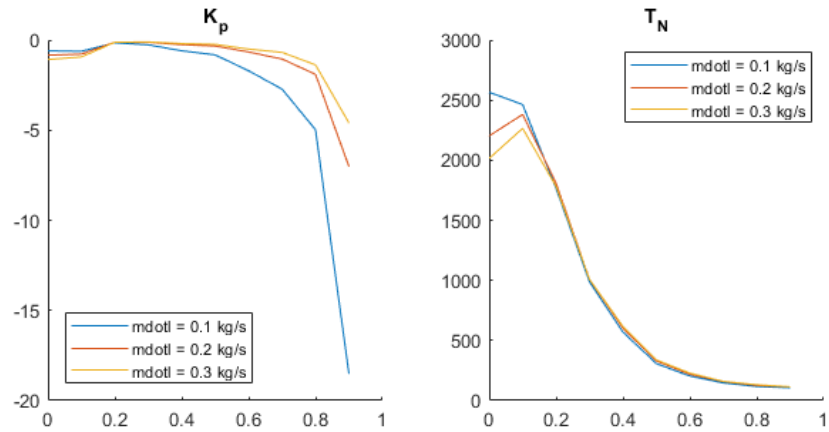


Abbildung 4.2.: Regelparameter für den VK AUL in Abhängigkeit der Ventilposition

4.1.2. Parameter USK

Die Ausgleichszeit T_G der abgelesenen Parameter der USK folgt einem klaren Trend, wie auch die stationäre Verstärkung K_S . Bei der Verzugszeit T_U kann man dies nicht feststellen, allerdings sind alle Werte sehr nahe beieinander. Wie in 3.7.2 schon erwähnt werden für die USK aufgrund des Ventils nur jeweils drei Parametersets pro Massenstrom berechnet. Da der maximale Massenstrom auf der Luftseite in der USK geringer ist als beim Prüfstand, werden hier nur zwei verschiedene Massenströme angeschaut, die den ganzen Bereich abdecken.

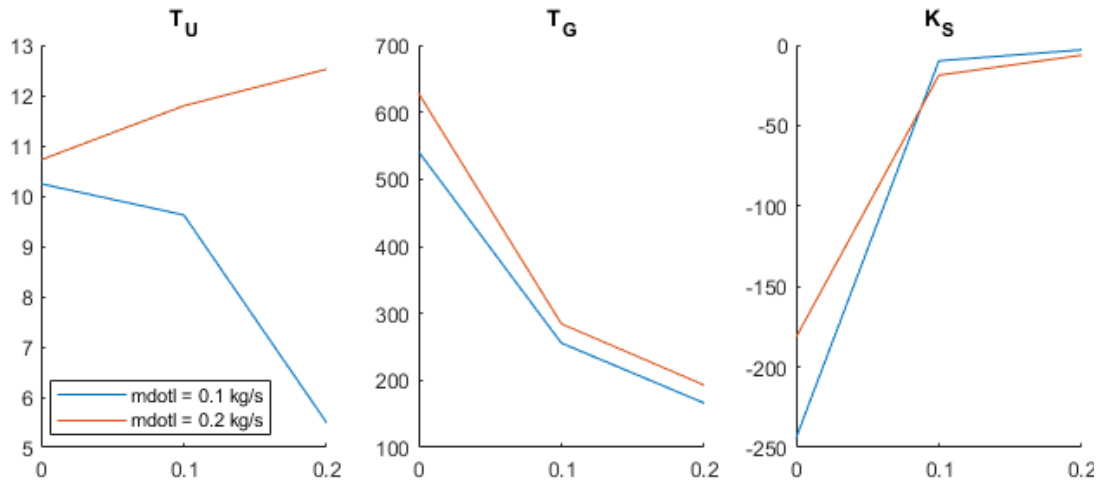


Abbildung 4.3.: Abgelesene Parameter der USK in Abhängigkeit der Ventilposition

Wenn die abgelesenen Parameter in die Formeln aus 4.1 eingesetzt werden, erhält man wiederum die Regelparameter. Diese sind in der Abbildung 4.4 ebenfalls in Abhängigkeit der Ventilposition aufgezeichnet.

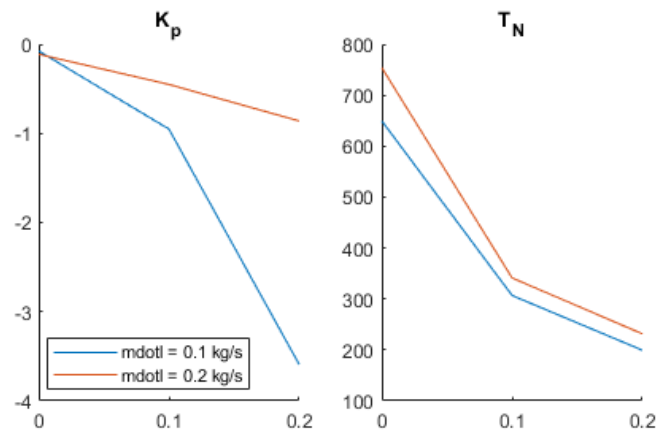


Abbildung 4.4.: Regelparameter für der USK in Abhängigkeit der Ventilposition

Hier kann man wieder einen klaren Trend bei der Nachstellzeit erkennen. Für die Verstärkung K_P wird erwartet dass sie betragsmässig kleiner ist bei einem grösseren Massenstrom. Trotzdem wird sie stark von der Ungenauigkeit von T_U beeinflusst und wird dem entsprechend nicht optimal sein. Da diese Einstellregeln aber sowieso nur als Ausgangspunkt von Regelparametern anzusehen sind, wird mit diesen errechneten Regelparametern fortgefahren.

4.2. Funktion der Regler

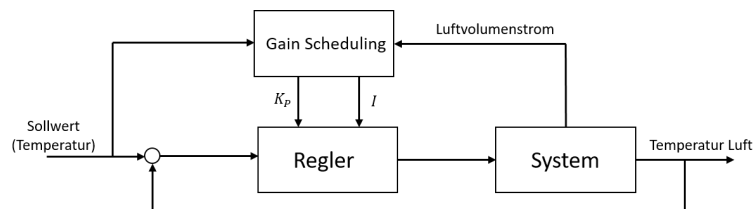


Abbildung 4.5.: Schema der Funktionsweise des Reglers

Das Schema des Reglers ist in Abbildung 4.5 aufgezeigt. Es wäre auch möglich, die Rückführgrösse als Input ins Gain Scheduling zu wählen. Da so aber Eine Schleufe entsteht, wird der Sollwert für die Bestimmung der Regelparameter verwendet. Ein wichtiger Teil des Reglers ist auch das Anti-windup und die output-Begrenzung. Das Anti-windup tritt ein wenn der Reglerausgang die output-Begrenzung erreicht. Wenn das der Fall ist, wird durch das clamping der Integrator angehalten und dieser integriert erst weiter, wenn das Vorzeichen des Reglereingangs wechselt.

4.2.1. Regler VK AUL

Der Aufbau des Gain Scheduling in Simulink ist in Abbildung 4.6 zu sehen. Es gibt sechs Lookup Tables, jeweils 3 pro Regelparameter. In diesen Lookup Tables wird der zum Sollwert passende Regelparameter ausgegeben. Die Lookup Table schaut in einer eindimensionalen Tabelle nach, in welchem Temperaturbereich sich der Sollwert befindet. Diese Temperaturbereiche werden durch die am Amfag gemessenen Sprungantworten bestimmt. Mit einem Multiport Switch wird anschliessend derjenige Regelparameter weitergegeben, welcher auch zum Luftmassenstrom passt.

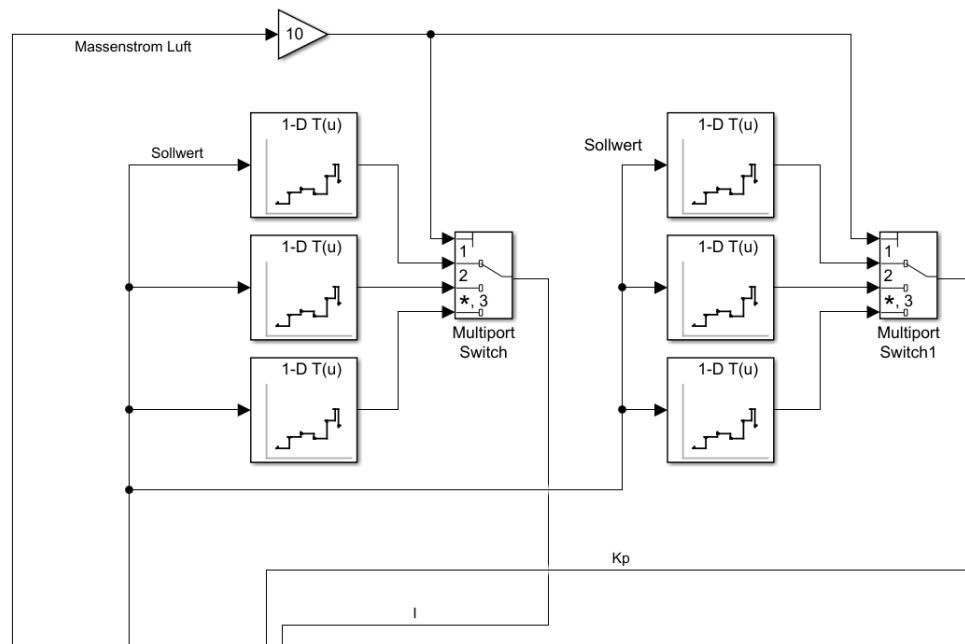
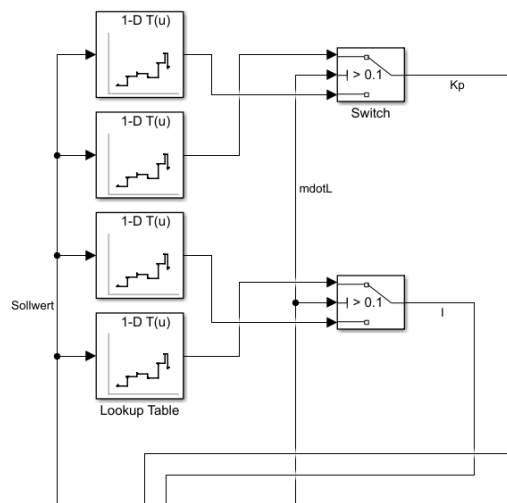


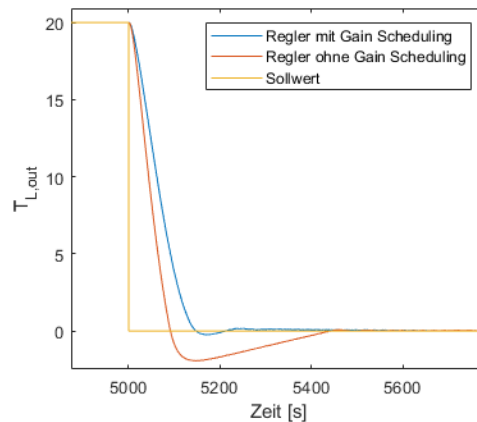
Abbildung 4.6.: Implementierung Gain Scheduling in Simulink

4.2.2. Regler USK

Die genaue Implementierung des Gain Scheduling für die USK ist in Abbildung 4.7a zu sehen. Es gibt hier vier Lookup Tables, eine für jeden Regelparameter (K_P und I) und Luftmassenstrom. In der Abbildung 4.7b ist der Unterschied von einem Regler mit Gain Scheduling zu einem Regler ohne Gain Scheduling dargestellt. Man kann darin gut erkennen, dass das Gain Scheduling ein Überspringen fast vermeiden kann.



(a) Implementierung Gain Scheduling in Simulink



(b) Vergleich mit/ohne Gain Scheduling

Abbildung 4.7.

4.3. Testen des Reglers der Umweltsimulationskammer

Zum Abschluss der Arbeit soll der Regler an der USK getestet werden. Dazu werden die benötigten Sensoren sowie das Ventil an eine Beckhoff SPS angeschlossen.

4.3.1. Implementierung des Reglers

Die Implementierung des Reglers auf der SPS wird in TwinCAT mit der Hilfe von Standardblöcken gemacht. Es wird ein einfacher PID ohne Gain Scheduling verwendet, die Auswahl der Reglerparameter erfolgt manuell. Die Reglerparameter können dabei auf einer grafischen Oberfläche verändert werden. Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgt ebenfalls direkt auf der SPS.

4.3.2. Ergebnisse Reglertest

In Abbildung 4.8 kann man die Antwort des Reglers auf einen Sollwertsprung sehen. Es fällt auf, dass die Temperatur und der Ventilstellwert in beiden Fällen sehr stark schwingen. Das wurde im Modell so nicht vorhergesagt, kann aber erklärt werden (siehe 4.3). In Abbildung 4.9 wird die selbe Messung abgebildet, hier kann man aber noch den gemessenen Volumenstrom sehen. Dieser schwingt auch, hat jedoch eine Phasenverschiebung.

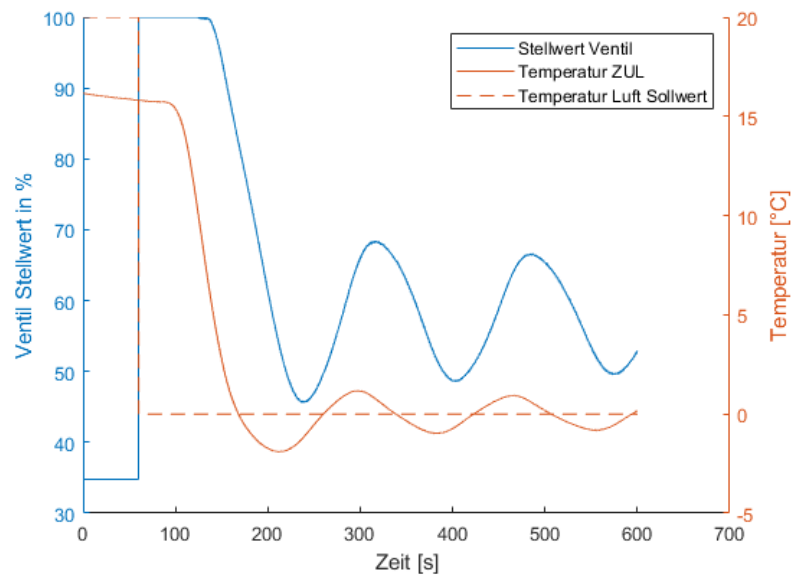


Abbildung 4.8.: Regler schwingt sehr Stark

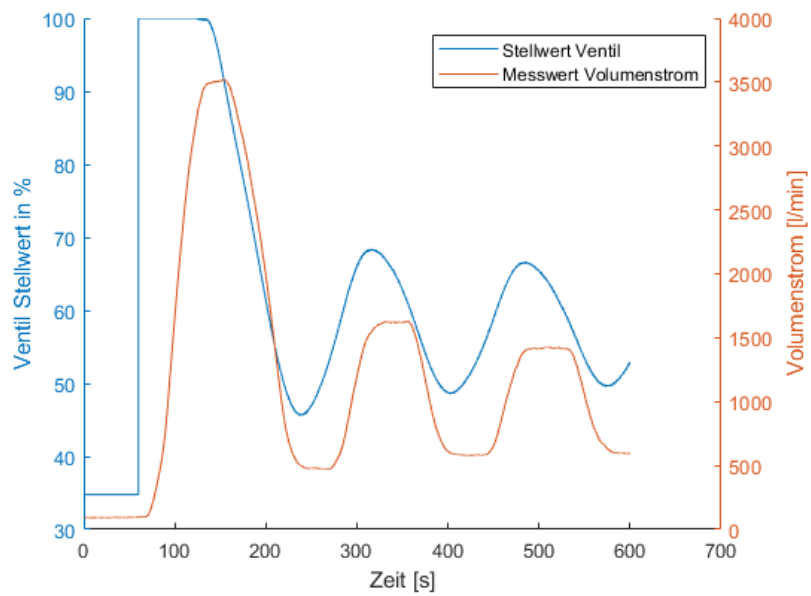


Abbildung 4.9.: Volumenstrom phasenverschoben

5. Diskussion

5.1. Reglertest

Im Test des Reglers musste leider festgestellt werden, dass die praktische Umsetzung des theoretischen Modells immer noch Schwierigkeiten mit sich bringt. Die starke Schwingung kann aber begründet werden durch eine Hysterese, welche man auch in der Ventilkennlinie in Abbildung 5.1 sehen kann. Verschlimmert wird diese Hysterese durch die Dimension des Ventils. Wie in Abbildung 3.6 zu sehen ist, geschieht fast die komplette Regelung innerhalb von einem Drittel des ganzen Ventilwegs.

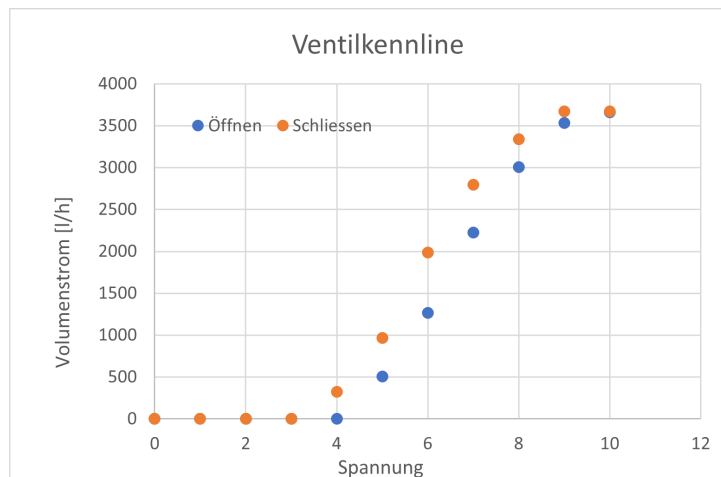


Abbildung 5.1.: Ventilkennlinie

Da am Prüfstand leider keine ausführlichen Messungen und Reglertests durchgeführt werden konnten, ist nicht klar ob dort die selben Probleme auftreten. Allerdings ist dort der Ventiltyp ein anderer und das Ventil ist angepasster dimensioniert, was sich beides Positiv auf die Regelung auswirkt.

5.2. Fazit

Trotz dem nicht ganz erfolgreichen Reglertest konnte auf Basis der Modelle eine funktionierende Regelung für den VK AUL aufgezeigt werden. Es wurde schon zu einem frühen Zeitpunkt in der Arbeit festgestellt, dass die ursprüngliche Aufgabenstellung den Rahmen einer Bachelor-Thesis sprengen würde. Für eine Weiterarbeit an diesem Thema ist

es möglich, die erarbeiteten Modelle auf weitere Komponenten zu übertragen. Die Parameter müssen dabei neu bestimmt werden, aber das Modell kann für jeden Luft-Wasser Wärmetauscher weiterverwendet werden. Die Schwierigkeiten dieser Arbeit lagen darin, dass der jetzige Zustand am Prüfstand fast gar nicht dokumentiert ist. Es konnte auf nichts aufgebaut werden, sondern es musste alles von Grund auf neu gemacht werden. Dazu kommt auch, dass fast keine Messungen oder Tests am Prüfstand durchgeführt werden konnten, was das Verifizieren eines Modells sehr erschwert.

5.3. Ausblick

Es gibt mehrere nächste Schritte, um zu einem voll funktionierenden Regelungssystem zu gelangen. Zum einen sind Regler für weitere Komponenten zu entwerfen, beispielsweise auch für die parallelen Nachkühler. Wie schon angesprochen, können für viele Komponenten auch Modelle wieder verwendet werden. Zum anderen ist die Luftfeuchtigkeit in die Regelung einzubeziehen. Feuchtigkeit sollte übergreifend über mehrere Komponenten geregelt werden, da sonst Probleme zwischen den Reglern auftreten können. Früher oder später muss auch ein Versuch am Prüfstand in der Realität durchgeführt werden. Nur so können Modelle richtig verifiziert werden.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Begriffe der Luftarten (BELIMO, 2021)	1
2.1	Abluft- und Aussenluftaufbereitung (Furter et al., 2005)	3
2.2	Gegenstrom-Plattenwärmeübertrager (ZEWOTHERM, 2022)	3
2.3	Rotationswärmeübertrager (BELIMO, 2021)	4
2.4	Funktionsweise einer Abluftwärmepumpe (Nguyen, 2020)	5
2.5	Mögliche hydraulische Schaltungen (BELIMO, 2021)	6
3.1		8
3.2	Schema der Umweltsimulationskammer	9
3.3	Schema einer Zelle	9
3.4	Implementierung einer Zelle in Simulink als Subsystem	10
3.5	Implementierung des Wärmetauschers in Simulink	11
3.6	Simulink-Modell vom VK AUL	12
3.7	Vergleich der Sprungantworten von Modell und Messung	13
3.8	Simulink-Modell der USK	13
3.9	Messungen an der USK	14
3.10	Vergleich von Simulation und Modell USK	15
3.11	Sprungantwort mit abzulesenden Werten	16
3.12	Tabelle nach Chien, Hrones und Reswick (Wikipedia, 2022)	16
3.13	Schrittweise Öffnung des Ventils	17
3.14	Algorithmus zum bestimmen der Wendetangente	18
3.15	Alle Schritte mit Wendetangenten	18
4.1	Abgelesene Parameter am VK AUL in Abhängigkeit der Ventilposition . .	19
4.2	Regelparameter für den VK AUL in Abhängigkeit der Ventilposition . . .	20
4.3	Abgelesene Parameter der USK in Abhängigkeit der Ventilposition	20
4.4	Regelparameter für der USK in Abhängigkeit der Ventilposition	21
4.5	Schema der Funktionsweise des Reglers	21
4.6	Implementierung Gain Scheduling in Simulink	22
4.7		23
4.8	Regler schwingt sehr Stark	24
4.9	Volumenstrom phasenverschoben	24
5.1	Ventilkennlinie	25

Tabellenverzeichnis

2.1	Mögliche Betriebsbereiche des Prüfstands (Furter et al., 2005)	2
2.2	Zulässige Abweichungen von den eingestellten Werten	6

Literatur

- BELIMO. (2021). Raumluftechnische Geräte (RLT-Geräte).
- Degunda, N. (2010). Einfaches Modell für einen Lufterhitzer in HLK-Anlagen.
- Europäisches Komitee für Normung. (2010). EN 13141-7:2010 de.
- Europäisches Komitee für Normung. (2014). EN 13141-8:2014 de.
- Furter, R., Helfenfinger, D. & Wenger, L. (2005). Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte für Komfortlüftung.
- Guzella, L. (2021). Modeling and Analysis of Dynamic Systems.
- MathWorks. (2022). *Valve Actuator*. <https://ch.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/valveactuator.html>
- Nguyen, M. D. (2020). Abluftwärmepumpe: Funktion & Vorteile. <https://heizung.de/waermepumpe/wissen/wie-eine-abluftwaermepumpe-funktioniert/>
- Wikipedia. (2022). *Faustformelverfahren (Automatisierungstechnik)*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Faustformelverfahren_\(Automatisierungstechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Faustformelverfahren_(Automatisierungstechnik))
- ZEWOTHERM. (2022). Lüftungsgeräte mit Gegenstrom-Wärmetauscher. <https://www.zewotherm.com/de/produkte/wohnraumlueftung/zentrale-wohnraumlueftung/die-lueftungsgeraete/zewo-vent-lueftungsgeraete-mit-gegenstrom-waermetauscher.html>

A. Dank

Diese Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung von allen Seiten, wofür ich sehr dankbar bin. Allen voran will ich Herrn Professor Dr. Peter Gruber danken für die gute Betreuung und auch für viele wertvolle Inputs. Bedanken will ich mich auch bei Herrn Martin Hämmerle für die fachliche Unterstützung im Bereich Gebäudetechnik. Vielen Dank geht auch an Jasin Jasari für das Bereitstellen aller möglichen Unterlagen, die ich benötigt habe. Zum Schluss bedanke ich mich auch bei Michael Näf und bei Said Ahsaine für die Unterstützung bei den Messungen und Tests an der USK, besonders auch fürs Programmieren der SPS.

B. Anhang

Im elektronischen Anhang befinden sich:

1. Simulink-Modelle
2. Matlab-Skripts
3. Messdaten Parameterbestimmung USK
4. Messdaten Reglertest USK
5. Messdaten Sprungantwort VK AUL