



HANSA Klimasysteme GmbH  
Stockweg 19  
26683 Saterland / Strücklingen

Hochschule Emden / Leer  
Constantiaplatz 4  
26723 Emden

## **Selbstlernende energieeffiziente Regelung komplexer Raumluftechnischer Geräte**

Abschlussbericht  
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
Az: 33401-01-24

Prof. Dr.-Ing. Sven Steinigeweg  
Dr.-Ing. Matthias Lamping

Strücklingen, 28.07.2020





HANSA Klimasysteme GmbH  
Stockweg 19  
26683 Saterland / Strücklingen

Hochschule Emden / Leer  
Constantiaplatz 4  
26723 Emden

## **Selbstlernende energieeffiziente Regelung komplexer Raumluftechnischer Geräte**

Abschlussbericht  
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
Az: 33401/01-24

Prof. Dr. Sven Steinigeweg  
Dr. Ing. Matthias Lamping

Strücklingen, 28.07.2020

06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>33401/01</b>	Referat	<b>24</b>	Fördersumme	<b>334.488€</b>
<b>Antragstitel</b>		Selbstlernende energieeffiziente Regelung komplexer raumluftechnischer Geräte			
<b>Stichworte</b>					
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
<b>29 Monate</b>		<b>1.12.2017</b>		<b>30.4.2020</b>	
Projektphase(n) <b>7</b>					
Zwischenberichte					
<b>Bewilligungsempfänger</b>		HANSA Klimasysteme GmbH Rolf Neumann Stockweg 19  26683 Saterland		Tel 04498 89-0 Fax 04498 687 Projektleitung Dr. Ing. Matthias Lamping Bearbeiter B.Eng Christian Seltz	
<b>Kooperationspartner</b>		Hochschule Emden / Leer EUTEC Institut - Prof. Dr. Sven Steinigeweg Constantiaplatz 4  26723 Emden			
<b>Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens</b>					
<p>Je nach Jahreszeit ist der Betrieb von Klimaanlageanlagen mit erheblichem Einsatz an elektrischer Energie verbunden. Von 2006 bis 2013 wurden in Deutschland über 213.000 Raumluftechnische-Anlagen mit einer summierten elektrischen Leistungsaufnahme von 5.082 MW installiert. Allein diese Anlagen benötigen (bei einer jährlichen Betriebsstundenzahl von 2350 Stunden) jedes Jahr 11,9 TWh Strom. [1] Laut einer Studie des VDMA hatte die Klimatisierungstechnik in Deutschland 2009 bereits einen Energiebedarf von 23 Terrawattstunden. Im energieeffizienten Betrieb von Klimaanlageanlagen liegt daher ein großes Potenzial zur Reduktion von Energieverbräuchen sowie der energiebedingten Umweltbelastungen.</p> <p>Für dieses Projektziel wird ein Sensor- und Datenkonzept erstellt. Mit Hilfe der ermittelten Daten, einer generierten Matrix und einer mathematischen Optimierungsfunktion kann in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen und Betriebseigenschaften der optimale Betriebspunkt bestimmt werden. Weiter soll die Energieeffizienz durch eine dynamische Regeloptimierung und Trajektorieplanung mittels neuronaler Netze erhöht werden. In einer kontinuierlichen, automatisierten Adaption wird der Betriebsmodus der Anlagen selbstlernend den gegebenen Umgebungsbedingungen angepasst.</p>					
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>					
<p>Das Projekt gliederte sich in 6 Phasen, die teilweise parallel von der Firma HANSA und dem Kooperationspartner Hochschule Eden/Leer bearbeitet wurden. Nach der Projektkonzeption wurde zunächst ein Sensor- und Datenkonzept für ein Gerät im Feld entwickelt. Auf Basis der dadurch gesammelten Daten wurden parallel das Gerätemodell sowie die neuronalen Ansätze entwickelt. Der Arbeitsplan hat sich während des Projektablaufs entwickelt und wurde angepasst. Die Ergebnisse zeigen eine Einsparung des Energiebedarfs von über 20 %. Auf Basis der Ergebnisse soll das Projekt weiterentwickelt werden.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Folgende Arbeiten wurden zu Beginn des Projekts durchgeführt:

- Erstellung eines Pflichtenhefts
- Entwicklung eines Sensorkonzepts für das Gerät und die Örtlichkeiten des Freizeitbads Ramsloh
- Entwicklung der Software zum Sammeln der Daten sowie aufarbeiten dieser. (Schwerpunkt war es hier, die Daten so aufzuarbeiten, dass sie für eine Auswertung nutzbar wurden.)

Nachdem die ersten Schritte realisiert waren, konnte mit den gesammelten Daten (fortlaufender Prozess) mit den nächsten Schritten begonnen werden

- Entwicklung eines Geräterechners
- Entwicklung neuronaler Ansätze zur Regelung. Während des Projekts wurde neben dem neuronalen Ansatz auch noch ein physikalisches Modell des Geräts und der Schwimmhalle entwickelt, um möglichst alle thermischen Einflüsse abbilden zu können.
- Weiterentwicklung der konventionellen Regelung durch einfache Anpassung der vorhandenen Regelung. Hier konnten mit geringem Kostenansatz erste Energieeinsparungen erzielt werden.

Nachdem der Ansatz der Hochschule fertiggestellt war und mit den gesammelten Daten angelernt wurde, konnten die Tests durchgeführt werden. Hierzu wurden alle vorhandenen Regelansätze je eine Woche lang getestet und verglichen. Äußere Einflüsse durch Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung und Belegung des Bads verfälschten diese Ergebnisse, so dass ein längerer Test folgen muss, um hier genauer vergleichen zu können. Ergebnisse aus diesem Test lassen aber eine Energieeinsparung von bis zu 20 % vermuten.

Weitere Tests konnten im Rahmen des laufenden Projektes nicht durchgeführt werden, weil das Schwimmbad mehrere Monate in Revision war und als es wieder in Betrieb genommen werden sollte, die Corona Pandemie für eine Schließung sorgte. Jetzt (Sommer 2020) sind wieder Badegäste erlaubt aber die Anlage ist so eingestellt, dass immer 100 % Außenluft gefördert werden. Die optimierte Regelung läuft aber auch mit diesen Vorgaben.

Der geplante Ansatz der Steuerung aus einer Cloud heraus wurde nicht realisiert, da der Stand der Technik und Sicherheitsfragen bei der Übermittlung der Daten dies zum heutigen Zeitpunkt noch nicht zulassen.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Bisher wurden keine Ergebnisse veröffentlicht. Während des Projektverlaufs wurden mehrere kurze Präsentationen im Hause HANSA durchgeführt. Hörer der Präsentation waren interne Mitarbeiter und eine Technikerklasse der BBS Rostrup.

Ein lokales Zeitungsunternehmen hat einen Zeitungsartikel über die Arbeiten im Freizeitbad Ramsloh veröffentlicht.

Am 03.04.2020 sollte eine Präsentation mit Veröffentlichung auf dem TGA- Kongress in Berlin erfolgen, dieser wurde wegen der Corona Pandemie abgesagt. Der Kongress soll nach heutigem Stand Anfang 2021 nachgeholt werden.

### ***Fazit***

Mehrere neue Regelansätze wurden entwickelt. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die Entwicklung neuronaler Ansätze des Kooperationspartners gelegt. Erste Ergebnisse zeigen großes Potenzial bezüglich der Kosten und Energieeinsparung. Um hier wirtschaftlich zu bleiben muss das Konzept soweit weiterentwickelt werden, dass es mit geringen Kostenansätzen auf andere Geräte übertragbar ist. Dies gilt es in der Zukunft zu erreichen.

Abbildungsverzeichnis .....	6
Verzeichnis der Tabellen.....	8
Begriffe, Abkürzungen und Definitionen.....	9
Zusammenfassung .....	11
1 Einleitung.....	12
2 Projektablauf.....	14
2.1 Projektkonzeption.....	14
2.1.1 Projektbegleitende Patent- und Literaturrecherche .....	16
2.2 Gerätebeschreibung .....	16
2.3 Entwicklung des Sensor- und Datenkonzepts.....	19
2.3.1 Gerätetests zur Ermittlung der Betriebsdaten.....	19
2.3.1.1 Ventilatormessungen .....	19
2.3.2 Entwicklung und Integration eines Sensorkonzepts für das zu installierende RLT-Gerät im Feld .....	21
2.3.3 Gerätemonitoring eines Schwimmbadentfeuchtungsgeräts im Feld. ....	21
2.4 Konzeption und Erstellung des Geräterechners.....	24
2.4.1 Motivation.....	24
2.4.2 Modellerstellung .....	25
2.4.3 Modellierung Jalousieklappen.....	27
2.4.3.1 Prüfstandsuntersuchungen.....	29
2.4.4 Umsetzung .....	33
2.5 Optimierung der konventionellen Regelung.....	35
2.5.1 Anpassung des Sollwertes für die absolute Luftfeuchtigkeit .....	35
2.5.2 Ansteuern der Mischluftklappe im Umluftbetrieb.....	36
2.5.3 Sensorüberwachung .....	36
2.5.4 Druckabgleich der Messeinrichtungen.....	37
2.5.5 Volumenstrombestimmung der Jalousieklappen am realen Gerät .....	38
2.5.5.1 Ergebnisse des Testgerätes .....	39
2.6 Entwicklung eines physikalischen Modells und eines neuronalen Netzes .....	42
2.6.1 Motivation.....	42
2.6.2 MIMO Predictive Control Layout.....	42
2.6.3 Entwicklung eines physikalisch basierten Gerätemodells.....	43
2.6.3.1 Luftströmungsmodell .....	44
2.6.3.2 Druckfestigkeitsversuch .....	46
2.6.3.3 Experiment zum Ermitteln der Ventilator Kennlinie.....	48
2.6.4 Entwicklung eines physikalisch basierten thermischen Gebäudemodells.....	52
2.6.4.1 Modell der Hallenluftfeuchtigkeit .....	55
2.6.5 Modellierung neuronaler Netze.....	56
2.6.6 Modellvalidierung .....	64
2.6.7 Formulierung eines adaptiven Modells der prädiktiven Steuerung.....	66
2.7 Testphase und Validierung der Ergebnisse.....	74
2.8 Implementierung modellbasierter Controller.....	83

2.9	Konzeption der Cloud und der Cloudanbindung .....	85
2.10	Entwicklung eines Sensorkonzepts für verschiedene Geräte und räumliche Gegebenheiten .....	86
3	Fazit .....	87
	Formelverzeichnis .....	90
	Literaturverzeichnis.....	91
	Anhang A .....	A
	Anhang B.....	B
	Anhang C.....	C

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Skizze der modellbasierten Regelung des Schwimmbads .....	12
Abbildung 2-1:	Projekttablauf gemäß Antrag .....	14
Abbildung 2-2:	Fortschreibung des Projekttablaufes .....	15
Abbildung 2-3:	Entfeuchtung und Wärmerückgewinnung mittels Wärmepumpe .....	17
Abbildung 2-4:	Entfeuchten mittels Außenluft .....	17
Abbildung 2-5:	Umluftbetrieb ohne Entfeuchtung .....	18
Abbildung 2-6:	Messaufbau zur Überprüfung des Ventilator- Volumenstroms .....	20
Abbildung 2-7:	Vergleich der Messwerte Volumenstrom .....	20
Abbildung 2-8:	Prüfung der Messintervalle .....	22
Abbildung 2-9:	Häufigkeitsverteilung der Leistung vom Zuluftventilator .....	23
Abbildung 2-10:	Mittelwert der Außenlufttemperatur .....	23
Abbildung 2-11:	Segmentierung des Aircalc Gerätes .....	25
Abbildung 2-12:	Ersatzschaltbild untersuchtes Entfeuchtungsgerät .....	26
Abbildung 2-13:	Ersatzschaltbild mit Volumenstromaufteilung bei geöffneten Mischluft und Umluftklappen .....	27
Abbildung 2-14:	Jalousieklappe Frontansicht .....	28
Abbildung 2-15:	Jalousieklappe Seitenansicht .....	29
Abbildung 2-16:	Klappenstellung 20% Zuluftklappe – gemessene und berechnete Werte ..	30
Abbildung 2-17:	Klappenstellung 40% Zuluftklappe - gemessene und berechnete Werte ..	31
Abbildung 2-18:	Abhängigkeit des Durchflussbeiwertes von der spezifischen Fläche der Jalousieklappe .....	32
Abbildung 2-19:	Abbildung des Geräterechners in Excel: Darstellung der Vorgabewerte ..	33
Abbildung 2-20:	Leistungsvergleich der Ventilatoren bei geöffneter und geschlossener Mischluftklappe im Umluftbetrieb .....	36
Abbildung 2-21:	Volumenstrom über Druckdifferenz, Zuluftklappe HANSA Prüfstand 20% Klappenstellung .....	39
Abbildung 2-22:	Volumenstrom über Druckverlust bei unterschiedlichen Klappenstellungen, Außenluftklappe .....	40
Abbildung 2-23:	Ablaufdiagramm notwendige Modelle .....	43
Abbildung 2-24:	Lüftungsmodell als Widerstandsnetzwerk .....	44
Abbildung 2-25:	Ablaufdiagramm zum Lösen der Durchflussgleichung .....	46
Abbildung 2-26:	Versuchsaufbau Druckabfallkoeffizient Umluftklappe .....	46
Abbildung 2-27:	Widerstand an der Umluftklappe .....	47
Abbildung 2-28:	Versuchsaufbau Druckabfallkoeffizient Mischluftklappe .....	47
Abbildung 2-29:	Widerstand an der Mischluftklappe .....	48
Abbildung 2-30:	Druck / Volumenstromverhältnis .....	49
Abbildung 2-31:	Wirkungsgrad / Volumenstromverhältnis .....	49
Abbildung 2-32:	Zustand der Anlage am 28.02.2019 .....	50
Abbildung 2-33:	Vergleich des Drucks an Punkt P1 (gemessen und berechnet) .....	50
Abbildung 2-34:	Vergleich des Drucks an Punkt P2 (gemessen und berechnet) .....	50
Abbildung 2-35:	Vergleich des Drucks an Punkt P4 (gemessen und berechnet) .....	51
Abbildung 2-36:	Vergleich der Abluftvolumenströme (gemessen und berechnet) .....	51
Abbildung 2-37:	Vergleich der Zuluftvolumenströme (gemessen und berechnet) .....	51
Abbildung 2-38:	Widerstandsnetzwerk des thermischen Gebäudemodells .....	53
Abbildung 2-39:	Wärmemodell der Schwimmhalle .....	54
Abbildung 2-40:	Entstehung und Beseitigung von Feuchtigkeit in der Halle .....	55
Abbildung 2-41:	Struktur eines neuronalen Netzes .....	57
Abbildung 2-42:	Struktur eines Neurons .....	57
Abbildung 2-43:	Neuronale Netzwerkstruktur für die Hallentemperatur .....	58
Abbildung 2-44:	neuronale Netzwerkstruktur für die Hallenfeuchte .....	59

Abbildung 2-45:	Validierungsssergebnisse der Hallentemperatur .....	59
Abbildung 2-46:	Validierungsergebnisse der Hallenfeuchte.....	60
Abbildung 2-47:	Schematische Darstellung der Konfiguration der Netze.....	60
Abbildung 2-48:	Druckmodell des RLT-Geräts im neuronalen Netzwerk .....	61
Abbildung 2-49:	Plattenwärmetauschermodell im neuronalen Netzwerk.....	61
Abbildung 2-50:	T3 Verdampfermodell des neuronalen Netzwerks.....	62
Abbildung 2-51:	T4 Temperaturmodell des neuronalen Netzwerks .....	62
Abbildung 2-52:	Modell der X4 absoluten Feuchte im neuronalen Netzwerk.....	62
Abbildung 2-53:	Modell der absoluten Zuluftfeuchte im neuronalen Netzwerk .....	63
Abbildung 2-54:	T6 Temperaturmodell im neuronalen Netzwerk .....	63
Abbildung 2-55:	Zulufttemperaturmodell im neuronalen Netzwerk.....	64
Abbildung 2-56:	Zustand der Anlage am Testtag .....	64
Abbildung 2-57:	Vergleiche der Drücke an den Punkten P1-P4 mit den .....	
	verschiedenen Regelvarianten.....	65
Abbildung 2-58:	Vergleich der Temperaturen mit den verschiedenen Regelvarianten .....	65
Abbildung 2-59:	Gitter von Zustandsraummodellen .....	67
Abbildung 2-60:	Auswirkung der Ventilator Drehzahl. auf die Hallentemperatur bei	
	geöffneter und geschlossener Bypassklappe.....	68
Abbildung 2-61:	Auswirkung der Wärmepumpe auf die Hallenfeuchte bei geöffneter .....	
	und geschlossener Mischluftklappe .....	68
Abbildung 2-62:	Auswirkung der Mischluftklappe auf die Hallenfeuchte bei .....	
	versch. absoluten Außenluftfeuchten.....	69
Abbildung 2-63:	Vorhersagendarstellung MPC.....	71
Abbildung 2-64:	Reaktionen des neuronalen Netzwerks .....	73
Abbildung 2-65:	Verteilung der Außenlufttemperaturen während der Testphase .....	75
Abbildung 2-66:	Verteilung der Außenluftfeuchtigkeit während des Tests.....	75
Abbildung 2-67:	Verteilung der Ablufttemperaturen während des Tests .....	76
Abbildung 2-68:	Verteilung der relativen Abluftfeuchte während des Tests.....	76
Abbildung 2-69:	Einsparung elektrischer Energie .....	77
Abbildung 2-70:	Einsparung Wärmeenergie .....	78
Abbildung 2-71:	Einsparung Kosten .....	78
Abbildung 2-72:	Einsparung von CO2 Emissionen .....	79
Abbildung 2-73:	Konventionelle Steuerung Soll-Istwert Verfolgung .....	80
Abbildung 2-74:	Physikalisches Model Soll-Istwert Verfolgung .....	80
Abbildung 2-75:	Neuronales Netzwerk Soll-Istwert Verfolgung.....	80
Abbildung 2-76:	Ansteuerung des Ablüfters in der Testphase.....	81
Abbildung 2-77:	Ansteuerung der Umluftklappe während der Testphase .....	81
Abbildung 2-78:	Ansteuerung der Kälteanlage während der Testphase .....	81
Abbildung 2-79:	Änderungsrate Ansteuerung Ablüfter .....	82
Abbildung 2-80:	Änderungsrate Ansteuerung Kälteanlage.....	82
Abbildung 2-81:	Änderungsrate Ansteuerung Umluftklappe .....	83
Abbildung 2-82:	Änderungsrate Ansteuerung Außenluft .....	83
Abbildung 2-83:	Ablauf der Implementierung des MPC in konventionelle Regelsysteme ..	84
Abbildung 2-84:	Auszug aus den gesammelten Daten aus der Cloud .....	85

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2-1:	Steuerbare / überwachte Variablen.....	43
Tabelle 2-2:	Widerstandskoeffizienten .....	48
Tabelle 2-3:	Außenwandmaterialien.....	54
Tabelle 2-4:	Fenstermaterial .....	54
Tabelle 2-5:	Innenwandmaterial .....	55
Tabelle 2-6:	Deckenmaterial .....	55
Tabelle 2-7:	Zwischendeckenmaterial .....	55
Tabelle 2-8:	Gewichtungsfaktoren der steuerbaren Variablen .....	72
Tabelle 2-9:	Gewichtungsfaktoren der Ausgangsvariablen .....	72
Tabelle 2-10:	Anzahl der Datensätze – Vergleich Regelalgorithmen.....	74

# Begriffe, Abkürzungen und Definitionen

## A

### Aircalc

Software zum Kalkulieren von RLT-Geräten von der Firma ISC GmbH ..... 24, 25, 26, 27, 33, 34

### ANN

artificial neural network..... 58

## C

### Cloud

Rechner- oder Datenwolke (IT-Infrastruktur) ..... 86, 87

## G

### Gateway

"Ausfahrt" Hardware die eine Verbindung zwischen zwei Systemen herstellt ..... 21

### GmbH

Gesellschaft mit beschränkter Haftung..... 1, 2, 13

## H

### HVAC

Heating, Ventilation and Air Conditioning (dt. „Heizung, Lüftung, Klimatechnik“) ..... 12, 43

## L

LTI-Modell ..... 88

Linear Time Invariant (dt. "lineares zeitinvariantes System") ..... 69

## M

### MIMO-Prädiktivregelung

Multi- Inputs and Multi- Outputs prädiktive Regelung ..... 42

### MLP

Multi Layer Perceptron ..... 56

MPC..... 88

Model Predictive Control (dt. "Modellprädiktive Regelungstechnik")..... 12, 42, 72, 73

### MSE

Mean squared error ..... 57

## P

### PID-Regler

(proportional-integral-derivative controller) ..... 12

### PI-Regler

(proportional–integral controller)..... 18, 42

## R

### RLT

Raumlufttechnik..... 12, 13, 18, 21, 27, 37, 42, 43, 44, 46, 58, 61, 62, 87

## S

### SPS

Speicherprogrammierbare Steuerung ..... 18, 42

## V

### VPN- Tunnel

Virtual Private Network (dt. „virtuelles privates Netzwerk“)..... 21

## W

### WRG

Wärmerückgewinnung..... 25



## Zusammenfassung

In dieser Arbeit befasst sich die Firma HANSA- Klimasysteme in Kooperation mit der Hochschule Emden / Leer mit dem Thema der Digitalisierung im Lüftungssektor. Da der stetige Ausbau in anderen Bereichen der Elektrotechnik immer schneller vorangeht und auch die Frage der Energieeinsparung immer mehr in den Fokus der Gesellschaft rückt, stellte sich schließlich auch in der Firma HANSA – Klimasysteme die Frage: Sind wir noch auf dem aktuellsten Stand der Technik? Was müssen wir tun, um den Anschluss nicht zu verlieren? Können wir Produkte anbieten, die noch energiesparender sind, als die jetzigen? Und ist ein neuer Ansatz für Lüftungsgeräte überhaupt notwendig oder überschreitet es den Kosten - Nutzen Faktor? Da nur Fragen ohne Taten nichts bewirken, entschied man sich das Thema anzugehen und zu erforschen. In den folgenden Kapiteln werden diese Ansätze beschrieben.

Um das Thema breit zu fächern, wurden zwei Ansätze verfolgt. Zum einen die Entwicklung eines Geräterechners und zum anderen die Steuerung eines RLT-Geräts mittels Model basierten Regelansätzen. Glückliche Umstände machten es möglich, ein Bauvorhaben in der Nähe des Stammsitzes der Firma HANSA, im Freizeitbad Ramsloh im Saterland, zu gewinnen, bei dem ein RLT-Gerät für diese Zwecke installiert werden konnte.

Nach der Einleitung wird im zweiten Kapitel beschrieben, wie einzelne Komponenten dieser Anlage vorab im Prüffeld untersucht wurden, um Herstellerangaben und Charakteristika dieser Komponenten zu validieren. Das notwendige Sensorkonzept wurde entwickelt.

Im nächsten Abschnitt wird die Entwicklung des Geräterechners skizziert. Es wird beschrieben, welche Ideen verfolgt wurden, wie einzelne Untersuchungen und Modellierungen umgesetzt wurden und welche Ergebnisse bisher erreicht wurden.

Es folgt die Beschreibung der Modellierung des physikalischen Modells und die Modellierung des Modells mit neuronalen Ansätzen.

Zunächst wird die Modellierung des physikalischen Modells beschrieben, hierbei wurde das Modell in zwei Teilen entwickelt, zum einen die Modellierung des RLT-Geräts und zum anderen die Modellierung des Gebäudes der Schwimmhalle Ramsloh. Beide Modelle arbeiten zusammen, um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen.

Es folgt die Beschreibung der Entwicklung der neuronalen Netze, bestehend aus dem grundsätzlichen Aufbau und dessen Funktionen.

Im letzten Abschnitt werden die gesammelten Ergebnisse und Erkenntnisse komprimiert präsentiert. Was wurde erreicht, sind die Anfangs gesetzten Ziele erreicht worden? Im Anschluss werden die Aspekte beschrieben, die zurzeit noch in Arbeit sind. Dabei handelt es sich um die Cloud- Lösung und die Entwicklung eines Sensor- Baukastensystems für Folgeprojekte. Mit einem Fazit und kurzen Ausblick auf zukünftige Vorhaben wird diese Arbeit schließlich abgeschlossen.

# 1 Einleitung

Gebäude machen etwa 40% des gesamten Endenergieverbrauchs aus und mehr als die Hälfte der Endenergie wird in Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HVAC) verbraucht [2]. Eine effiziente Gebäudebelüftung kann wesentlich zur Reduzierung des Stromverbrauchs sowie der Treibhausgasemissionen beitragen.

Die Modelprädiktive Regelungstechnik (zumeist Model Predictive Control; MPC) wurde intensiv für den thermischen Komfort in Wohngebäuden untersucht und hat eine erhebliche Energieeinsparung ergeben. MPC ist eine Methode zur eingeschränkten optimalen Kontrolle, die ihren Ursprung in den späten 70er und frühen 80er Jahren in der Prozessindustrie hatte [3]. Lüftungsgeräte (RLT-Geräte) für Schwimmhallen sind komplexe Geräte mit vielen Freiheitsgraden in der Steuerungsplanung. Die gewünschte Hallenkondition kann durch verschiedene Kombinationen von Umluftverhältnis, Außenluftmischungsverhältnis, Wärmepumpe und Lufterhitzerleistung erreicht werden. Der Einsatz klassischer PID-Regler erreicht in diesem Fall zwar die gewünschte Leistung, kann aber die Auswirkungen externer Störungen auf das System wie Außenwetterlage und Insassen nicht vorhersagen. Mehr denn je ist ein falsch abgestimmter PID-Regler nicht nur Energieverschwendung, sondern kann auch das System destabilisieren.

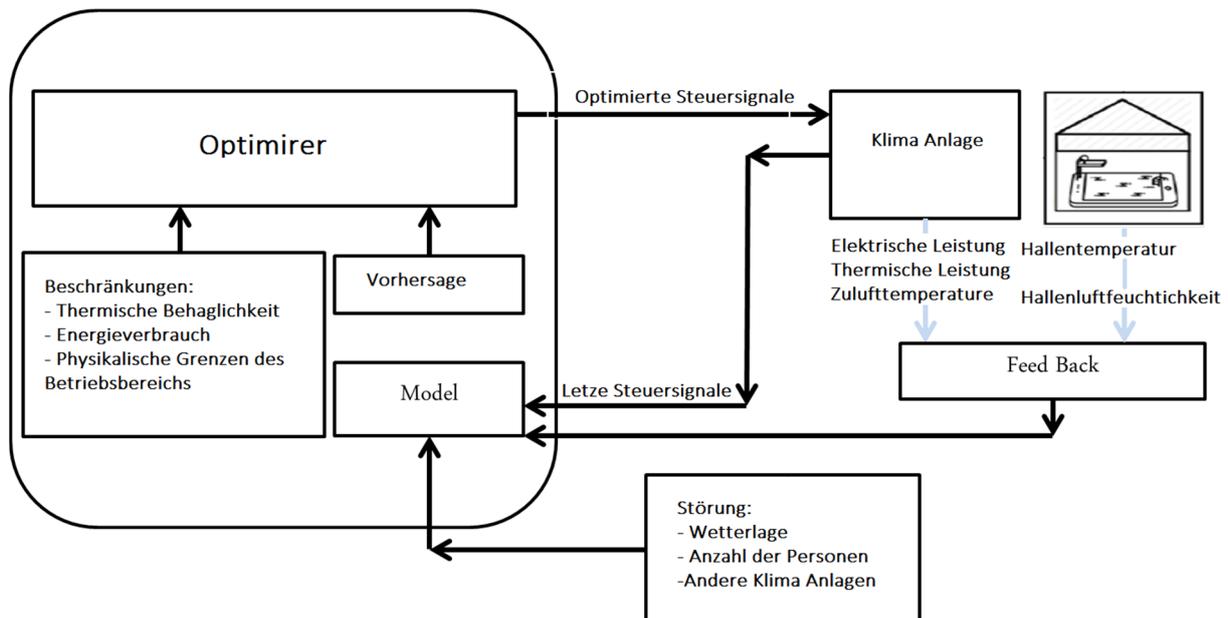


Abbildung 1-1: Skizze der modellbasierten Regelung des Schwimmbads

Der MPC-Algorithmus löst ein Online-Optimierungsproblem, bei dem Echtzeit Steuerungsaktionen durchführbar sind, um die gewünschten Zielfunktionen zu erreichen. Hierbei wird die zukünftige Entwicklung des Prozesses unter Vorbehalt einiger Einschränkungen für Steuereingaben und Zustände, vorhergesagt. Mehrere literarische Werke haben Effizienzsteigerungen von bis zu 100% mit der MPC-Methode beschrieben [4].

Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Anwendung von Regelungen, basierend auf MPC, in einer Schwimmhalle in Ramsloh (Norddeutschland). Im Gegensatz zu den Wohngebäuden, die den größten Teil des Energieverbrauchs zum Heizen benötigen, ist sie in einer Schwimmhalle

mit der Lüftung verbunden. Die RLT-Geräte in der Schwimmhalle werden von der Firma HANSA Klimasysteme GmbH zur Verfügung gestellt und können je nach Witterung in verschiedenen Betriebsarten arbeiten. Ziel ist es, mit einer mehrfach eingabebereiten, prädiktiven Steuerung mit mehreren Ausgangsmodellen den optimalen Betriebspunkt unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren wie z.B. der Außenwetterlage, der Anzahl der Personen in der Halle und der Energiekosten zu finden.

Der wichtigste Schritt beim Entwurf einer modellprädiktiven Steuerung ist die Entwicklung eines anspruchsvollen Modells, da die Genauigkeit des Modells den Regelalgorithmus beeinflusst. Datengesteuerte Modelle werden in Gray-Box-Modelle und Black-Box-Modelle unterteilt. In Mathematik, Statistik und Computermodellierung kombiniert ein Graukastenmodell (MathWorks) eine partielle theoretische Struktur mit Daten, um das Modell zu vervollständigen. Die theoretische Struktur wird mit den bekannten Methoden und physikalischen Zusammenhängen entwickelt und benötigt nur noch Parameterwerte, die vervollständigt werden müssen. Die Parameterwerte werden entweder aus den aufgezeichneten Daten oder aus der vorhandenen Literatur gewonnen. Das ist der Unterschied zwischen dem grauen Kastenmodell und dem weißen Kastenmodell, das rein theoretisch ist. Anhand der aufgezeichneten Daten können die erforderlichen Parameter in einem Optimierungsproblem gefunden werden, das den Fehler der Modellausgabe in Bezug auf die ausgewählten Parameter minimiert. Eine Black Box ist ein Gerät, System oder Objekt, das in Bezug auf seine Ein- und Ausgänge (oder Übertragungseigenschaften) betrachtet werden kann, ohne Kenntnis seiner internen Funktionsweise. Im Allgemeinen, wenn die Physik des Problems nicht bekannt oder zu komplex ist, werden Blackbox-Modelle verwendet, die auf rein aufgezeichneten Ein- und Ausgangsdaten basieren. Jeder dieser Ansätze hat seine eigenen Vor- und Nachteile in Präzision und Verallgemeinerung, auf die später eingegangen wird.

Ein weiterer Ansatz der parallel verfolgt wurde, besteht aus der Entwicklung eines Gerätemodells, welches als Geräterechner in die Auslegungssoftware der Firma HANSA implementiert werden soll. Hierbei handelt es sich um eine Backup Lösung die parallel zu dem Ansatz der Hochschule entwickelt wurde. Somit sollte erreicht werden, dass im Falle einer negativen Entwicklung seitens der Lösung der Hochschule es doch noch zu einem positiven Abschluss des Forschungsprojekts kommen sollte. Da der Ansatz der Hochschule für jedes neue Gerät neu entwickelt werden müsste, war die Idee hinter dieser Lösung, dass über einen Geräterechner für jedes neue Gerät verschiedener Typen automatisch ein Modell generiert werden kann und dieses in die Regelungssoftware implementiert wird. Somit würden direkt beim Auslegen der Anlage die relevanten thermodynamischen Daten gewonnen werden.

## 2 Projektablauf

### 2.1 Projektkonzeption

In der folgenden Grafik (Abbildung 2-1) ist die ursprüngliche Projektkonstellation visualisiert. Basierend auf einem komplexen Lüftungsgerät mit mehreren Funktionsmöglichkeiten, realisiert durch ein Schwimmbadentfeuchtungsgerät mit Wärmepumpe, sollten zwei unterschiedliche Wege beschritten werden, um eine energieoptimierte Regelung zu realisieren. Der eine Ansatz, getragen vom Industriepartner HANSA, sollte wie in der Grafik skizziert einen adaptiven Regler entwickeln, der mit konventionellen Regelansätzen die Betriebsart des Gerätes energieoptimiert darstellt. Der Grundgedanke hierzu ist, dass im vorhandenen Geräteauslegungsprogramm ein Geräterechner integriert wird, mit dem verschiedenste Betriebszustände simuliert werden und daraus ein empirisch basiertes Gerätemodell entsteht, mit welchem, in die Regelung integriert, das Gerät je nach Randbedingung energetisch optimal betrieben wird. Die Adaption im Gerätebetrieb ist notwendig, da davon auszugehen ist, dass die Modellierung durch Vereinfachungen im Modell das reale Gerät nicht genau genug abbildet und deshalb mit im Betrieb gewonnenen Daten abgeglichen werden muss. Dieser Weg war quasi eine „Backup“ Optimierungsstrategie, falls sich im Projektverlauf gezeigt hätte, dass der von der Hochschule verfolgte komplexere Ansatz nicht zum Erfolg führt oder zu komplex ist.

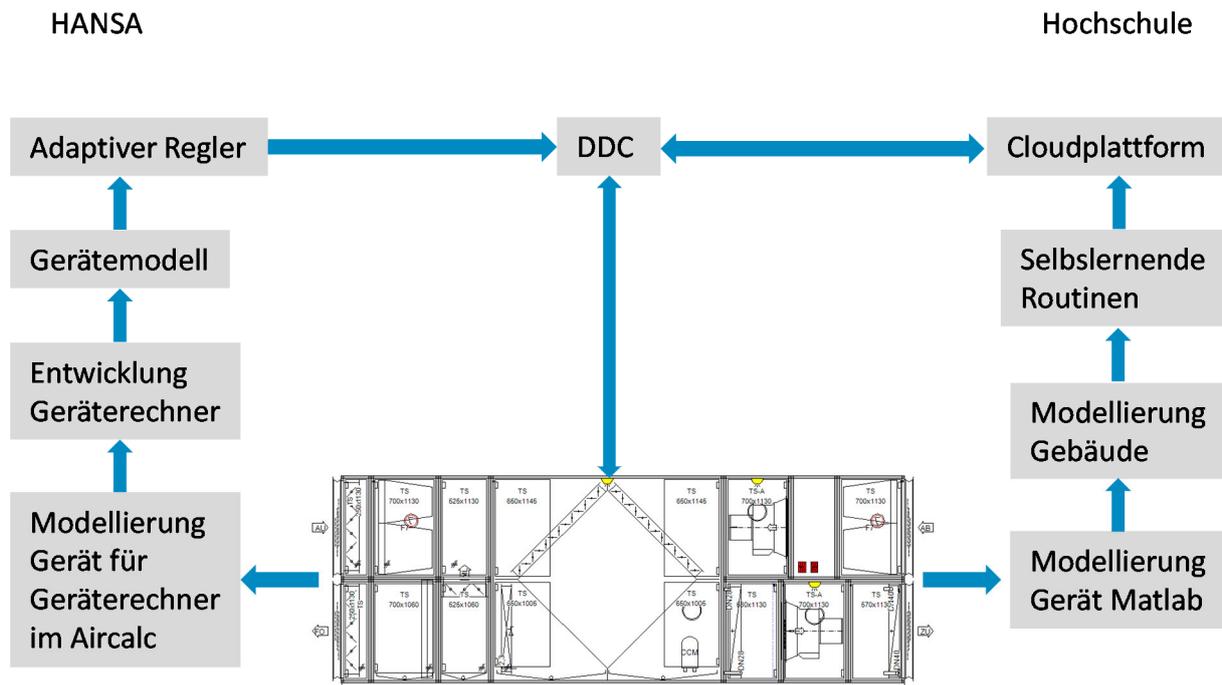


Abbildung 2-1: Projektablauf gemäß Antrag

Dieser Ansatz war zunächst vereinfachend darauf ausgerichtet, auf Basis einer Geräte und Gebäudemodellierung selbstlernende prädiktive und neuronal basierte Routinen zu entwickeln, diese auf einer Cloudplattform abzubilden und damit auf die Geräteregelung (DDC) zuzugreifen mit Überschreibung der dort integrierten Regelung.

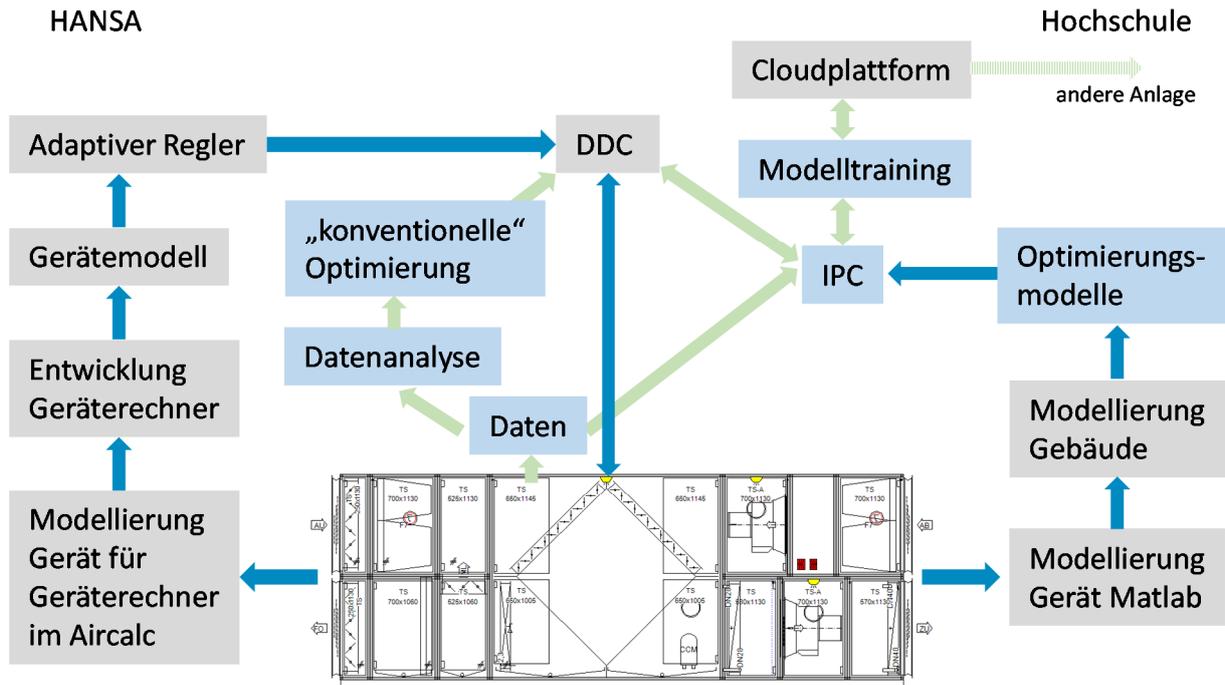


Abbildung 2-2: Fortschreibung des Projektablaufes

Abbildung 2-2 dagegen beschreibt die sich im Projektverlauf ergebenden Abläufe bzw. auch Realisierungsmöglichkeiten.

Nach wie vor ist ein Ansatz, auf Basis eines mit dem entwickelten Geräterechner ermittelten Modells einen adaptiven Regler zu bestücken. Im Projektverlauf wurde deutlich, dass auf Basis der umfangreichen Messdaten des im normalen Betrieb laufenden Gerätes und der darauf basierten Datenanalyse auch bereits eine Optimierung der bereits integrierten Regelstrategie Sinn macht. Damit ist es dann möglich, ohne weitere Kosten oder mit geringem Kostenaufwand Energiesparpotenziale zu erzielen und für den Kunden, sowie natürlich auch für HANSA, einen Mehrwert zu generieren. Siehe hierzu Kapitel 2.5.

Seitens der Hochschule wurden zwei Modelle entwickelt. Zunächst wurde ein physikalisch basiertes Geräte und Gebäudemodell entwickelt um abzuschätzen, ob eine entsprechende Modellierung sinnvoll und möglich ist und wie groß das erzielbare Optimierungspotenzial ist. Darauf basierend wurde ein neuronales Modell entwickelt. Der Vorteil eines neuronalen Netzes ist eine bessere Vorhersagegenauigkeit im betrachteten Raum (wenn die Datenbasis groß genug ist), der Nachteil, dass das Modell hinreichend trainiert sein muss und außerhalb des Trainingsbereiches keine vernünftigen Regelvorgaben gemacht werden können. Ein physikalischen Modell demgegenüber kann bereits nach kurzer Zeit zur Regeloptimierung eingesetzt werden und wird dann kontinuierlich durch weiteres Modelltraining verbessert. Es kann in Maßen auch außerhalb des antrainierten Bereichs verwendet werden. Es stehen dann am Ende des Vorhabens Aussagen zur Verfügung, welche Potenziale mit den unterschiedlichen Ansätzen „konventionelle Optimierung“, „empirisch basierte Optimierung“, „physikalisch basierte prädiktive Optimierung“ und „neuronal trainierte prädiktive Optimierung“ erzielt werden können.

Weiterhin ergab sich im Projektfortschritt, dass die Modelle nicht in einer Cloud abgelegt werden können, zumindest nicht nach derzeitigem Entwicklungsstand. Vor Ort am Gerät ist ein

Industrie-PC installiert, auf dem das Simulationsprogramm mit den Optimierungsmodellen läuft. Die Daten des trainierten Modelles allerdings können in die Cloud übertragen werden und dort für das Training anderer Geräte verwendet werden. Siehe auch Kapitel 2.9.

### **2.1.1 Projektbegleitende Patent- und Literaturrecherche**

Während des gesamten Projektablaufs wurden verschiedenste Quellen genutzt, um Wissenslücken zu schließen. Hierzu dienten Sachbücher, Elektronische Quellen, persönliche Unterlagen sowie Erfahrungsberichte aus dem Hause HANSA. Die entsprechenden Quellen sind zum Teil in diesem Bericht aufgeführt.

Es wurde eine Online-Patentrecherche im Depatisnet durchgeführt.

Suchbegriffe waren:

- Smart RLT
- Smart AHU
- RLT neuronal
- AHU neuronal
- Lüftung neuronal
- Lüftung modell
- Modellbasierte Lüftungsregelung

Patente, die die hier behandelten Ansätze direkt beschreiben wurden nicht gefunden.

Im Patent US020190017713A1 „Systems and Methods for using a smart valve to control conditioned air“ z.B. wird nur auf eine optimierte “smarte” Regelung eines Wasserventils beschrieben, welches ein im Klimagerät integriertes Register versorgt.

Im Patent WO002018208327A1 „BUILDING MANAGEMENT SYSTEM WITH A DISTRIBUTED BLOCKCHAIN DATABASE“ wird beschrieben, wie unterschiedlichste Komponenten in einer Gesamtanlage in einem Gebäudemanagement System sicher referenziert und beschrieben werden können.

In EP2775369A1 wird ein System beschrieben, mit: „Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung ein Verfahren, eine Bedienungseinrichtung, sowie eine Anordnung zur Steuerung und Regelung mindestens einer Raumkomfortgröße bereitzustellen, um einem Benutzer ein einfaches und sicheres Verändern der Raumkomfortgröße zu ermöglichen.“. Hiermit soll für den Benutzer eine möglichst einfache, intuitive Sollwertvorgabe möglich werden.

EP0871272B1 „Verfahren zum Erfassen des Energieeinsparpotentials eines elektrischen Energieverbrauchersystems und Verfahren zum Betreiben eines elektrischen Energieverbrauchersystems“ beschreibt ein System, mit dem automatisiert die elektrischen Verbräuche einer Liegenschaft automatisiert erfasst und mit den Verbräuchen ähnlicher Liegenschaften verglichen werden, woraus sich unter Umständen Einsparpotenziale ableiten lassen.

## **2.2 Gerätebeschreibung**

Wie im Antrag beschrieben, wird für die Untersuchungen ein Schwimmbadentfeuchtungsgerät verwendet.

Es besteht aus den Komponenten Plattenwärmetauscher zur Energierückgewinnung, Zu- und Abluftventilator, Umluft- Mischluft- und Bypassklappe, Zu- und Abluftventilator, Außen- und Abluftfilter, einem Warmwasserregister sowie einer integrierten Wärmepumpe.

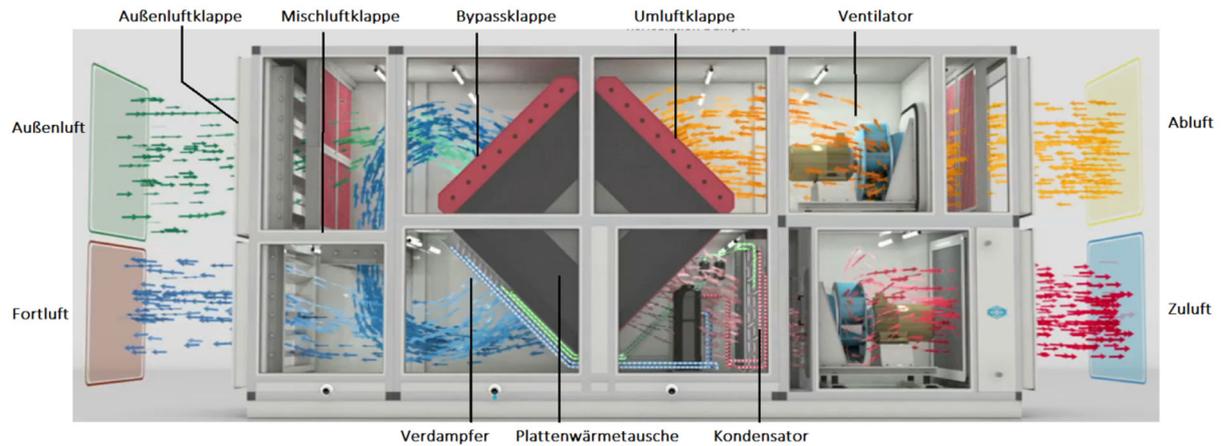


Abbildung 2-3: Entfeuchtung und Wärmerückgewinnung mittels Wärmepumpe

In Abbildung 2-3 ist eine Betriebsart dargestellt, wie sie typischerweise bei Außenlufttemperaturen zwischen 12 und 20°C gewählt wird. Bei reduziertem Außenluftvolumenstrom und aktiver Wärmepumpe wird ein Teilvolumenstrom der Abluft nach Wärmerückgewinnung und Verdampferregister dem Außenluftvolumenstrom über die Mischluftklappe zugeführt und dann, nach passieren des Plattentauscher im Kondensator wieder aufgeheizt. In diesem Betriebszustand kann die im Abluftvolumenstrom noch enthaltene Energie mit der Wärmepumpe genutzt werden, was zu einer höheren Wärmerückgewinnung führt.



Abbildung 2-4: Entfeuchten mittels Außenluft

Wenn keine Frischluftzufuhr und keine Entfeuchtung mittels Außenluft notwendig ist (z.B. im Nachtbetrieb), kann die Abluft über eine Umluftklappe direkt wieder in die Halle geleitet werden. Es ist auch ein Mischbetrieb möglich, so dass ein Teil der Abluft über den Plattentauscher geführt wird und Außenluft mit der Umluft nach dem Plattentauscher vor dem Kondensator gemischt wird.



Abbildung 2-5: Umluftbetrieb ohne Entfeuchtung

Der Wärmetauscher ist mit einer Bypassklappe ausgestattet, um den Plattenwärmetauscher im Sommerbetrieb zu umgehen, wenn keine Wärmerückgewinnung erforderlich ist.

Der Gesamtenergieverbrauch des RLT- Geräts besteht aus dem Stromverbrauch der Ventilatoren, der Einbauteile des Schaltschranks, der Wärmepumpe sowie dem Wärmeenergieverbrauch des Lufterhitzers.

In der Regellogik wird im Winter das Außenluftverhältnis verringert und die Entfeuchtung mittels Wärmepumpe sowie dem Öffnen der Mischklappe durchgeführt. Auf diese Weise wird die Wärmeenergie innerhalb der Halle erhalten, jedoch verbunden mit den Kosten für die Erhöhung des Stromverbrauchs. Wieviel Außenluft tatsächlich zugeführt wird ist unbekannt, da eine hinreichend genaue Bestimmung des Außenluftvolumenstroms bei gedrosselter Jalousienklappe nicht möglich ist (siehe Kapitel 2.4.3).

Im Sommer erfolgt die Entfeuchtung mit der Außenluft durch Reduzierung der Umluftanteils sowie Erhöhung des Außenluftanteils. Um zu vermeiden, dass sich die Halle im Sommer zu stark erwärmt, leitet die Bypassklappe den Luftstrom um den Wärmetauscher herum. Der Bypassvolumenstrom kann angepasst werden, so dass darüber die Solltemperatur in der Halle eingestellt wird.

Es steht zusätzlich ein Beckenwasserkondensator zur Verfügung, der zusätzlich zum Luft-Kondensator in der Zuluft eingesetzt werden kann, um die noch überschüssige Wärmeenergie der Wärmepumpe zu nutzen. Dadurch kann vermieden werden, dass die Hallentemperatur zu stark ansteigt. Leider konnte dieser Kondensator in die Untersuchungen nicht mit einbezogen werden, weil dieser durch eine Leckage der Wasserleitung zum Beckenwasserkondensator nicht nutzbar war.

Wenn man bedenkt, dass das RLT- Gerät zwei Energieträger für Heizzwecke und auch unterschiedliche Methoden der Entfeuchtung nutzt, ist klar, dass die wirtschaftlichste Betriebsart zum Heizen, Kühlen und Entfeuchten von der äußeren Witterung sowie den Preisen für thermische und elektrische Energie abhängt. Eine Änderung des Nutzungsverhaltens der Wärmepumpe und der Ventilatoren sowie die Verwendung unterschiedlicher Dämpfungssollwerte bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen können den Gesamtenergieverbrauch der RLT-Anlage effektiv beeinflussen.

Das RLT- Gerät wird derzeit mit einer SPS gesteuert (in der Klimabranche DDC genannt), welche verschiedene PI-Regler zur Steuerung von Zu- und Abluftvolumenstrom, Temperatur und Feuchte enthält, bei denen die Ablufttemperatur und Feuchte als Rückführung verwendet

werden. Es gibt zwei Einschränkungen, die als Sollwerte definiert sind: die Ablufttemperatur und -feuchte und eine minimale und maximale Zulufttemperatur, die nicht überschritten werden darf.

Es ist erkennbar, dass verschiedenste Betriebsmodi möglich sind, für die nicht ohne weiteres ermittelt werden kann, welcher den energieoptimalsten Betrieb in Abhängigkeit der Randbedingungen darstellt.

## 2.3 Entwicklung des Sensor- und Datenkonzepts

### 2.3.1 Gerätetests zur Ermittlung der Betriebsdaten

Wie bereits beschrieben handelt es sich bei dem für die Untersuchungen verwendeten Gerät um ein Schwimmbadentfeuchtungsgerät, welches im Jahr 2017 in der Gemeinde Saterland installiert wurde. Das Gerät ersetzte ein Bestandsgerät. Es wurde mit erweiterter Messtechnik ausgestattet, um das Gerät möglichst genau physikalisch zu beschreiben, siehe Kapitel 2.3.2.

#### 2.3.1.1 Ventilormessungen

Wenn das Gerät im real im Schwimmbad betrieben wird, ist die Genauigkeit der Volumenstrommessung sehr wichtig, um einerseits hinreichend genaue Messdaten zu gewinnen und andererseits im optimierten Betrieb das Gerät mit dem gewünschten Volumenstrom zu betreiben. Die Volumenstrombestimmung im Feld geschieht mittels Berechnung des Volumenstromes mit der in der Ventilatornabe gemessenen Druckdifferenz und dem sogenannten k-Faktor, den der Hersteller je Ventilator typ angibt, siehe Formel 1. Dementsprechend wurde vorab ein Abgleich zwischen Volumenstrommessung mittels Herstellerformel und hochgenauer Blendenmessung durchgeführt.

Es wurden sowohl der Zuluft- als auch der Abluft- Ventilator getestet. Über Druckaufnehmer in der Ventilatordüse wird der Differenzdruck in der Ventilatornabe gemessen. Aus dem gemessenen Druck und einem sogenannten vom Hersteller angegebenen k-Faktor (siehe oben) wird dann mittels der Formel:

$$\dot{V} = k * \sqrt{\Delta p}$$

*Formel 2-1: Gleichung zum berechnen des Volumenstroms*

der Volumenstrom des Ventilators errechnet.

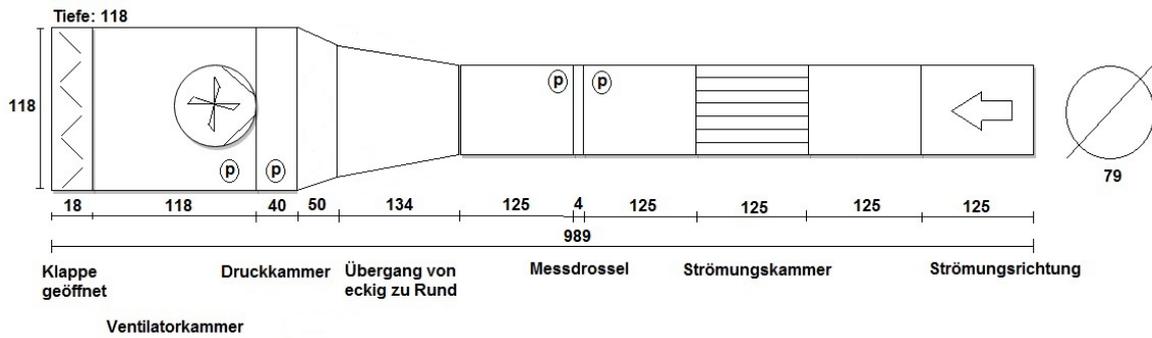


Abbildung 2-6: Messaufbau zur Überprüfung des Ventilator- Volumenstroms

In dem Messaufbau wird der Luftfluss durch die Messblende geleitet. In einer Strömungskammer wird die Luft größtmöglich von Verwirbelungen befreit und in eine Richtung gelenkt. Über eine geeichte Messdrossel wird mittels der Blendenformel der Volumenstrom in dem Rohr errechnet. Bei verschiedenen Ansteuerungen des Ventilators im Bereich von 0-100% (0-10V) wurden so die Volumenströme ermittelt und anschließend verglichen. (Abbildung 2-7)

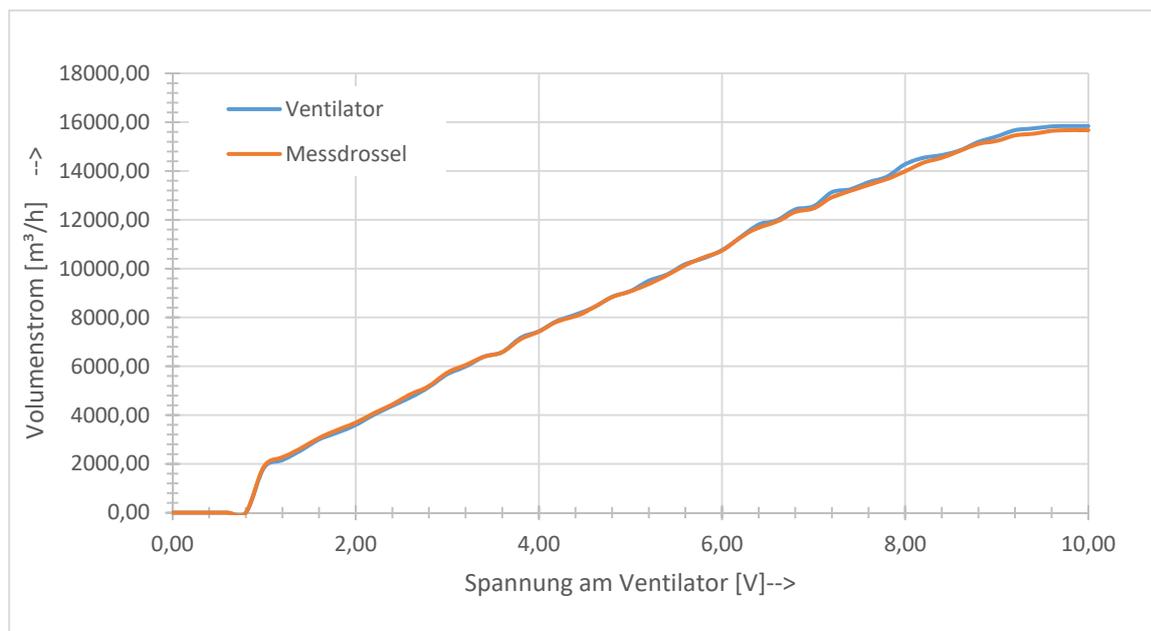


Abbildung 2-7: Vergleich der Messwerte Volumenstrom

Um nun den vom Hersteller angegebenen k-Faktor zu überprüfen, wurde mittels des berechneten Volumenstroms an der Messdrossel der k-Faktor zu jeder Messung neu berechnet. Die Abweichung des k-Faktors beträgt im Mittel nur 0,121% zu dem vom Hersteller angegebenen Wert. Somit kann die Volumenstrommessung über die Ventilatordüse im Gerät als hinreichend genau betrachtet werden, wobei natürlich die Einbausituation im Gerät zu weiteren Abweichungen führen kann, die hier nicht erfasst werden können.

### **2.3.2 Entwicklung und Integration eines Sensorkonzepts für das zu installierende RLT-Gerät im Feld**

Um die Regelstrategien des Projekts umsetzen zu können sowie die benötigten Daten aufzuzeichnen war es zwingend nötig, zusätzliche Sensorik im Gerät sowie in der Schwimmhalle zu installieren.

Zusammen mit der Hochschule wurde ein entsprechendes Konzept entwickelt, welches im Regelschema in (Anhang C) dargestellt ist.

Weiter wurde festgelegt, welche Daten außerhalb des Geräts noch erfasst werden müssen. Im Zuge dieser Überlegungen wurde im Eingangsbereich des Schwimmbads ein Personenzähler installiert. Zusätzlich zu den in der Schwimmhalle schon vorhandenen Temperatursensoren wurden 2 weitere Temperatur- Feuchtesensoren in der Halle installiert. Da die Fensterseite der Halle auf der Südseite liegt und diese eine große Wärmebrücke darstellt, wurde an der Südseite außen an der Halle ein Sonnensensor installiert um die Wärmeeinstrahlung durch die Sonne zu messen. Eine weitere Wärmebrücke in der Halle bot die Glaswand zur Cafeteria, so dass zusätzlich in der Cafeteria ein Temperatursensor installiert wurde, um die Temperaturunterschiede zur Halle abbilden zu können. Zusätzlich zum schon vorhandenen Außenlufttemperatursensor wurde noch ein Außenluftfeuchtesensor installiert.

Das Steuerungsprogramm wurde nach HANSA Standards programmiert und das Gerät damit betrieben. Im Verlauf des Projektes ergab sich die Notwendigkeit zur Installation weiterer Sensoren, um die Modellierung durchführen zu können bzw. ein besseres Gesamtbild des Gerätebetriebes zu erlangen. In die Schwimmhalle wirken zwei Lüftungsgeräte, die nicht zusammenarbeiten. Somit mussten wir die andere Anlage als Störungsquelle betrachten. Um die Störung (Luftmenge, Temperatur, Feuchte) des Geräts zu erfassen wurden diese Daten mittels Datenverbindung ebenfalls aufgezeichnet.

### **2.3.3 Gerätemonitoring eines Schwimmbadentfeuchtungsgeräts im Feld.**

Um die Daten nutzbar zu machen, wurden alle Sensordaten an eine zusätzliche Steuerung übermittelt. Diese diente außerdem als Gateway für die im späteren Verlauf entwickelten optimierten Regelstrategien.

Um die Daten abzurufen und aufzuarbeiten wurde das Lüftungsgerät an das Netzwerk der Schwimmhalle angebunden. Über ein VPN- Tunnel konnten dann die Daten von der Steuerung auf einen PC im Firmensitz geladen werden. Hier wurden mittels diverser Auswerteprogramme die Daten aufbereitet und visualisiert.

Im Zuge des Projekts wurde die notwendige Speicherrate der Messdaten überprüft. Es sollte ermittelt werden, mit welcher minimalen Speicherrate die Trends hinreichend genau abgebildet werden.

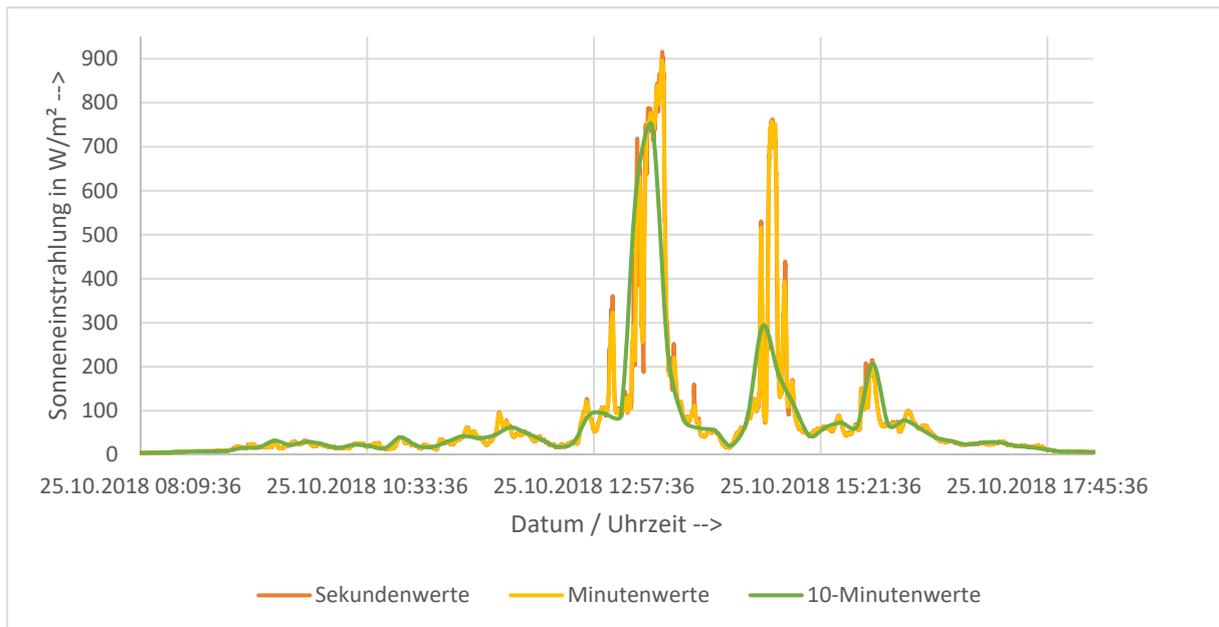


Abbildung 2-8: Prüfung der Messintervalle

In Abbildung 2-8 sind drei Trends für Abtastraten von 1 Sekunde, 1 Minute und 10 Minuten dargestellt. Es ist zu sehen, dass bei einem Messintervall von 10 Minuten einige Zustände verloren gehen, jedoch bei einem Intervall von einer Minute hinreichend genügend Daten aufgezeichnet werden. Somit wurde die Taktfrequenz der Aufzeichnung im Programm auf 1 Minute eingestellt. Es werden damit 144000 Werte pro Tag aufgezeichnet. Wir haben in einem Jahr 52.560.000 Daten erzeugt und gespeichert.

Um diese Daten auswertbar zu machen wurden Sie in Diagrammen dargestellt. Bei der Masse an Daten war schnell klar, dass nicht alle Daten als Bezug verwendet werden können. Der Schwerpunkt wurde somit auf die Maxima, Mittelwerte und Häufigkeitsverteilung der einzelnen Datensätze gelegt. Um zu sehen in welchem Betriebspunkt gearbeitet wird, wurden Häufigkeitsverteilungen grafisch dargestellt. Beispielhaft sind diese Ansätze in den Abbildungen (und Abbildung 2-10) zu sehen. In Abbildung 2-9 z.B. ist zu erkennen, dass der Zuluftventilator vornehmlich bei hohem Volumenstrom betrieben wird.

Aus der Analyse der Daten konnten Optimierungsansätze für die vorhandene Regelung ermittelt werden, siehe Kapitel 2.5.

## Elektrische Leistung Zuluftventilator / 04.09.2019 - 09.09.2019

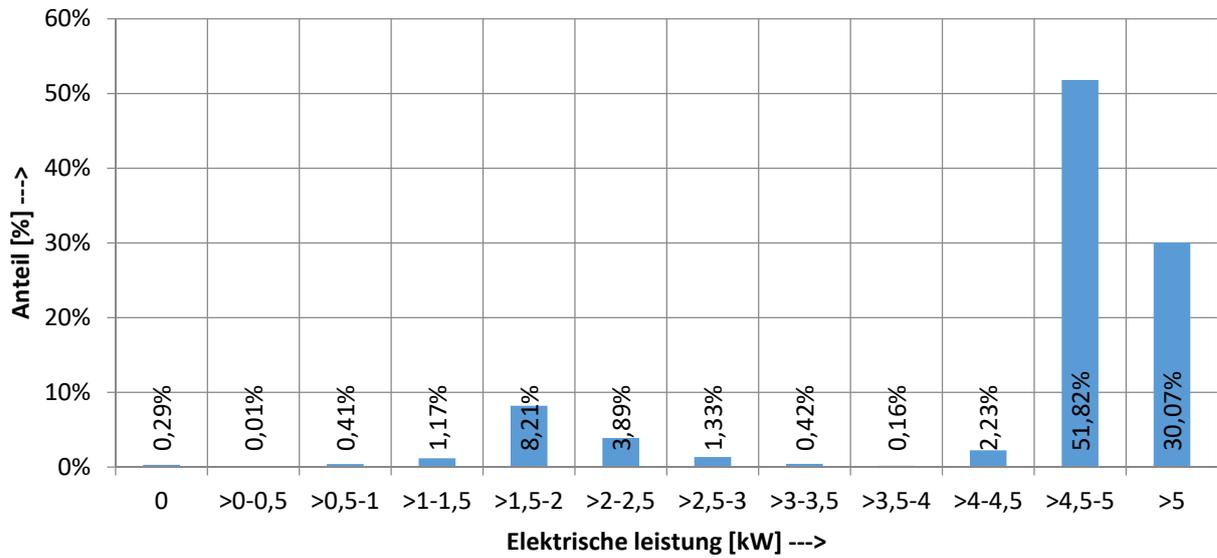


Abbildung 2-9: Häufigkeitsverteilung der Leistung vom Zuluftventilator

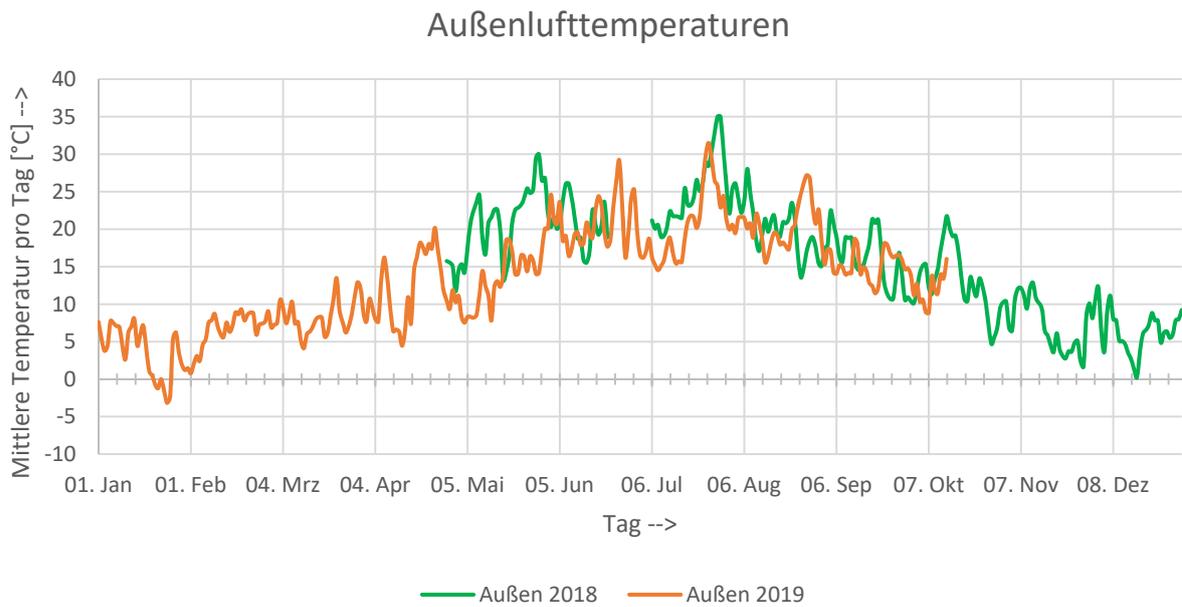


Abbildung 2-10: Mittelwert der Außenlufttemperatur

## 2.4 Konzeption und Erstellung des Geräterechners

### 2.4.1 Motivation

Zur Abbildung einer selbstlernenden Regelung, egal mit welchem Ansatz, ist eine grundlegende Beschreibung des Gerätes notwendig. Dieses beinhaltet die Grundstruktur des Gerätes sowie eine grundsätzliche thermodynamische Beschreibung, möglichst mit erster grundsätzlicher Identifizierung der Zusammenhänge zwischen Betriebsart und globaler Optima. Globale Optima beschreiben dabei die Betriebsweise, mit der unter Einhaltung der geforderten Luftbedingungen bei verschiedenen äußeren Randbedingungen möglichst wenig Energie verbraucht wird.

Die Hochschule Emden verwendet zur Modellierung des Gerätes Matlab Simulink, siehe Kapitel 2.6.3 und 2.6.5. Zur thermodynamischen Beschreibung werden einerseits experimentelle Daten verwendet, gewonnen in der HANSA Messhalle, sowie direkt am Gerät im Betrieb. Andererseits können Daten mit Berechnungstools der Hersteller generiert werden, z.B. für das Wärmerückgewinnungssystem.

Dieser Ansatz ist im Rahmen dieses Vorhabens absolut richtig, da exemplarisch für ein fest vorgegebenes Gerät selbstlernende Regelungsansätze realisiert werden sollen. Dafür ist Matlab/Simulink genau das richtige Tool.

Dieser Weg ist aber aufwändig und komplex und müsste für unterschiedliche Gerätetypen jeweils wieder komplett neu durchlaufen werden.

Deshalb ist es notwendig eine Möglichkeit zu schaffen, mit der Geräte unterschiedlichster Ausführung quasi automatisch modelliert werden und anhand dessen thermodynamische Daten gewonnen werden können.

Die Geräteauslegung erfolgt bei HANSA mit dem Konfigurationsprogramm „Aircalc“. In diesem Programm wird das Lüftungsgerät bereits vollständig konfiguriert und vorgegeben. Alle Sektionen werden mit den entsprechenden Komponenten ausgewählt und gemäß der bekannten Randbedingungen ausgelegt.

In Aircalc erfolgt auch eine Berechnung der thermodynamischen Auslegungsgrößen, allerdings bei komplett geöffneten Außen- und Fortluftklappen. Bypass- Umluft und Mischluftklappen sind geschlossen. Es wird mit dem Nennvolumenstrom gerechnet unter Aufprägung von Min-/Max Bedingungen entsprechend Sommer/Winter. Dazu sind im Aircalc die oben genannten Berechnungsmodule der Hersteller komplett hinterlegt.

Somit liegt es nahe, das im Haus vorhandene Konfigurationsprogramm so zu erweitern, dass für unterschiedlichste Randbedingungen und verschiedene Geräte die thermodynamischen Berechnungen durchzuführen sind. Siehe dazu Abbildung 2-3, Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5. Die Vorteile liegen auf der Hand: Wenn ein Gerät ohnehin schon in Aircalc abgebildet ist, sollte

dieses auch als Basis für den Gerätetrechner benutzt werden. Dann muss nicht mehr für jedes Gerät eine aufwändige Modellierung vorgenommen werden. Vorab könnten dann mit diesem Modell Parametervariationen gerechnet werden. Mit diesen können dann Optimierungsbereiche identifiziert werden.

## 2.4.2 Modellerstellung

Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, soll das Konfigurationsprogramm Aircalc so erweitert werden, dass es als Gerätetrechner verwendet werden kann.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass Aircalc kein Simulationsprogramm ist und Berechnungen nach einem bestimmten Schema ablaufen.

Im ersten Schritt muss das Gerät analysiert werden: Wo teilen sich Luftströme, wo sind Klappen verbaut, an welcher Stelle sitzen die Ventilatoren.

Dazu wird das Gerät segmentweise analysiert. In Abbildung 2-11 ist dieses für das im Vorhaben verwendete Gerät dargestellt.

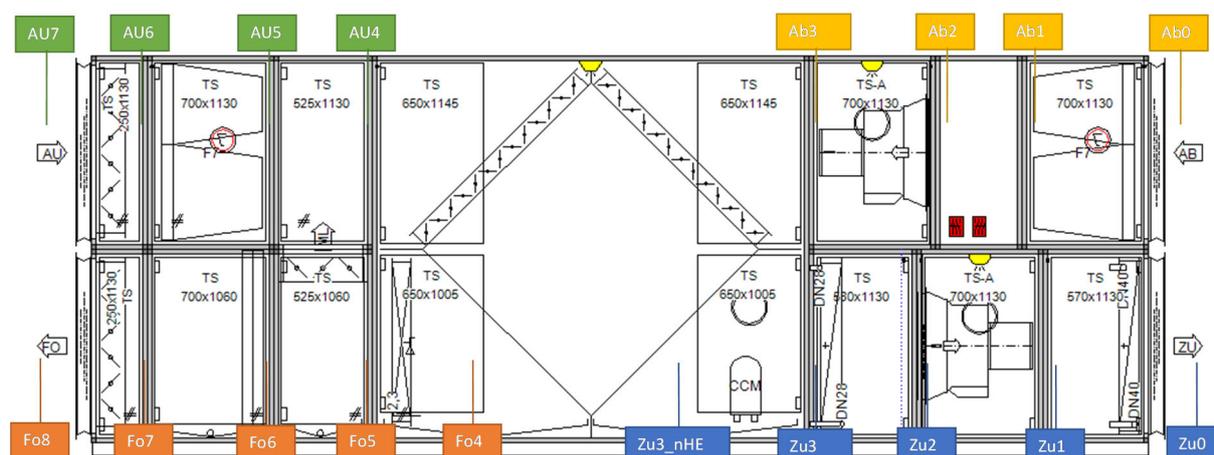


Abbildung 2-11: Segmentierung des Aircalc Gerätes

Beispielhaft kann mit dem Abluftstrang und Ab0 gestartet werden. In der folgenden Sektion ist eine Komponente verbaut, aber keine Luftabzweigung. Also bleibt der Volumenstrom konstant, aber der Druckverlust wird sich ändern in Abhängigkeit der Filterbeladung und des Volumenstromes. Von Ab1 nach Ab2 ist eine Leerkammer. Hier findet idealisiert keine Änderung statt. Die Ventilatorkammer stellt ein Hauptelement des Stranges dar. Wie in einem Stromkreis sitzt hier die Energiequelle, die für die Luftförderung sorgt. Die Ventilatoraten können aber erst berechnet werden, wenn der Druck in Ab2 und Ab3 bekannt ist.

In der WRG (Wärmerückgewinnung) Sektion ist eine Jalousieklappe als Umluftklappe verbaut. Hier könnte ein Öffnungswert aufgeprägt werden, mit dem dann berechnet werden muss, welcher Anteil des Volumenstromes nicht durch den Plattentaucher strömt. In dieser Art muss dann das gesamte Gerät analysiert werden.

Im Endeffekt entsteht dann ein vereinfachtes Ersatzmodell wie in Abbildung 2-12 dargestellt (im Vergleich siehe auch Abbildung 2-24 – Modell in Matlab Simulink). Wie in einem elektrischen Schaltbild werden die Komponenten mit Druckverlust als Widerstände dargestellt. Der Druckverlust ist in der Regel je Komponente eine Funktion des Volumenstromes. Im Vergleich zum reinen Gerät wurde das Schaltbild um die jeweiligen Anschlusskanäle erweitert, die ja auch einen von der Geometrie und dem Volumenstrom abhängigen Druckverlust aufweisen. Zu- und Abluftseitig wird aus einem großen Raum angesaugt/eingeblasen. Idealisiert kann dieses als Verbindung ohne Widerstand aufgefasst werden. Dieses gilt auch für Außen/Fortluft.

Hier dargestellt sind jeweils die beiden Volumenströme Außenluft – Zuluft und Abluft – Fortluft wie sie im Aircalc bei geschlossener Umluft und Mischluftklappe für die Auslegung der Komponenten sowie die thermodynamischen Größen betrachtet werden.

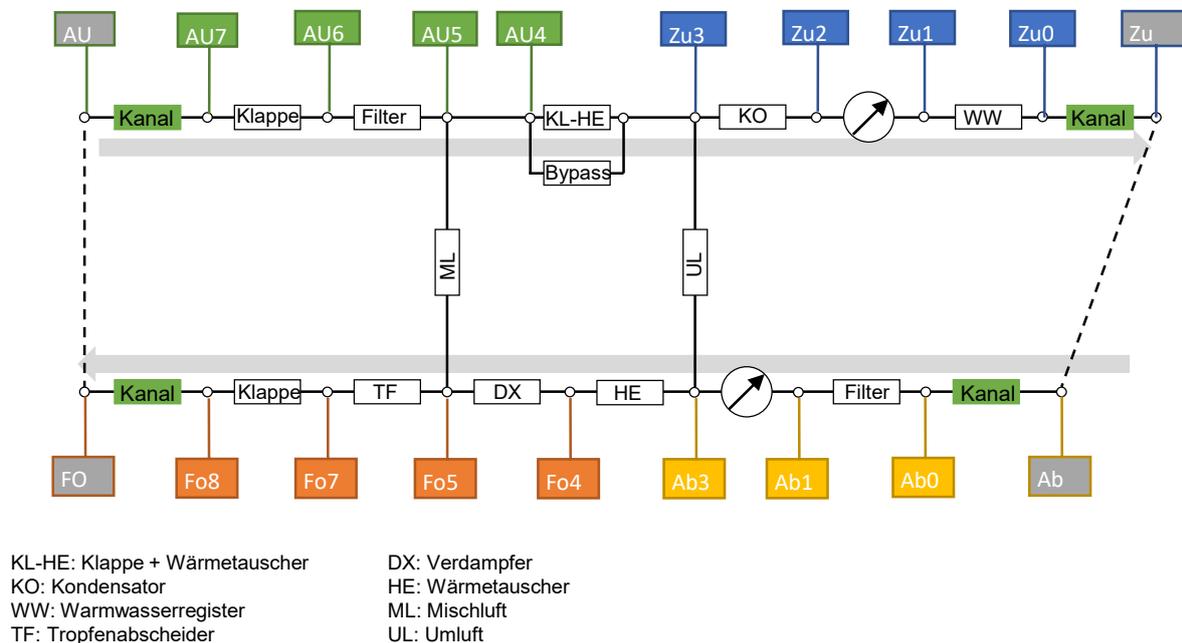


Abbildung 2-12: Ersatzschaltbild untersuchtes Entfeuchtungsgerät

Wenn diese Klappen geöffnet werden, stellen sich komplett andere Bedingungen im Gerät ein, siehe (Abbildung 2-13).

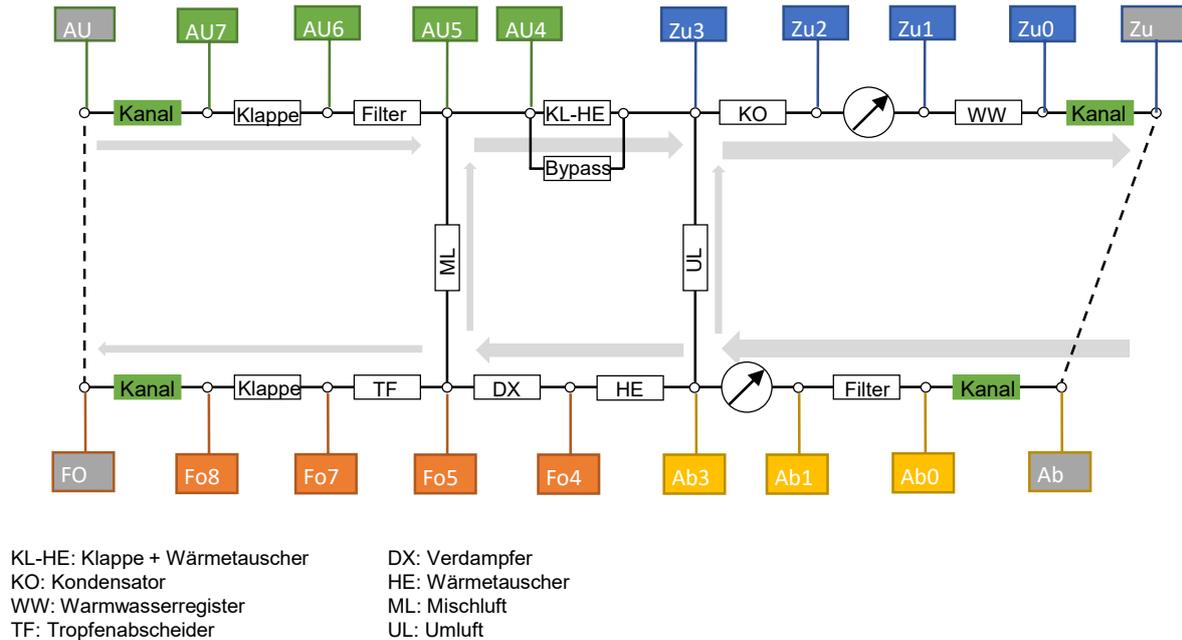


Abbildung 2-13: Ersatzschaltbild mit Volumenstromaufteilung bei geöffneten Mischluft und Umluftklappen

Jetzt können die resultierenden Volumenströme nach Ab3 bzw. Zu3 nur iterativ bestimmt werden, da der Volumenstrom, der über die Umluft- oder Mischluftklappe fließt, eine Funktion der Klappenöffnung sowie des Druckverlustes über der Klappe ist, der Druckverlust sich aber wiederum in Abhängigkeit des Volumenstromes einstellt. Mit einem Programm wie Matlab Simulink ist dieses ohne Probleme zu lösen. Mit dem im Aircalc aufzusetzenden Geräterechner muss dieses aber unter Berücksichtigung der Programmstruktur neu programmiert werden. Weiterhin wird bei der Betrachtung des Schaltbildes klar, dass die im Gerät verbauten Klappen einen essentiellen Einfluss auf die sich einstellenden Volumenströme haben. Daher müssen diese Klappen möglichst genau beschrieben werden. Es muss sowohl möglich sein, anhand der Klappenstellung sowie der herrschenden Druckdifferenz den Volumenstrom zu berechnen als auch mit einem vorgegebenen Volumenstrom und wiederum der Klappenstellung den Druckverlust zu bestimmen. Hierzu gibt es noch keine verfügbaren Ansätze, so dass einiger Aufwand in die entsprechende Modellierung gesteckt wurde.

### 2.4.3 Modellierung Jalousieklappen

Jalousieklappen werden in unterschiedlichster Größe in RLT Geräten eingesetzt. Es sollen Funktionen ermittelt werden, mit denen möglichst allgemeingültig

$$\dot{V} = f(\Delta p) \text{ und } \Delta p = f(\dot{V})$$

Formel 2-2: Gleichungen zum Berechnen von Volumenströmen und Druckdifferenzen über Klappen

berechnet werden können.

Der grundsätzliche Aufbau der betrachteten Jalousieklappen ist in Abbildung 2-14 und Abbildung 2-15 skizziert.

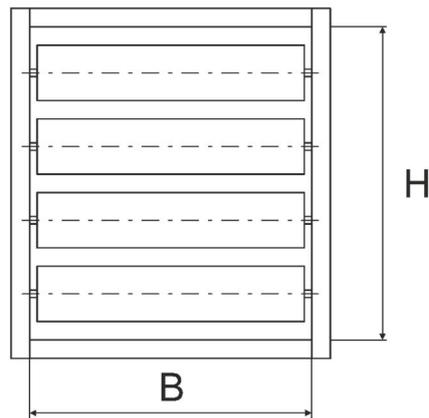


Abbildung 2-14: Jalousieklappe Frontansicht

Eine Jalousieklappe kann als adiabate Drossel betrachtet werden. In Abhängigkeit der Klappenstellung und somit der zu passierenden Fläche wird die Luft gedrosselt. Die Fläche ist eine Funktion der Gesamtbreite  $B$  und Höhe  $H$  sowie des Anstellwinkels der Lamellen. Der Druck vor der Drossel/Jalousieklappe ist immer höher als nach der Drossel, die Geschwindigkeit sollte idealerweise im beruhigten Strömungsquerschnitt vor und nach der Drossel gleich sein, weil der Volumenstrom konstant ist. In Lüftungsgeräten ist dieses, bedingt durch den begrenzten Bauraum und die jeweilige Einbaulage der Klappen im Gerät, nicht der Fall. Je weiter die Klappen geschlossen werden, desto höher sind die Drosselwirkung und dementsprechend auch der Druckverlust. Die Abhängigkeit zwischen Geschwindigkeit/Volumenstrom und Druckverlust ist quadratisch.

Diesen Effekt macht man sich auch bei der Volumenstrommessung mittels einer Blende oder auch bei Ventilatoren zu nutze. Vereinfacht können jeweils Volumenstrom und Druckverlust berechnet werden mit:

$$\dot{V} = \alpha \cdot \sqrt{\Delta p} \text{ und } \Delta p = \frac{\dot{V}^2}{\alpha^2}$$

Formel 2-3: Berechnung von Volumenstrom und Differenzdruck mittels Messblende

Wobei in  $\alpha$  (im Folgenden als Durchflussbeiwert bezeichnet) vereinfachend alle weiteren Faktoren zusammengefasst sind, die einen Einfluss auf die Abhängigkeit Volumenstrom zu Druckdifferenz haben können: Reynoldszahl, Drosselgeometrie, Fluidkenngrößen.

Da der hier definierte Durchflussbeiwert auch von der Reynoldszahl und der Drosselgeometrie abhängt, kann es für eine Jalousieklappe nicht nur einen Wert hierfür geben, da sich bei unterschiedlicher Ansteuerung sowohl die Geometrie als auch die Reynoldszahl ändern. Es ist zu prüfen, ob zumindest für eine Klappenstellung ein Durchflussbeiwert ermittelt werden kann, der die obigen Abhängigkeiten hinreichend genau beschreibt.

Wenn für unterschiedliche Klappenpositionen ein Durchflussbeiwert ermittelt werden kann, so kann dann eine Funktion bestimmt werden, die die Abhängigkeit zwischen Durchflussbeiwert und Klappenansteuerung beschreibt.

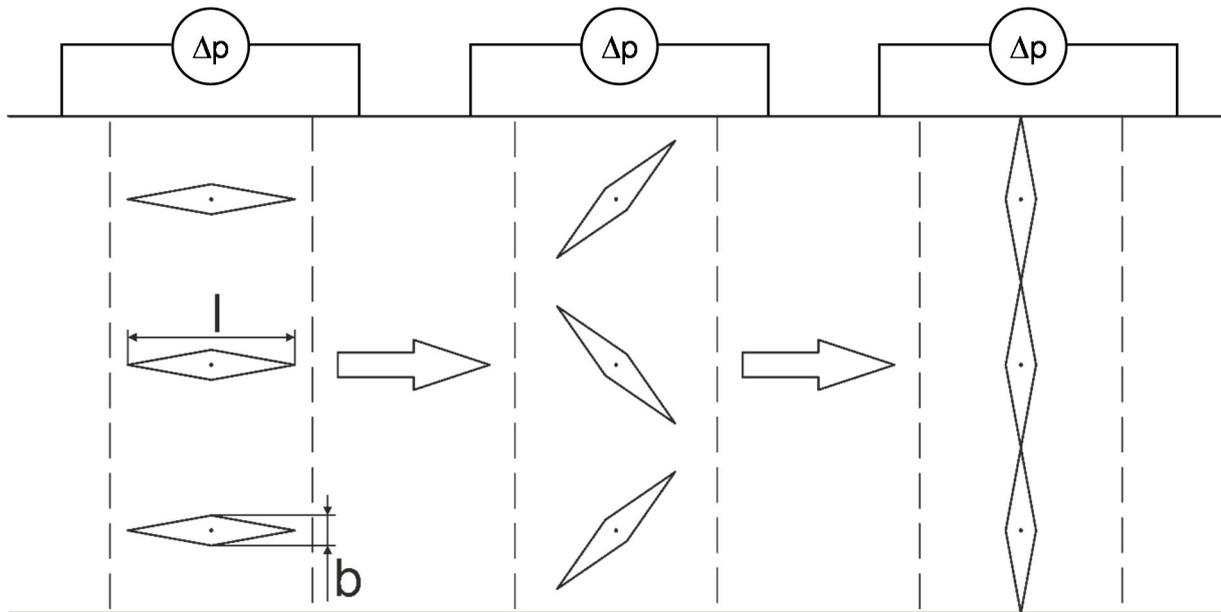


Abbildung 2-15: Jalousieklappe Seitenansicht

Da darüber hinaus eine möglichst allgemeingültige Beschreibung der Abhängigkeit Volumenstrom zu Druckverlust ermittelt werden soll, werden die obigen Formeln umgewandelt in:

$$v = \alpha_v \cdot \sqrt{\Delta p} \text{ und } \Delta p = \frac{v^2}{\alpha_v^2}$$

Formel 2-4: Geschwindigkeit- und Differenzdruckberechnung

Anstelle des Volumenstroms wird die Geschwindigkeit in die Formel eingesetzt. Hiermit ist die Geschwindigkeit im effektiven Öffnungsquerschnitt der Jalousieklappe gemeint. Somit kann dann, wenn die Geschwindigkeit anhand des Druckverlustes und dem zur Klappenöffnung gehörigen Durchflussbeiwertes berechnet wird, mit dem jeweiligen klappenspezifischen Öffnungsquerschnitte der Volumenstrom bestimmt werden.

#### 2.4.3.1 Prüfstandsuntersuchungen

Entsprechend obiger Ausführungen wurden detaillierte Messungen am HANSA Prüfstand durchgeführt. Es wurden drei geometrisch unterschiedliche Jalousieklappen vermessen. Die Jalousieklappen sind im Abluftkonditioniergerät als Außen-, Hallen- und Zuluftklappe in einem Kubus verbaut. Zusätzlich wurden die Druckmessungen bei der Außen- und Hallenluftklappe an unterschiedlichen Positionen durchgeführt, um den Einfluss der Messposition zu ermitteln. Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass mit Jalousieklappen der Volumenstrom in einem Bereich zwischen 20 und 60% Klappensteuerung geregelt werden sollte. Unter 20% ist in der Regel der Gradient zwischen Volumenstrom und Druckverlust sehr steil und nicht linear, über 60% kann die Klappe als bereits voll geöffnet betrachtet werden.

Darauf basierend wurde je Klappe in einem Bereich zwischen 20 und 60% Ansteuerung der Klappe bei jeweils konstanter Klappenstellung der Ventilator ab 20% bis 100% angesteuert bzw. bis sich eine maximale Druckdifferenz von etwa 300 Pa einstellt. Der Volumenstrom wurde mittels Druckmessung an den Ventilatorodüsen bestimmt. Die Volumenstrommessung

mittels Ventilatordüse wurde vorab mit einer hochgenauen Blendenmessung abgeglichen. Die maximale Abweichung der Messmethoden beträgt 1,6%.

Die Messabweichung der eingesetzten Druckdosen beträgt

$$\Delta p_K = 0,015 \cdot \Delta p + 0,003 \cdot \text{Messbereich} + 2,5 \text{ Pa}$$

Formel 2-5: Messabweichung der Messblende

Vor Start der Messungen wurde für die eingesetzten Druckdosen jeweils ein Offset durchgeführt.

Die Berechnung der Geschwindigkeit mittels des gemessenen Volumenstromes und der Klappenansteuerung geschieht wie folgt:

$$v = \frac{\dot{V}}{A_{KS}}$$

Formel 2-6: Luftgeschwindigkeit im Klappenquerschnitt

- $A_{KS}$  = effektive Öffnungsfläche der Jalousieklappe

$$A_{KS} = B \cdot (H - \cos(\beta)) \cdot l \cdot n$$

Formel 2-7: Berechnen der Klappenöffnungsfläche

- B = Innenbreite Jalousieklappe,
- H = Innenhöhe Jalousieklappe,
- $\beta$  = Öffnungswinkel der Jalousieklappe,
- l = Höhe der einzelnen Klappe,
- n = Anzahl der Klappen

$$\beta = 0,9 \frac{\circ}{\%} \cdot KS$$

Formel 2-8: Anpassung des Anstellwinkels zur Ansteuerung

- KS = Klappenstellung

Exemplarische Ergebnisse der Messungen sind im Folgenden dargestellt.

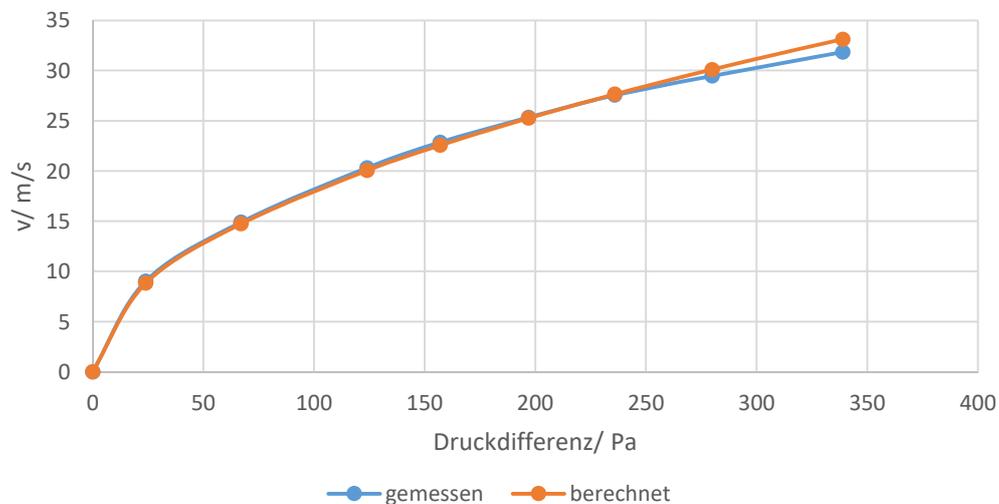


Abbildung 2-16: Klappenstellung 20% Zulufklappe – gemessene und berechnete Werte

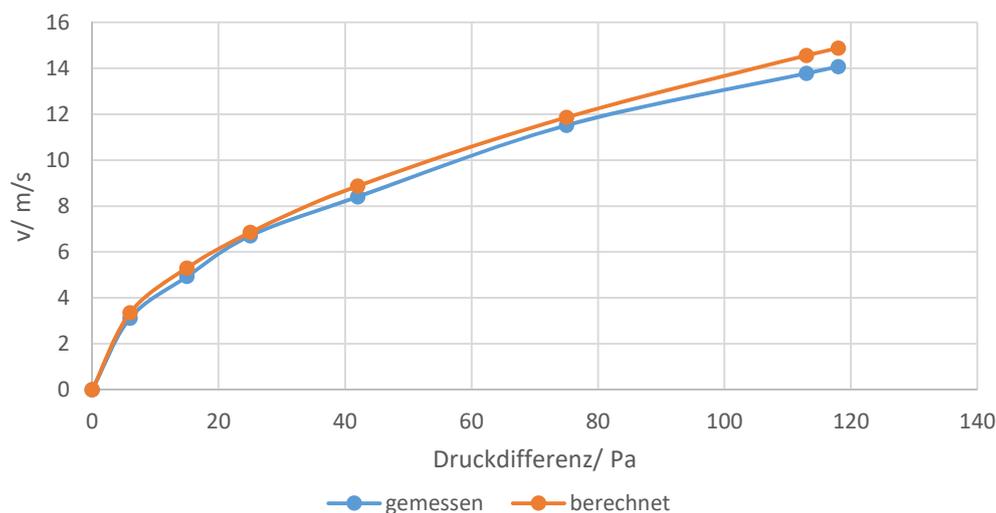


Abbildung 2-17: Klappenstellung 40% Zuluftklappe - gemessene und berechnete Werte

Exemplarisch sind hier die Ergebnisse der Zuluftklappe bei 20% und 40% Klappenstellung dargestellt. Bei 20% Klappenstellung und somit sehr weit geschlossener Jalousieklappe wird der gewählte Grenzwert von 300 Pa überschritten mit entsprechend auch hohen Geschwindigkeiten im Querschnitt der Jalousieklappe. Bei einer deutlich weiter geöffneten Klappe sind der Druckverlust und die Geschwindigkeit entsprechend niedriger, wobei die Ventilatoren im Endpunkt mit 100% angesteuert werden.

Gemäß obiger Formeln wurde für jede Klappenstellung der Durchflusskoeffizient mittels nichtlinearer Optimierung ermittelt. In den Abbildungen ist ebenfalls der mit diesem Wert berechnete Funktionsverlauf dargestellt. Die gemessenen Werte lassen sich mit der berechneten Funktion sehr gut beschreiben. Dieses gilt für alle Klappen und Klappenstellungen. Die maximale Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Wert über alle gemessenen Werte (158) beträgt 15% (vornehmlich im hohen Druck und Geschwindigkeitsbereich), die mittlere Abweichung 0,8%.

Wie vorab beschrieben, ist das Ziel, eine möglichst allgemein anwendbare Formel zur Bestimmung des Druckverlustes und des Volumenstroms von Jalousieklappen zu ermitteln.

Dementsprechend ist in Abbildung 2-18 der für alle Messungen ermittelte Durchflussbeiwert über der dimensionslosen Klappenfläche aufgetragen. Diese berechnet sich mit:

$$\Lambda = \frac{A_{KS}}{A_{JK}} = \frac{B \cdot (H - \cos(0,9 \cdot KS) \cdot l \cdot n)}{B \cdot H}$$

Formel 2-9: Durchflussbeiwert von Klappen

Die dimensionslose Öffnungsfläche der Klappe lässt somit einen direkten Vergleich der jeweiligen Durchflussbeiwerte unterschiedlicher Klappen (und Messpositionen) zu.

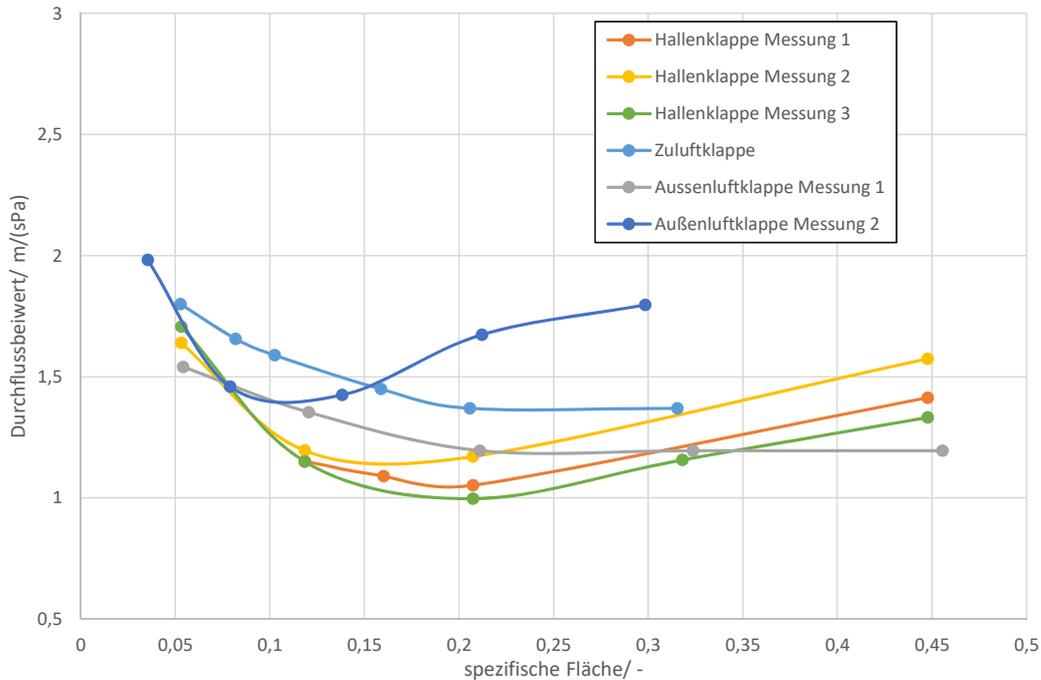


Abbildung 2-18: Abhängigkeit des Durchflussbeiwertes von der spezifischen Fläche der Jalousieklappe

Es lässt sich feststellen, dass der Durchflussbeiwert in Abhängigkeit der spezifischen Öffnungsfläche zwar eine ähnliche Charakteristik aufweist, die Werte aber doch einer nicht unerheblichen Streuung unterworfen sind.

Insbesondere die zwei Messungen an der Außenluftklappe zeigen, dass die Messposition der Druckdifferenz erhebliche Auswirkungen auf die Charakteristik des Durchflussbeiwertes haben kann. Bei der Messung 1 wurden die Druckbohrungen in einiger Entfernung von der Klappe im Kubus respektive im Kanal gesetzt, während bei der Messung 2 die Druckbohrungen direkt vor und hinter der Jalousieklappe angebracht waren.

Etwas anders stellt es sich bei den drei Messungen mit der Hallenluftklappe dar. Messung 1 bedeutet, dass die Druckmessbohrungen mit deutlichem Abstand zur Klappe angebracht wurden, Messung 2 unten an der Jalousieklappe selber und Messung 3 seitlich an der Jalousieklappe. Auch hier ist eine Differenz der Kurvenverläufe zu erkennen, die Charakteristik ist aber sehr ähnlich.

Die Werte der Zuluftklappe wiederum liegen in einem ähnlichen Bereich wie die der Hallenluftklappe bei aber etwas anderer Charakteristik.

Daraus wird folgendes abgeleitet:

- 1) Für den Geräterechner wird zur Bestimmung der Klappencharakteristik eine Näherungsformel verwendet, die die Charakteristik der Hallenluftklappe abbildet. Diese wird auch für die anderen Klappen verwendet.
- 2) Es ist dann zu berücksichtigen, dass für ein mit dem Geräterechner ermitteltes Optimum die dazugehörige Klappenstellung fehlerbehaftet ist. Dieses muss dann am realen Gerät mit der Regelung adaptiert werden (Vorgabe Sollwerte Klappenvolumenströme und Einregelung, dabei Beobachtung, ob sich die Optima verschieben)

- 3) Für reale Geräte können keine allgemeingültigen Funktionsgleichungen zur Bestimmung des Volumenstromes der Klappe ermittelt werden. Zu unterschiedlich sind Einbausituation, Position der Druckmessbohrungen und Klappengeometrie. Aber auf Basis der hier ermittelten Ergebnisse ist es möglich, diese Charakteristika je Klappe am realen Gerät mittels automatisierter Routinen direkt zu ermitteln. Dieses wird in Kapitel 2.5.5 beschrieben.

## 2.4.4 Umsetzung

Der grundsätzliche Aufbau des Modelles wurde beschrieben. Es folgt die Beschreibung, wie dieses unter Berücksichtigung der Eigenheiten im Aircalc umgesetzt wird.

Zunächst wurde der grundsätzliche Ablauf der Berechnungsfolge Excel abgebildet um zu prüfen, ob diese in Aircalc abbildbar ist und ob die Berechnung bei unterschiedlichen Klappenöffnungen iteriert (siehe Abbildung 2-13).

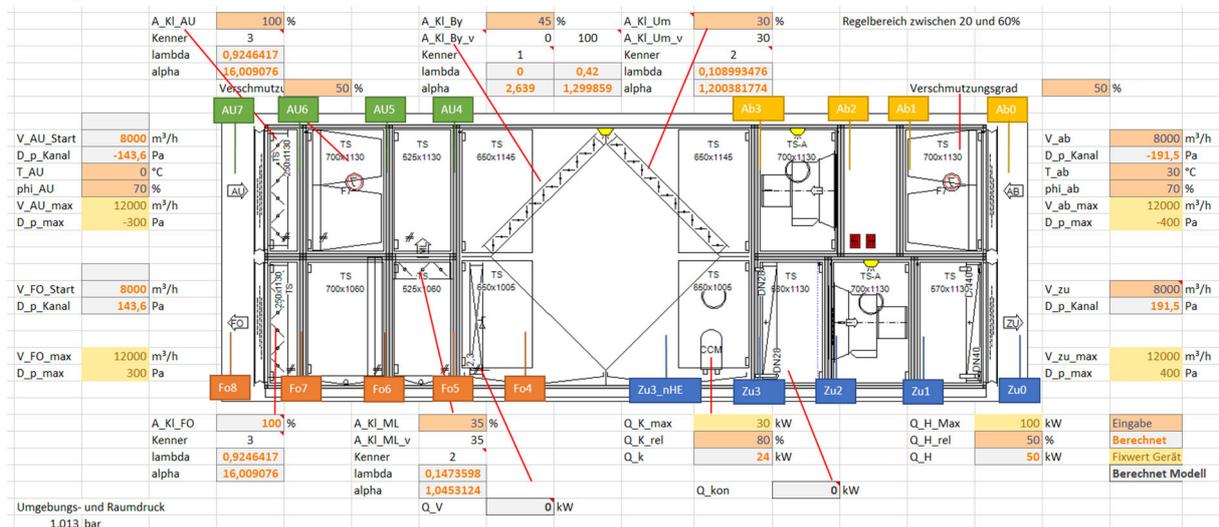


Abbildung 2-19: Abbildung des Geräterechners in Excel: Darstellung der Vorgabewerte

Der Geräterechner soll später so arbeiten, dass per Tabelle oder Einzelvorgabe folgende Werte (im Folgenden für das betrachtete Gerät) im Aircalc vorgegeben werden:

- Abluftvolumenstrom
- Zuluftvolumenstrom
- Ablufttemperatur und Feuchte
- Außenlufttemperatur und Feuchte
- Ansteuerung der Klappen
- Verschmutzungsgrad der Filter
- Leistung des Kältekreises
- Leistung des Warmwasserregisters (optional Berechnung der fehlenden Leistung um den Sollwert Zuluft zu erreichen)

Es soll berechnet werden:

- Elektrischer Energiebedarf Ventilatoren und Kältemaschine
- Wärmebedarf
- Zulufttemperatur und Feuchte

- Nachrangig: Temperaturen, Feuchten, Volumenströme und Druckdifferenzen im Gerät

Die Berechnung startet mit der Bestimmung der Volumenströme, ausgehend vom Zuluftvolumenstrom. Wenn eine Klappe geöffnet ist, wird zunächst als Startwert über einen linearen Ansatz der Klappen volumenström bestimmt. 20% Klappenöffnung ist dabei 0% Volumenstrom, 60% Klappenöffnung 100%.

Darüber hinaus müssen übergeordnete Abfragen durchgeführt werden: Wenn z.B. die Umluftklappe offen ist, muss die Bypassklappe geschlossen sein.

Mit den ermittelten Volumenströmen wird jetzt je Kontrollfläche die resultierende Druckdifferenz mittels der im Aircalc hinterlegten Komponentenprogramme berechnet (in Excel mit vereinfachten Modellansätzen). Mit diesen Druckwerten werden jetzt erstmals mit der in Kapitel 2.3.3.1 beschriebenen Berechnung die Klappen volumenströme bestimmt. Daran schließt sich wieder die Ermittlung der Druckverlust an usw. Wenn diese Berechnung ausiteriert ist, erfolgt die Berechnung der thermodynamischen Größen.

Die Abbildung dieses Modellansatzes in Excel war erfolgreich, die Berechnung der Volumenströme iteriert nach wenigen Schritten und zeigt plausible Ergebnisse.

Der grundsätzliche Geräterechner konnte in Excel mit vereinfachten Modellansätzen komplett abgebildet werden. Es konnten auch exemplarische Optimierungsrechnungen durchgeführt und am realen Gerät validiert werden.

Gemäß Projektantrag wurde untersucht, ob Optimierungsroutinen mit Design of Experiment, also im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung, durchgeführt werden konnten. Es zeigte sich aber, dass die Modelle zu komplex sind, die Realität nicht hinreichend genau beschreiben und ein entsprechender Ansatz nicht zielführend ist. Im Zuge weiterer Untersuchungen ist es daher notwendig, alternative Optimierungsalgorithmen für den Geräterechner zu entwickeln, weil die Berechnungszeit mit Aircalc später für die einzelnen Schritte lang sein wird.

Die grundsätzliche oben beschriebene Vorgehensweise wurde programmiert. Die Iteration ist möglich und Druck- Volumenstromwerte können berechnet werden.

## 2.5 Optimierung der konventionellen Regelung

Nachdem hinreichend Daten vorlagen, wurden diese visualisiert und analysiert. Es ergaben sich direkt Ansätze, die konventionelle Regelung schnell und kostengünstig anzupassen, um hier bessere Ergebnisse zu erreichen. Einige dieser Ansätze werden im Folgenden kurz erläutert.

### 2.5.1 Anpassung des Sollwertes für die absolute Luftfeuchtigkeit

Anhand der Datenanalyse wurde festgestellt, dass die Ventilatoren des untersuchten Gerätes fast ausschließlich mit Nennvolumenstrom betrieben wurden, teilweise unabhängig von den äußeren Randbedingungen. Dieses entspricht nicht den Vorgaben einer bedarfsgerechten Regelung mit möglichst niedrigem Volumenstrom und wurde eingehend untersucht.

Am Gerät werden die relative Abluftfeuchte und die Ablufttemperatur gemessen. Über die Formel wird anschließend die spezifische Luftfeuchtigkeit errechnet:

$$SF_{(r,TK)} = \frac{(0,622 \cdot \frac{DD}{p - (0,378 \cdot DD)})}{1000}$$

Formel 2-10: Formel zum Berechnen der spezifischen Luftfeuchtigkeit

mit:

- SF = spezifische Feuchte  $\frac{g}{kg}$
- p = aktueller Luftdruck in hPa
- DD = Dampfdruck in [hPa]
- SDD = Sättigungsdampfdruck

Laut Richtlinie soll der Wassergehalt bei einer Schwimmhallentemperatur von 30°C einen Wert von 17,2 g/kg trockener Luft nicht überschreiten. [5]

HANSA intern ist ein Grenzwert von 16 g/kg als Sollwert festgelegt. Damit soll eine hinreichende Sicherheit zum Richtwert eingehalten werden mit dem Ziel Kondensation um jeden Preis zu vermeiden.

Wird dieser Wert überschritten, so wird die Luftmenge erhöht, um diesen Wert zu erreichen. In der Schwimmhalle Ramsloh wurde dieser Sollwert allerdings so häufig überschritten, dass es dadurch vermehrt zu Ansteuerungen der Ventilatoren mit einer erhöhten Luftmenge kam. Dies führte dann dementsprechend zu erhöhten Stromaufnahmen. Durch Anpassung des Sollwertes auf 16,5 g/kg wird in der Regel mit niedrigerer Luftmenge gefahren mit entsprechender Reduktion der elektrischen Leistung. Dieses ist insofern auch kein Problem, als dass neue Gebäude mit einer deutlich besseren Isolierung ausgestattet sind und somit eine Kondensation an Fassaden oder Gebäudeteilen nicht auftreten sollte. Dieses Resultat wird jetzt bereits bei den von HANSA gefertigten und mit HANSA Regelung ausgestatteten Geräten eingesetzt.

Generell kann und sollte mit einer Feuchtigkeitschiebung gearbeitet werden, d.h. bei höheren Außentemperaturen kann ein höherer Feuchtesollwert zugelassen werden, bei niedrigeren Temperaturen ein entsprechend auch niedrigerer Feuchtwert. Überwacht werden kann dieses mit Temperaturmessungen an Stellen des Gebäudes wo die Kondensationsgefahr am höchsten ist. Dieses soll im Zuge des Nachfolgevorhabens implementiert werden.

## 2.5.2 Ansteuern der Mischluftklappe im Umluftbetrieb

Im Umluftbetrieb der Anlage wird die Abluft aus der Halle zu 100% über die Umluftklappe geführt, ggf. erhitzt und der Zuluft zugeführt (Abbildung 2-5). Da die Umluftklappe einen relativ geringen Strömungsquerschnitt aufweist, führt dieses zu einem höheren Druckverlust und somit einer höheren Leistungsaufnahme der Ventilatoren. Öffnet man in dieser Betriebsart zusätzlich die Mischluftklappe, leitet einen Teil der Luft über den Plattenwärmetauscher und der Mischluftklappe wieder der Zuluft zu, so entlastet man die Ventilatoren.

Die nun größere Fläche führt zu einem geringeren Druckverlust und somit zu einer reduzierten Leistungsaufnahme. Durch einen Test im Feld konnte dieses bestätigt werden. Wie in Abbildung 2-20 zu sehen erhöht sich im Umluftbetrieb mit geschlossener Mischluftklappe die Leistungsaufnahme mit zunehmendem Volumenstrom. Bei Nennvolumenstrom mit 12.000 m<sup>3</sup>/h können somit bis zu 500 W Leistung eingespart werden. Die Programmierung wurde angepasst, so dass die Mischluftklappe im Umluftbetrieb nun stets mit geöffnet wird.

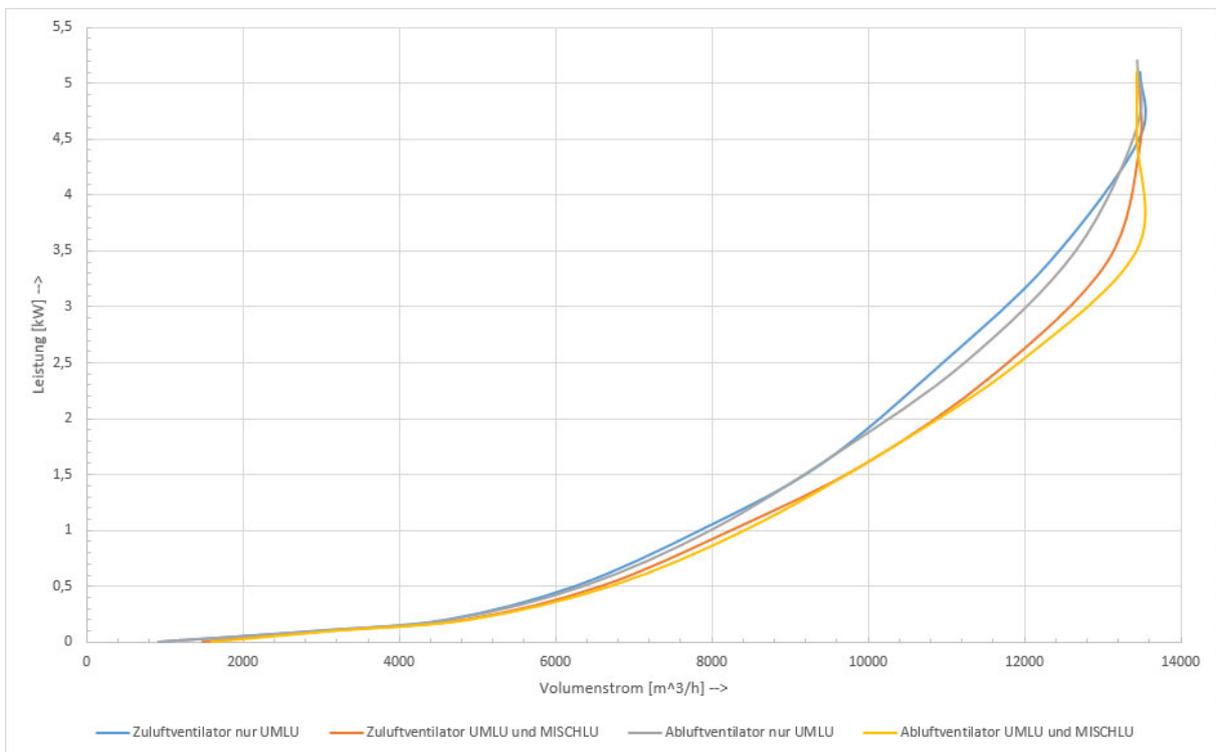


Abbildung 2-20: Leistungsvergleich der Ventilatoren bei geöffneter und geschlossener Mischluftklappe im Umluftbetrieb

## 2.5.3 Sensorüberwachung

Üblich ist es, dass die angeschlossenen Sensoren in Steuerungen überwacht werden. Dazu werden die empfangenen Signale (Werte) in der Steuerung überprüft und ausgewertet. Sollten die Grenzen der Sensoren erreicht werden, z.B. wegen eines Kabelbruchs oder Defekts des Sensors, generiert die Steuerung eine Sammelstörmeldung „Fühler defekt“. Falls diese Sensoren allerdings einen schleichenden Fehler entwickeln, bei dem Sie nur langsam aus ihrem logischen Messbereich driften, so wird dieses nicht erkannt. Es wurden also Überlegungen angestellt, wie man diese Fehler auffangen kann. Für jeden Sensor wurde zunächst ein Messbereich definiert in dem dieser Sensor, abhängig von der spezifischen Einbaustelle,

arbeiteten kann. Sollte dieser Messbereich verlassen werden und dieser Zustand länger anhalten, so muss ein driftender Fehler vorliegen. Es wurde im Steuerungsprogramm für jeden einzelnen Sensor Wartungsmeldungen programmiert, die eine Warnung generieren, sollte der Messbereich für einen längeren Zeitraum verlassen werden. Zusätzlich wurde die Sammelstörmeldung bei einem Sensordefekt aufgelöst und für jeden einzelnen Sensor eine Störungsmeldung erzeugt.

#### 2.5.4 Druckabgleich der Messeinrichtungen

Im RLT- Gerät sind an verschiedenen Stellen elektronische Druckmessumformer des Typs:

- HA-PTH-3502-DF (Druckmessumformer, 0-5000PA, Display, Durchflussmessung)

von der Firma:

- OJ Electronics

verbaut. Diese messen zum einen mehrere verschiedene Differenzdrücke und zum anderen punktuelle Drücke bezogen auf den Atmosphärendruck. Diese Messumformer neigen dazu ihren Nullpunkt zu verschieben. Ein Grund hierfür kann z.B. eine altersbedingte Drift der Sensoren sein. Um diese Sensoren abgleichen zu können und den Nullpunkt zu setzen, besitzen Sie einen Abgleichknopf, der manuell von Zeit zu Zeit betätigt werden muss. Dieser Abgleich wird üblicherweise bei Wartungsarbeiten an der Anlage durchgeführt.

Druckmessumformer an den Ventilatoren nehmen den Differenzdruck auf und in der Steuerung wird dieser dann mittels der Formel 2-2 in Volumenströme umgerechnet. Kommt es an diesen Messumformern zu Abweichungen des Messwerts, z.B. durch einen Nullpunktoffset, so ist auch die Volumenstromberechnung mit einem Fehler behaftet. Beispiel:

Korrektur Druckwert am Messumformer: 800 Pa

$$\dot{V} = k * \sqrt{\Delta p}$$

$$9843 \frac{m^3}{h} = 348 * \sqrt{800 Pa}$$

$$9848 \frac{m^3}{h} \approx 3,727 kW \text{ (Leistung Zuluftventilator)}$$

Fehler 1: -20 Pa

$$9719 \frac{m^3}{h} = 348 * \sqrt{780 Pa}$$

$$9719 \frac{m^3}{h} \approx 3,678 kW \text{ (Leistung Zuluftventilator)}$$

Fehler 2: +20Pa

$$9965 \frac{m^3}{h} = 348 * \sqrt{820 Pa}$$

$$9965 \frac{m^3}{h} \approx 3,771 kW \text{ (Leistung Zuluftventilator)}$$

Bei „Fehler 1“ wird die Ansteuerung der Ventilatoren erhöht, um den Sollwert darzustellen. So wird mehr tatsächliche Luftmenge in die Halle befördert, obwohl diese nicht benötigt wird. Der Energiebedarf steigt um ca. 50Wh.

Kommt es nun zu Fehler 2, so wird die Leistung der Ventilatoren verringert, um den Sollwert zu erreichen. Es wird weniger Luftmenge in die Halle befördert, was die Konditionen in der Halle verschlechtert.

Um den Fehler möglichst gering zu halten wurde eine Abgleichroutine programmiert. Mit dieser wird jeden Montag um 3.00 Uhr die Anlage für 6 min abschaltet. Nach dem Abschalten benötigt die Anlage eine Weile, bis sich die Luftströme beruhigt haben und ein Druckausgleich stattgefunden hat. Die angezeigten Druckdifferenzen (Fehler) werden anschließend gespeichert und vom aktuellen angezeigtem Wert subtrahiert. Somit wird gewährleistet, dass einmal wöchentlich ein Nullabgleich der Druckmessumformer stattfindet und der Fehler möglichst gering gehalten wird. Das Konzept wurde für alle Druckmessumformer in der Anlage umgesetzt.

### 2.5.5 Volumenstrombestimmung der Jalousieklappen am realen Gerät

Zur Darstellung einer optimierten Regelstrategie ist es essentiell, die Volumenströme über die Jalousieklappen bestimmen zu können. Nur so können für das Gerät optimierte Betriebspunkte in Abhängigkeit der geltenden Randbedingungen eingestellt und eingeregelt werden.

Wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben, ist es nicht möglich, eine allgemeingültige Formel zu bestimmen, mit der der Volumenstrom einer Klappe in Abhängigkeit der Klappenposition und des über der Klappe wirkenden Druckverlustes berechnet werden kann. Aus den Ergebnissen lässt sich allerdings ableiten, dass die Gleichung zur Berechnung des Volumenstromes am realen Gerät für jede Klappe adaptiert werden kann.

Der Ansatz hierfür lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\dot{V} = \alpha \cdot \sqrt{\Delta p} \text{ und } \alpha = f(KS)$$

*Formel 2-11: Ansatz zum Errechnen des Volumenstroms über Klappen*

d.h. der Volumenstrom kann mit dem am Gerät gemessenen Druckverlust und dem von der Klappenstellung abhängigen Durchflussbeiwert  $\alpha$  berechnet werden. Die Funktion  $\alpha = f(KS)$  ist je Klappe zunächst nicht bekannt, könnte aber ermittelt werden.

Dieses kann folgendermaßen realisiert werden, Beispiel Fort- und Außenluftklappe: Alle Um-Bypass- und Mischluftklappen im Gerät sind geschlossen. Die Fort- und Außenluft Jalousieklappe wird von 20 bis 60% in 5% -schritten geschlossen. Bei jeder Klappenstellung werden die Ventilatoren mit 75% angesteuert. Bei einem Druck  $>300$  Pa muss die Ansteuerung reduziert werden. Die Volumenströme werden über die Druckmessung in der Ventilatordüse bestimmt. Damit kann dann in jedem Punkt der Durchflussbeiwert mit  $\alpha = \dot{V} / \sqrt{\Delta p}$  berechnet werden. Dieser Werte werden in eine Matrix geschrieben, so dass bei Klappenstellungen, die zwischen zwei Stützstellen liegen, der Durchflussbeiwert interpoliert werden kann.

Es ist dafür an jeder Klappe die Druckdifferenz zu messen. Die Position der Druckbohrungen ist aber nicht so erheblich, weil der Einfluss unterschiedlicher Messpositionen über die Bestimmung des Durchflussbeiwertes ausgeglichen wird.

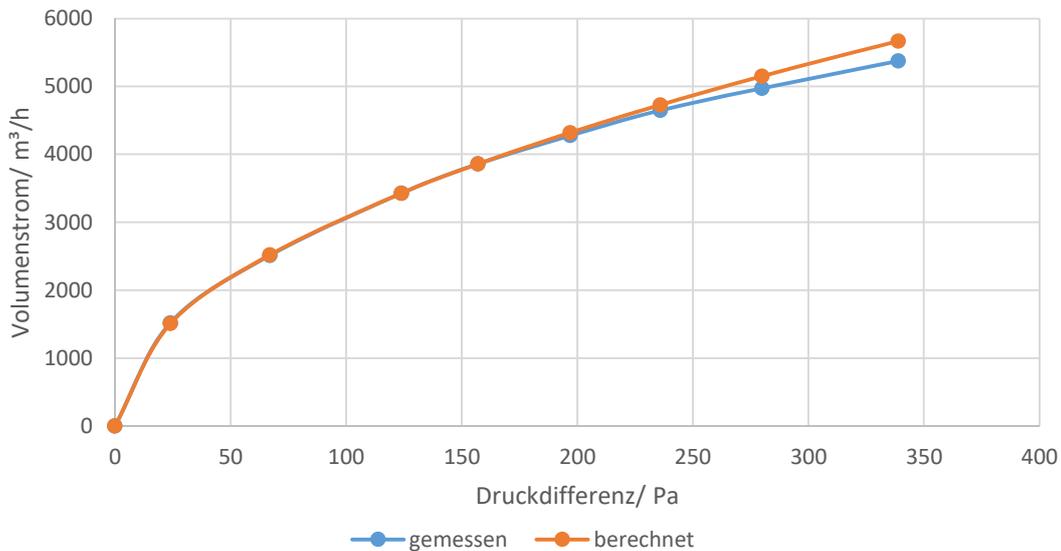


Abbildung 2-21: Volumenstrom über Druckdifferenz, Zuluftklappe HANSA Prüfstand 20% Klappenstellung

In Abbildung 2-21 ist für die im HANSA Prüffeld vermessene Zuluftklappe dargestellt, wie sich der auf dieser Basis berechnete Volumenstrom bei 20% Klappenstellung verhält.

Der Durchflussbeiwert wurde im Punkt 3585 m³/h, 157 Pa bestimmt. Die damit berechnete Volumenstromkurve zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten.

Die Ermittlung der Durchflussbeiwerte erfolgt über eine automatisierte Routine. Diese wird entweder bei Inbetriebnahme des Gerätes durchfahren oder im Ruhebetrieb des Gerätes, wenn keine Gefahr/Beeinträchtigung für die zu klimatisierenden Räume besteht. Hier wird die Adaption nachts durchgeführt.

Zusätzlich dazu können die Durchflussbeiwerte von Zeit zu Zeit überprüft und ggf. adaptiert werden. Ein Abgleich der zu unterschiedlichen Zeiten ermittelten Werte kann Indizien dafür liefern, ob Probleme mit dem Gerät oder der Messtechnik vorliegen, wenn z.B. eine kontinuierliche Drift erkennbar ist oder sehr große Abweichungen erkennbar sind. In diesem Fall erfolgt eine Alarmierung mit der Aufforderung, den Kundendienst zu informieren.

### 2.5.5.1 Ergebnisse des Testgerätes

An dem hier untersuchten Schwimmbadentfeuchtungsgerät wurde getestet, ob wie zuvor beschrieben die Klappencharakteristik ermittelt werden kann.

Dazu wurde für jede Klappe bei konstanter Klappenstellung der Volumenstrom über die Ansteuerung der Ventilatoren variiert und die Druckdifferenz gemessen.

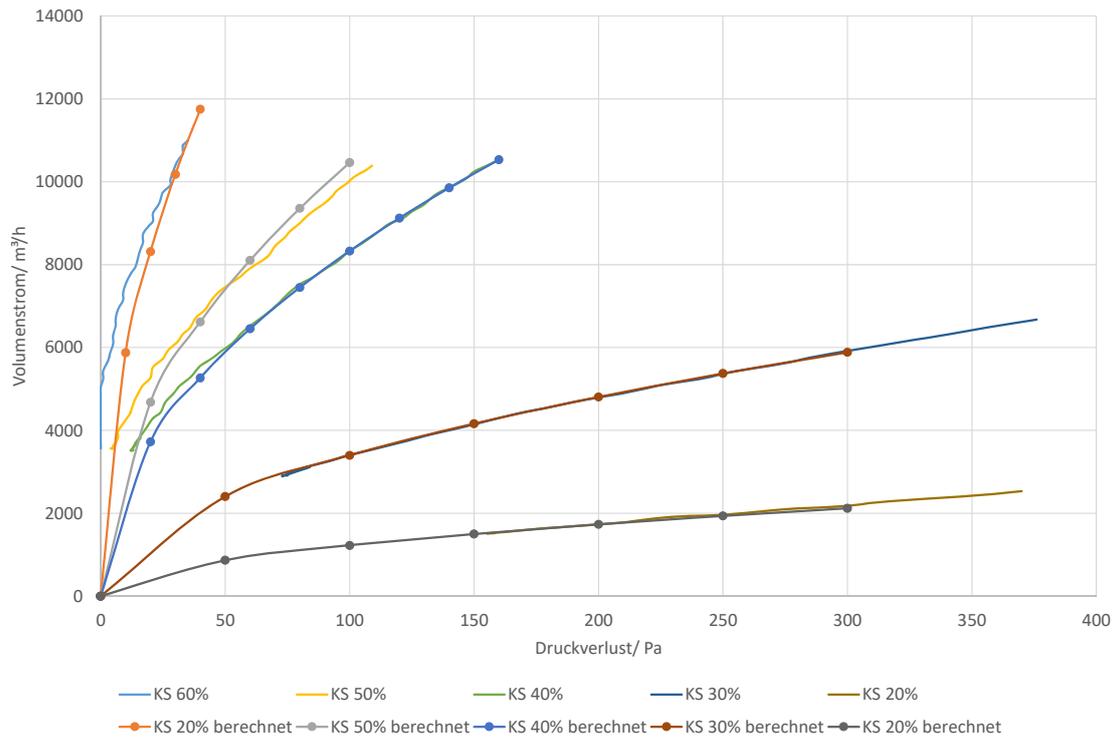


Abbildung 2-22: Volumenstrom über Druckverlust bei unterschiedlichen Klappenstellungen, Außenluftklappe

Die Ergebnisse der Außenluftklappe sind in Abbildung 2-22 dargestellt.

Zur Berechnung des Durchflussbeiwertes wurden unterschiedliche Kriterien eingesetzt. Bei 60% wurde der maximale Druckwert genommen, da bei sehr kleinen Druckdifferenzen der Messfehler am größten ist. Bei 50 und 40% wurde der Wert für 75% Volumenstrom berechnet. Bei den Klappenstellungen, wo der Grenzdruck 300 Pa überschritten wird, wurden die Werte bei halbem maximalen Druck verwendet.

Folgende Hauptaussagen sind zu treffen:

- Bei Klappenöffnung 60% ist wie zuvor beschrieben die Klappe als voll geöffnet zu betrachten. Es wirkt sich hier wahrscheinlich die Messgenauigkeit der Druckaufnehmer im niedrigen Druckbereich aus, so dass der berechnete Verlauf bei niedrigen Volumenströmen und somit niedrigem Druck stark abweichen.
- Bei allen anderen Klappenstellungen stimmen die berechneten und gemessenen Volumendruckwerte ziemlich gut überein.

Was an dieser Stelle noch nicht betrachtet wurde, ist die Klappenhysterese, d.h. wie sich die Werte ändern, wenn die Klappenstellung aus unterschiedlichen Richtungen angefahren wird. Dieses ist in weiteren Versuchen zu verifizieren.

Ansonsten ist diese Methode geeignet, um die Teilvolumenströme in einem Lüftungsgerät zu bestimmen.

Darauf basierend wird folgende Methode festgelegt, um automatisiert den Durchflussbeiwert für unterschiedliche Klappenstellungen zu bestimmen:

- 1) Klappenstellung 60% einstellen, Außen- und Fortluftklappe offen (sofern nicht zu vermessen), andere Klappen geschlossen (sofern nicht Zu- und/oder Abluftklappe vorhanden)

- 2) Ventilator von Mindestanforderung hochfahren, bis Differenzdruck 150 Pa erreicht wird oder 75% Nennvolumenstrom. Wenn bei 75% Nennvolumenstrom die Druckdifferenz < 50 Pa auf Nennvolumenstrom fahren.
- 3) Beharrungszustand ~5 min, dann messen, Werte speichern und Durchflussbeiwert in Matrix schreiben
- 4) Ventilator mit Mindestwert ansteuern, Klappenstellung +10%
- 5) Prozedur ab 2) wiederholen oder abbrechen, wenn bereits der maximale Differenzdruck erreicht ist.

## 2.6 Entwicklung eines physikalischen Modells und eines neuronalen Netzes

### 2.6.1 Motivation

Die Notwendigkeit der Auslegung einer MIMO-Prädiktivregelung ergibt sich aus der Tatsache, dass alle Regelparameter (Klappen, Ventilatoren, Wärmepumpe und Luftherhitzer) ihre eigene Wirkung auf die Endleistung des Systems haben. Daher stellt es eine Herausforderung dar, separate PI-Regler für verschiedene Parameter zu entwickeln und dennoch zu versuchen, die RLT-Anlage effizient zu betreiben. Mit der aktuellen Regelstrategie wäre es nicht möglich, den optimalen Betriebspunkt als Kompromiss zwischen menschlichem Komfort und Energieverbrauch zu finden. Der Einsatz einer MIMO-Vorhersage-Steuerung soll daher nicht nur zur Minimierung des Energieverbrauchs, sondern auch zu einer sanfteren Sollwertverfolgung beitragen, indem die Auswirkungen aller Regelparameter zusammen mit äußeren Störfaktoren wie Außenwetterlage, Sonneneinstrahlung und Anzahl der Personen in der Halle gleichzeitig berücksichtigt werden.

### 2.6.2 MIMO Predictive Control Layout

In der aktuellen DDC-Steuerung des RLT- Gerätes sind drei Parameter zu steuern, um die Halle in einem für den menschlichen Komfort gewünschten Zustand zu bringen. Hallentemperatur, Hallenfeuchte und Zulufttemperatur. Da es bei der Auslegung einer prädiktiven Steuerung vor allem darum geht, die optimale Betriebsart zu finden, wird der Energieverbrauch zu den drei vorangegangenen geregelten Parametern hinzugefügt.

Die MPC-Steuerung wird häufig als Hauptregler in einem Kaskadenregelungsschema verwendet, bei dem der MPC die Sollwerte für verschiedene PI-Regler, die als Sekundärregler arbeiten, vorgibt. In diesem Fall dient die MPC nur als Master-Steuerung zur Festlegung des Sollwerts für den Abluftventilator. Der Abluftventilator wird von einem PI-Regler gesteuert, welcher als Rückführung den vom MPC eingestellten Zuluftvolumenstrom empfängt. Der PI-Regler ist so eingestellt, dass kein Überdruck in der Halle entsteht. Für alle weiteren Regelparameter arbeitet die MPC-Steuerung jedoch als einzige Steuerung. Als Sollwerte nutzt die MPC die vom Betreiber definierten Parameter Hallenfeuchte und -temperatur sowie der auf ein Minimum eingestellte Energieverbrauch.

Es gibt acht Regelparameter oder manipulierbare Variablen, die durch einen Optimierungsalgorithmus berechnet werden können. Darunter befindet sich auch der Abluftventilator, da dieser von einem PI- Regler zur Aufrechterhaltung des Innendrucks in der Halle gesteuert wird und dem Zuluftventilator folgt. Die Außen- und Fortluftklappe ist ebenfalls von den Stellgrößen ausgeschlossen. Diese Klappen laufen proportional zur Umluft- und Mischklappe. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die MPC nie einen Zustand mit geschlossenen Klappen findet, die dem RLT- Gerät schadet. Außerdem reduziert es die Anzahl der Freiheitsgrade und erleichtert die Suche nach einer eindeutigen Lösung. Es werden noch weitere Einschränkungen definiert, z.B. dass sich die Bypassklappe bei geöffneter Umluftklappe nicht öffnet.

Regelbare Größen	Überwachte Größen
1-Bypass Klappe	1-Hallentemperatur
2-Umluftklappe	2-Hallenfeuchte
3-Mischluftklappe	3-Zulufttemperatur
4-Wärmepumpe	4-Energieverbrauch
5-Lufterhitzer	
6-Zuluftventilator	

Tabelle 2-1: Steuerbare / überwachte Variablen

### Manipulierbare Variablen

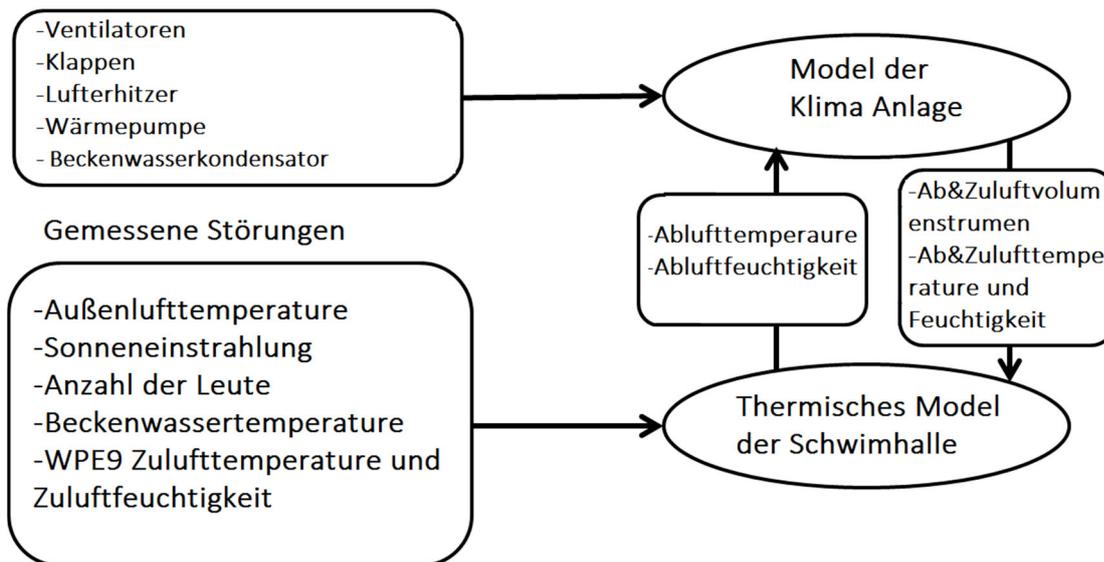


Abbildung 2-23: Ablaufdiagramm notwendige Modelle

Wie im Ablaufdiagramm zu sehen, sind für die Entwicklung des prädiktiven Steuerungssystems zwei dynamische Modelle erforderlich: Das Modell des RLT- Gerätes und das thermische Modell des Gebäudes. Das Modell des RLT- Gerätes empfängt die Steuerbefehle und berechnet die Zuluftkonditionen. Der Ausgang dieses Modells wird als Eingang für das Wärmemodell des Gebäudes verwendet. Das Gebäudemodell verwendet den Eingang des Geräts zusammen mit anderen Eingängen (gemessene Störungen), um die Hallenzustandsparameter zu berechnen. Die Leistung des Wärmemodells wird als Abluftzustand an das Gerätemodell zurückgegeben. Die Details der Modelle werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

### 2.6.3 Entwicklung eines physikalisch basierten Gerätemodells

In den letzten zehn Jahren wurden verschiedene Simulationsmodelle für die Bereiche Heizung, Lüftung und Klima (HVAC) für verschiedene Zwecke entwickelt [6], [7]. In diesem Projekt wurde mit der Entwicklersoftware Matlab ein eigenes Modell entwickelt, denn wie bereits erwähnt, benötigen wir zunächst zwei Modelle, die dynamisch kommunizieren können. Zweitens sollte es möglich sein, dass das Modell auf die gewünschten Betriebspunkte linearisiert und als Zustandsraummatrix programmgesteuert dargestellt werden kann. Darauf

basierend werden Simulink-Modelle entwickelt, die von einem Matlab-Skript zum Entwurf einer prädiktiven Steuerung verwendet werden können.

### 2.6.3.1 Luftströmungsmodell

Die Durchflussmenge durch das RLT- Gerät kann durch Lösen eines Durchflussnetzes aus 8 Durchflusswiderständen und 2 Batterien in Analogie zu einer elektrischen Schaltung modelliert werden. Die Widerstände bilden dabei die Klappen und die Leckage durch das Gehäuse ab, die Batterien stellen die Ventilatoren dar.

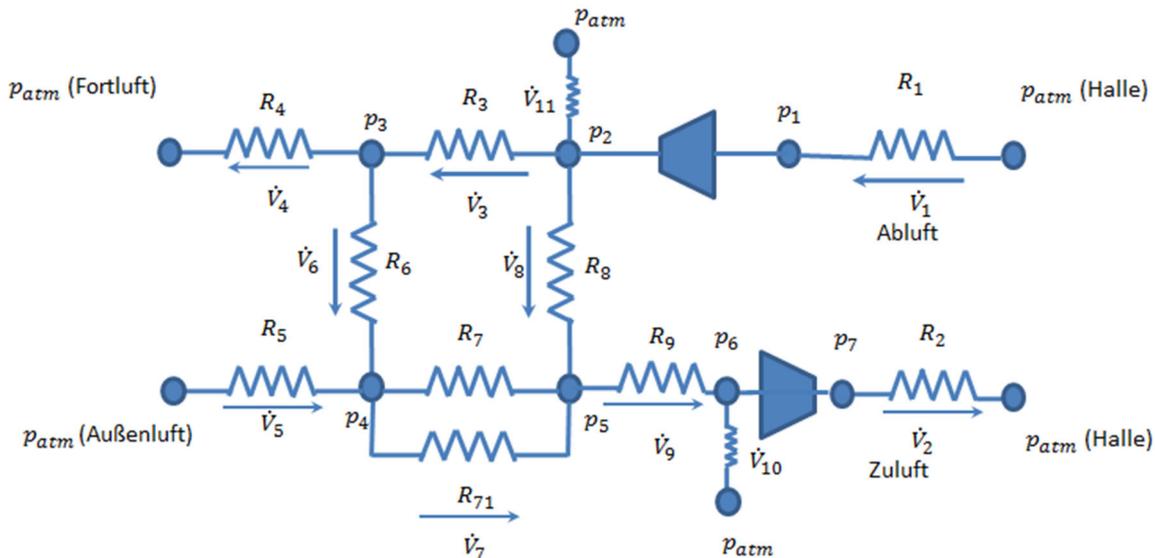


Abbildung 2-24: Lüftungsmodell als Widerstandsnetzwerk

Das Strömungsnetzmodell besteht aus 4 Verbindungspunkten ( $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ,  $p_5$ ) und 9 Widerständen, wie folgt definiert:

- $R_1$  (Abluft- Einlasskanal und Abluftfilter),
- $R_2$  (Zuluft- Auslasskanal),
- $R_3$  (Plattenwärmetauscher-Abluftseite),
- $R_4$  (Fortluft- Auslasskanal, Tropfenabscheider, Verdampfer und Fortluftklappe),
- $R_5$  (Außenluft- Einlasskanal und Außenluftklappe),
- $R_6$  (Mischluftklappe),
- $R_7$  (Plattenwärmetauscher-Zuluftseite),
- $R_8$  (Umluftklappe),
- $R_9$  (Kondensator),
- $R_{71}$  (Bypassklappe).

Es gibt auch zwei Leckagen, die als gleichwertige Leckage des gesamten Systems angesehen werden. Eine befindet sich auf der Druckseite des Abluftventilators ( $\dot{V}_{11}$ ) und die andere auf der Saugseite des Zuluftventilators ( $\dot{V}_{10}$ ). Die Höhe der Leckage wird durch einige Experimente geschätzt.

Der Strömungswiderstand ist in Gleichung (Formel 2-12) [8] definiert (siehe auch in Analogie Formel 2-3).

$$\Delta p = R * \dot{V}^2$$

Formel 2-12: Strömungswiderstand

wobei  $\Delta p$  den Druckabfall über eine Klappe (bar) und  $\dot{V}$  den Luftvolumenstrom ( $\frac{m^3}{h}$ ) darstellt. Parallelwiderstände können mit der Gleichung (Formel 2-13) summiert werden. Die Kennlinie des Ventilators bezieht den Volumenstrom und die Ventilator Geschwindigkeit mit einer quadratischen Funktion in Gleichung (Formel 2-14) ein. Das Gleichungssystem wird mit der Kontinuitätsgleichung an jedem Kreuzungspunkt mit Gleichung (Formel 2-15) geschlossen.

$$R_{parallel} = \sqrt{\sum \frac{1}{R_i^2}}$$

Formel 2-13: Berechnung der Parallelwiderstände

$$\Delta p = f(\dot{V}, n)$$

Formel 2-14: Funktion Ventilator Kennlinie

$$\sum Q_i = 0$$

Formel 2-15: Kontinuitätsgleichung

Dies ergibt ein System aus 18 Gleichungen und 18 Unbekannten (Drücke und Durchflussraten), das in einem iterativen Algorithmus gelöst wird. Der Widerstand der Klappen und anderer Komponenten sowie die Kennlinien der Ventilatoren werden in einer Reihe von Experimenten ermittelt, die später kurz beschrieben werden.

Das Verfahren zur Lösung der Gleichungen ist wie folgt:

Basierend auf der Ventilator drehzahl wird ein Anfangsdurchfluss  $\dot{V}_{Abluft}$  und  $\dot{V}_{Zuluft}$  geschätzt. Ausgehend von den errechneten Durchflussmengen können alle Druckpunkte einschließlich Abluft- und Außendruck berechnet werden. Wenn alle Widerstandsparameter bekannt sind, gilt:

$$(p_{Fortluft}, p_{Außenluft}) = f(\dot{V}_{Abluft}, \dot{V}_{Zuluft})$$

Formel 2-16: Druckberechnung

Wenn  $\dot{V}_2$  konstant gehalten wird und der Abluftdruck Null ist, kann die obige Gleichung mit der Newton-Methode gelöst werden.

$$f(\dot{V}_{Abluft}) = 0$$

Formel 2-17: Newton Methode

Nachdem  $\dot{V}_{Abluft}$  berechnet wurde, wird es in Gleichung (Formel 2-16) ersetzt und  $\dot{V}_{Zuluft}$  wird nach der Newton-Methode berechnet, wobei der Eingangsdruck ( $p_{Außenluft}$ ) als Null betrachtet wird. Dieser Vorgang wird bis zum Erreichen der gewünschten Toleranz fortgesetzt.

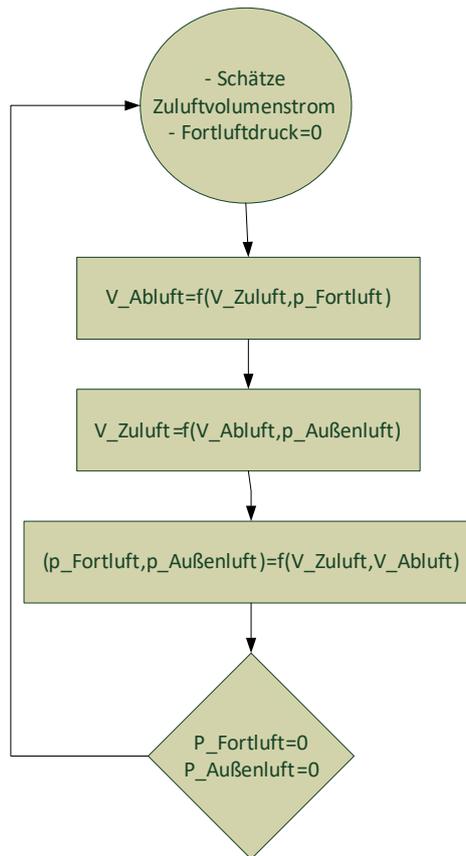


Abbildung 2-25: Ablaufdiagramm zum Lösen der Durchflussgleichung

### 2.6.3.2 Druckfestigkeitsversuch

Eine Reihe von Druckwiderstandsversuchen wurde entworfen und am RLT- Gerät durchgeführt, um die Druckwiderstandskoeffizienten der Klappen und anderer Komponenten innerhalb des RLT- Geräts zu bewerten. Das folgende Bild zeigt den Versuchsaufbau zur Auswertung des Druckabfallkoeffizienten für die Umluftklappe und den entsprechenden Strömungskanal.

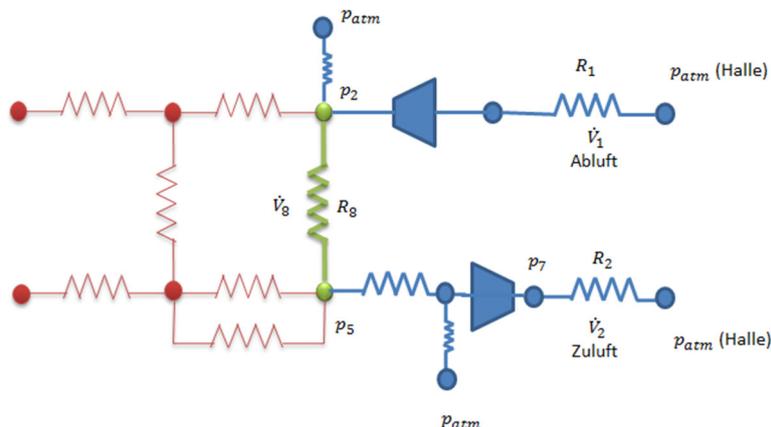


Abbildung 2-26: Versuchsaufbau Druckabfallkoeffizient Umluftklappe

In diesem Versuch werden die Mischklappe und die Außen- Fortluftklappe geschlossen. Der Volumenstrom wird konstant bei 60 und 40 Prozent gehalten. Der Volumenstrom wird an den Ventilatoren, der Druck an  $p_2$  und  $p_5$  gemessen. Die Differenz zwischen den Volumenströmen im Zu- und Abluftventilator wird als Leakage durch die RLT-Anlage betrachtet. Der

Volumenstrom durch den Zuluftventilator wird als der Volumenstrom betrachtet, der durch die Umluftklappe fließt.

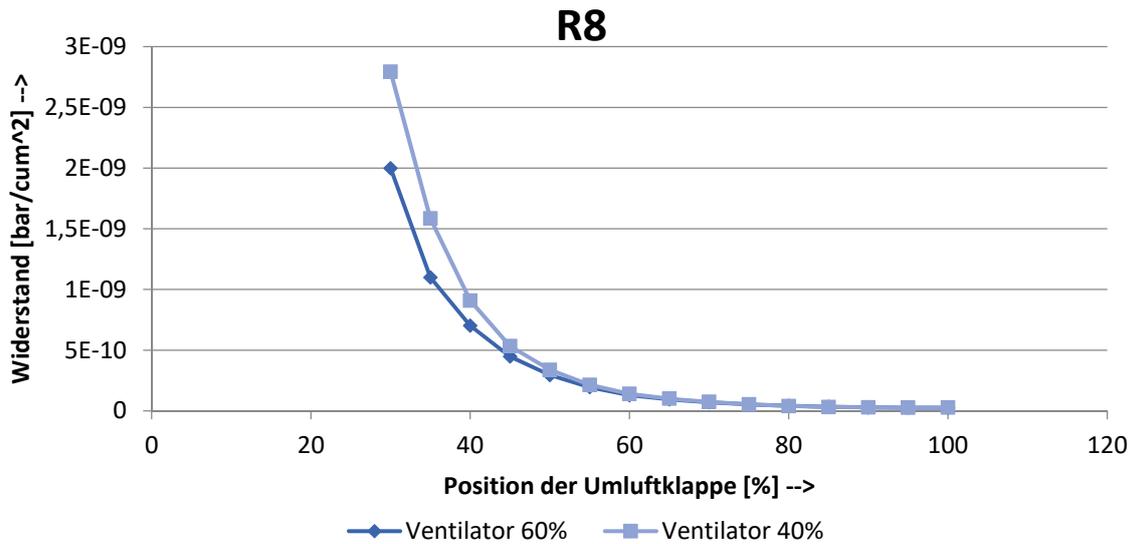


Abbildung 2-27: Widerstand an der Umluftklappe

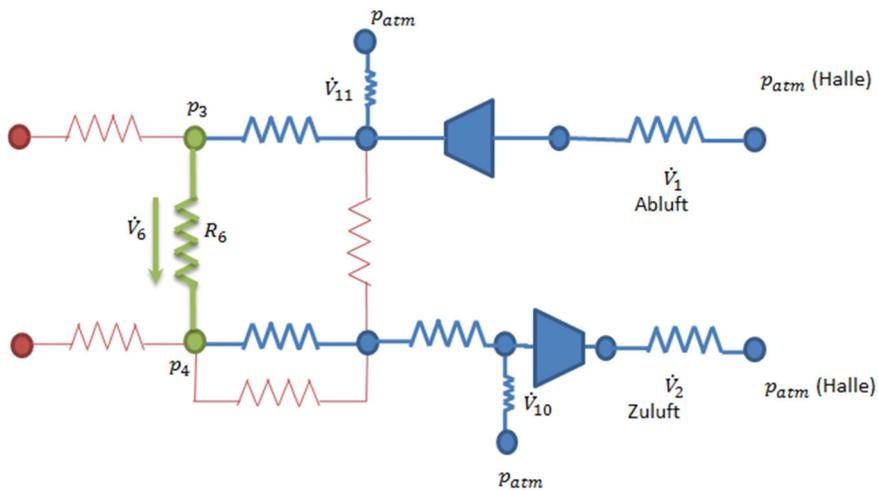


Abbildung 2-28: Versuchsaufbau Druckabfallkoeffizient Mischluftklappe

Im anderen Experiment werden die Umluftklappe und die Außen- Fortluftklappe geschlossen, so dass der gesamte Volumenstrom durch die Mischklappe fließt.

## R6

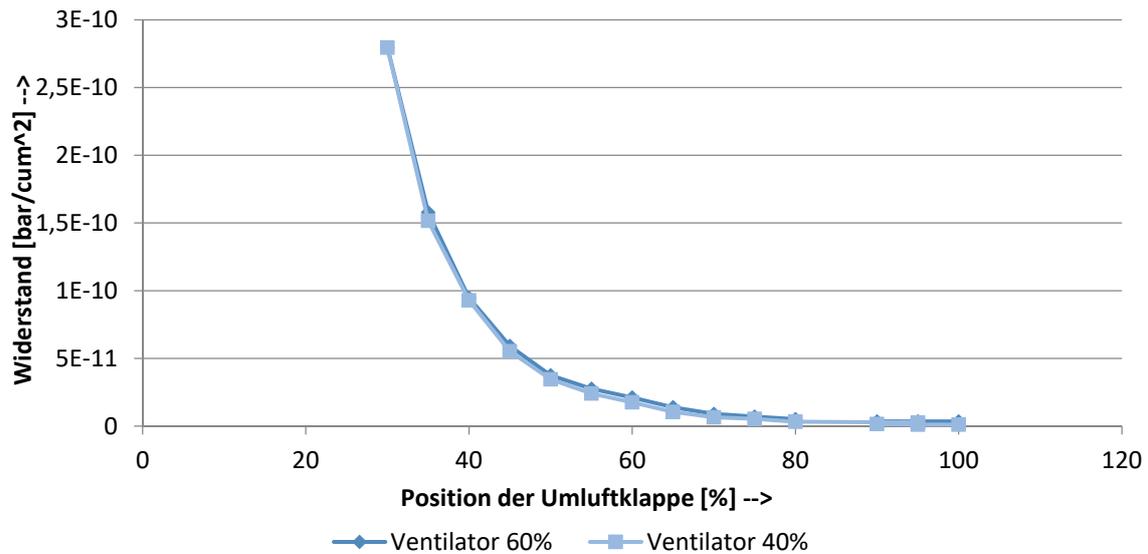


Abbildung 2-29: Widerstand an der Mischluftklappe

Weitere, für die anderen Komponenten berechnete Widerstandskoeffizienten sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Komponente	Widerstand $\left(\frac{\text{bar}}{\left(\frac{\text{m}^3}{\text{hr}}\right)^2}\right)$
Abluftkanal	$2,4 * 10^{-11}$
Abluftfilter	$4,77 * 10^{-12}$
Plattenwärmetauscher Abluftseite	$2,07 * 10^{-11}$
Verdampfer	$3,8 * 10^{-12}$
Tropfenabscheider	$3,15 * 10^{-12}$
Fortluftkanal	$1,06 * 10^{-11}$
Lufterhitzer	$2,01 * 10^{-11}$
Kondensator	$7,5 * 10^{-12}$
Plattenwärmetauscher Zuluftseite	$1,77 * 10^{-11}$
Außenluftfilter	$4,03 * 10^{-12}$
Außenluftkanal	$2,6 * 10^{-11}$
Zuluftkanal	$1,55 * 10^{-11}$

Tabelle 2-2: Widerstandskoeffizienten

### 2.6.3.3 Experiment zum Ermitteln der Ventilator Kennlinie

Es wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt, um die Kennlinien der Ventilatoren abzuleiten. Die Druckdifferenz und der Wirkungsgrad der Ventilatoren werden in Abhängigkeit vom Volumenstrom dargestellt.

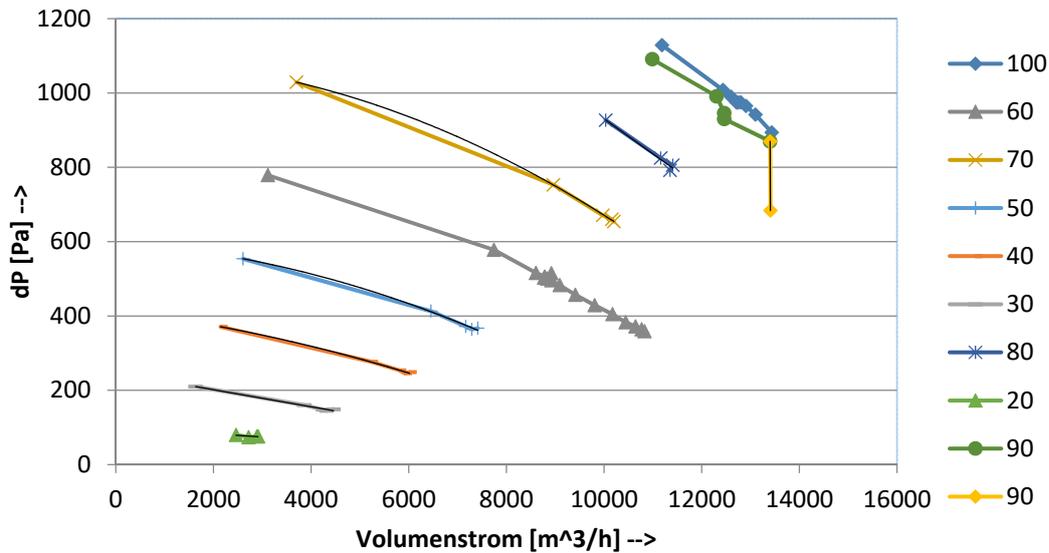


Abbildung 2-30: Druck / Volumenstromverhältnis

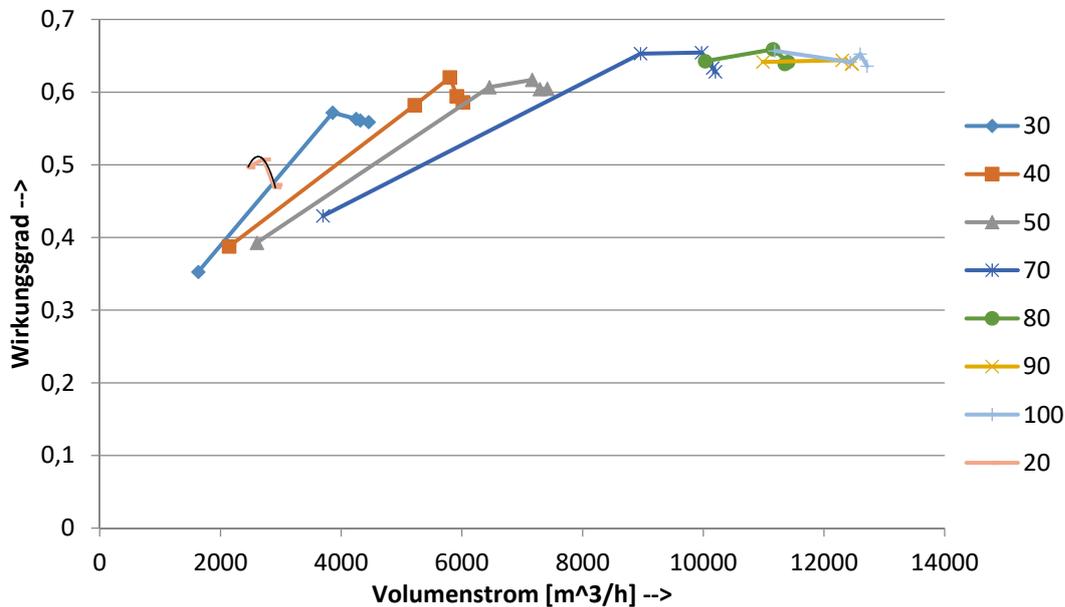


Abbildung 2-31: Wirkungsgrad / Volumenstromverhältnis

Die Validierungsergebnisse für einen Stichtag am 28.02.2019 sind in den folgenden Grafiken dargestellt. Die berechneten Drücke und Durchflussmengen werden für bestimmte Steuersignale für die Klappen und Lüfterdrehzahlen aufgezeichnet und mit den Messdaten verglichen.

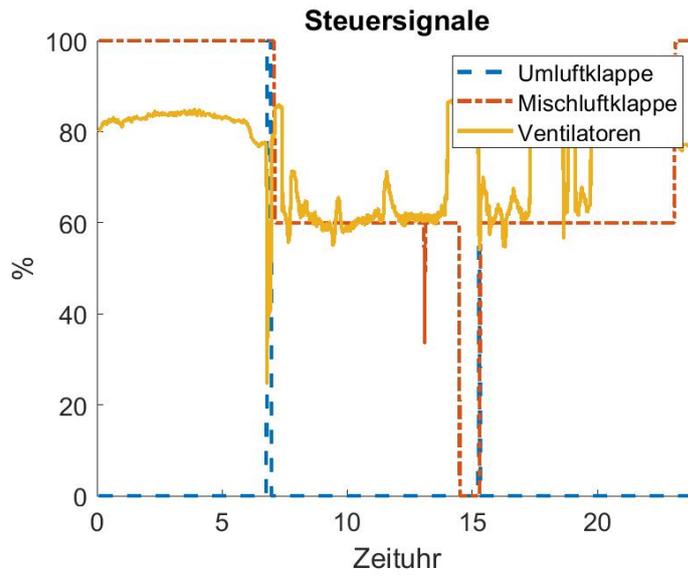


Abbildung 2-32: Zustand der Anlage am 28.02.2019

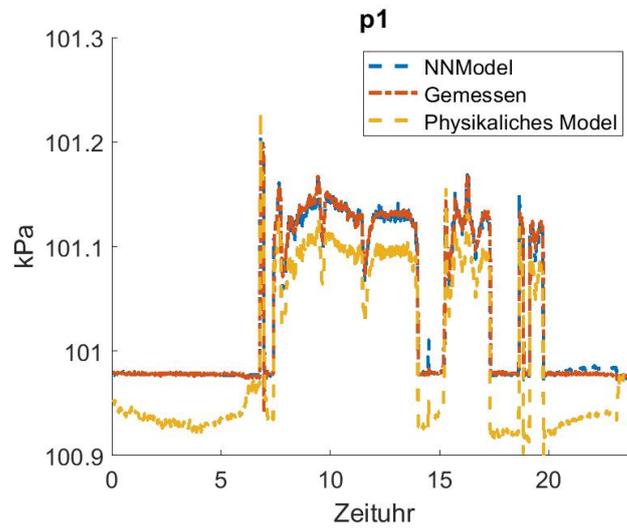


Abbildung 2-33: Vergleich des Drucks an Punkt P1 (gemessen und berechnet)

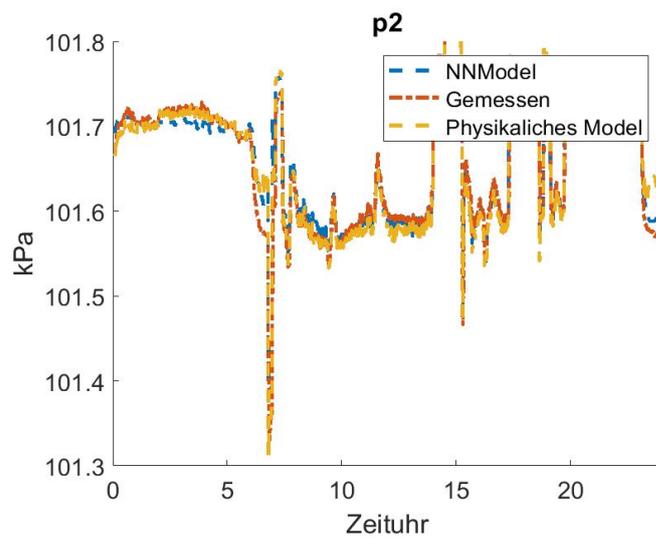


Abbildung 2-34: Vergleich des Drucks an Punkt P2 (gemessen und berechnet)

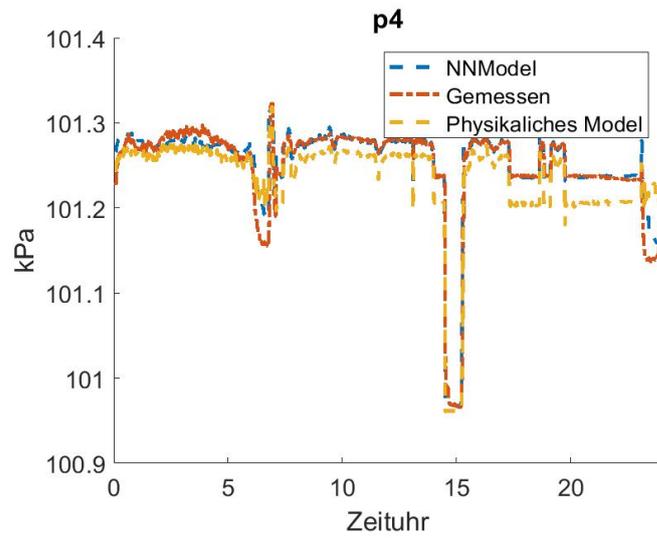


Abbildung 2-35: Vergleich des Drucks an Punkt P4 (gemessen und berechnet)

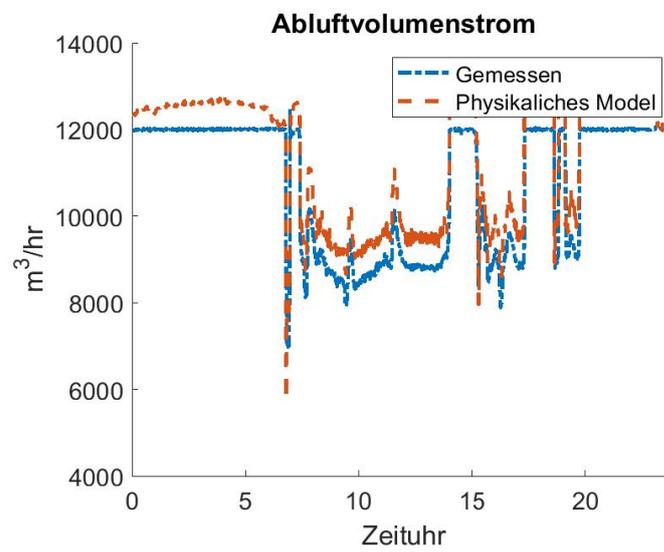


Abbildung 2-36: Vergleich der Abluftvolumenströme (gemessen und berechnet)

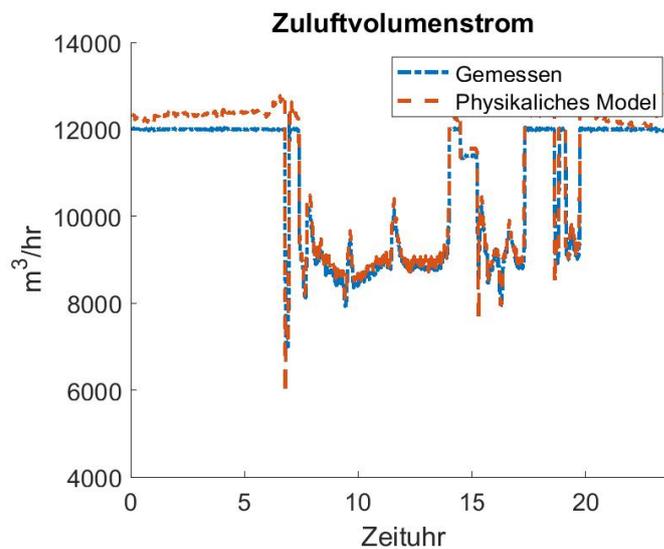


Abbildung 2-37: Vergleich der Zuluftvolumenströme (gemessen und berechnet)

Mit dem ausiterierten Volumenstrom werden die thermodynamischen Kenngrößen des Gerätes berechnet. Dazu müssen darüber hinaus in Matlab modelliert werden, da die Herstellermodelle nicht direkt eingebunden werden können:

- Plattenwärmetauscher
- Mischluftkammern
- Kälteanlage

Der Plattenwärmetauscher wird mit dem Ansatz

$$\eta = 1 - \exp \left[ \frac{e^{-NTU^{0,78} \cdot R} - 1}{NTU^{-0,22} \cdot R} \right]$$

*Formel 2-18: empirische Gleichung für kompakte Kreuzstromwärmetauscher*

für kompakte Kreuzstromwärmetauscher vorhergesagt [9]. R ist hier das Verhältnis zwischen der Wärmekapazität der heißen und kalten Seite, NTU die „Number of Transfer units“. Auf eine weitere detaillierte Beschreibung wird an dieser Stelle verzichtet.

In den Mischluftkammern wird die Enthalpie des Mischungspunktes bestimmt.

Wenn die Mischung zur Kondensation führt, wird die Position des virtuellen Mischpunkts durch die Enthalpie- und Feuchtigkeitsgleichungen (Formel 2-19) und (Formel 2-20) bestimmt:

$$h_{mixing} = \frac{\dot{m} \cdot h_{exhaust} + \dot{m} \cdot h_{Outside}}{\dot{m}_{exhaust} + \dot{m}_{Outside}}$$

*Formel 2-19: Enthalpie Gleichung zur Bestimmung des virtuellen Mischpunkts*

$$x_{mixing} = \frac{\dot{m} \cdot x_{exhaust} + \dot{m} \cdot x_{Outside}}{\dot{m}_{exhaust} + \dot{m}_{Outside}}$$

*Formel 2-20: Feuchtigkeitsgleichung zur Bestimmung des virtuellen Mischpunkts*

Der endgültige Mischpunkt ist der Schnittpunkt der konstanten Enthalpielinie, die durch den virtuellen Mischpunkt und die Sättigungslinie im Mollier-Diagramm verläuft. Dieser Schnittpunkt wird mit Hilfe einer Suchmethode gefunden.

Die Kälteanlage wird mit Hilfe der gesammelten Gerätedaten modelliert.

## 2.6.4 Entwicklung eines physikalisch basierten thermischen Gebäudemodells

Die Wärmedynamik der Schwimmhalle ist als ein großer Raum und zwei Dachböden mit einigen Innenwänden und einer Außenwand modelliert. Jedem Raum und den Wänden ist ein Knoten zugeordnet, dessen Temperatur als homogen verteilt angenommen wird. Dadurch kann das Modell als verklumptes Modell mit 16 Temperaturzuständen formuliert werden. Daraus ergibt sich ein Dreiraummodell des Wärmeflussnetzes, wie in (Abbildung 2-38) dargestellt.

Die Innenwände tauschen Wärme mit der Raumluft durch Konvektion aus. Die Außenwände tauschen Wärme mit der Innen- und Außenluft aus. Die Temperaturen der umliegenden Innenräume werden als bekannte Temperaturen wie Cafeteria, Duschaum und Poolwasser betrachtet und gemessen. Zusätzliche Wärmequellen ergänzen die Halle um Wärme. Dazu zählen die raue Sonneneinstrahlung und die Lüftungsgeräte. Aus dem obigen Bild werden 14

gekoppelte Differentialgleichungen abgeleitet, die die 14 Zustandstemperaturen beschreiben. Die Differentialgleichung für die Schwimmhalle ist unten dargestellt.

$$C_p \frac{dT_{Hall}}{dt} = \sum \frac{1}{R_{Wall_i}} (T_{Wall_i} - T_{Hall}) + \phi_{Radiation} + \phi_{Ventilation}$$

Formel 2-21: Differenzialgleichung der Schwimmhalle

korrigiert mit dem Simplex-Optimierungsalgorithmus von Nelder-Mead in Matlab und den aufgezeichneten Temperaturen.

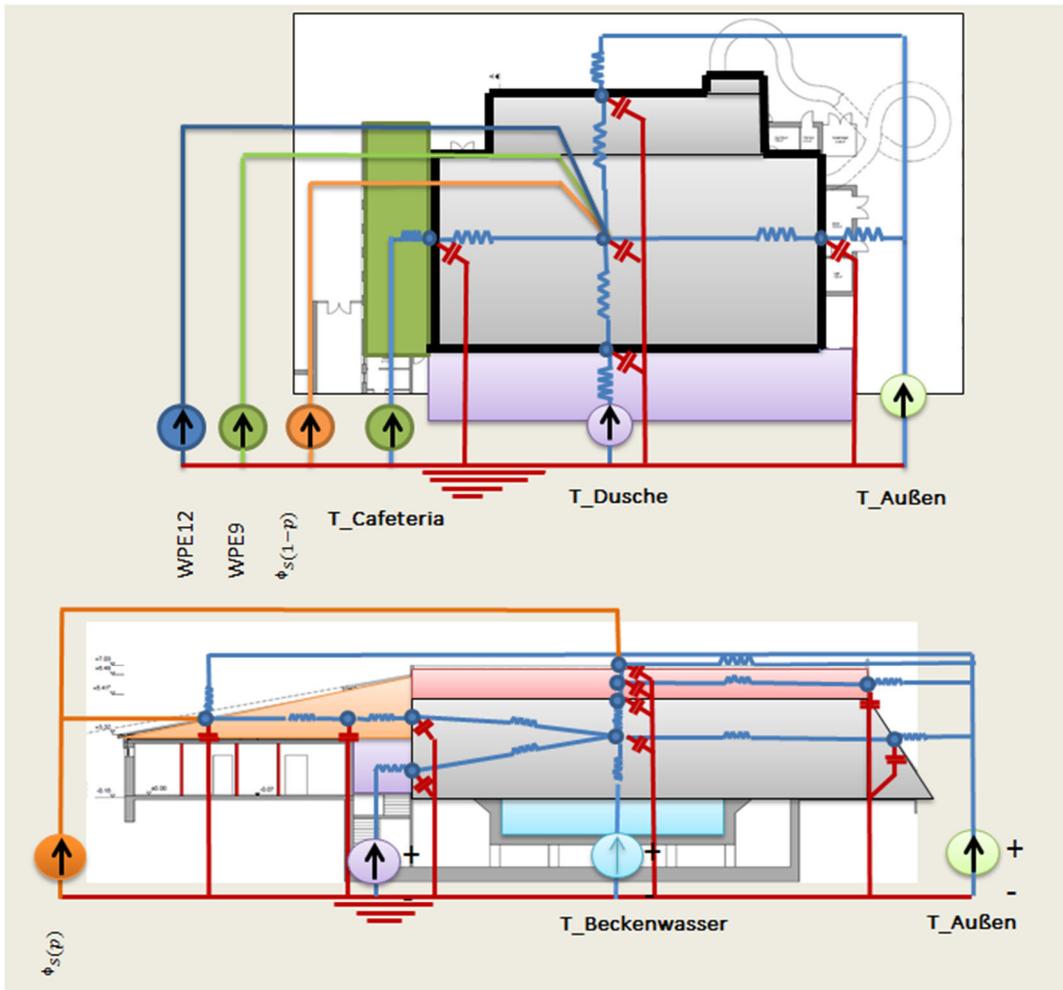


Abbildung 2-38: Widerstandsnetzwerk des thermischen Gebäudemodells

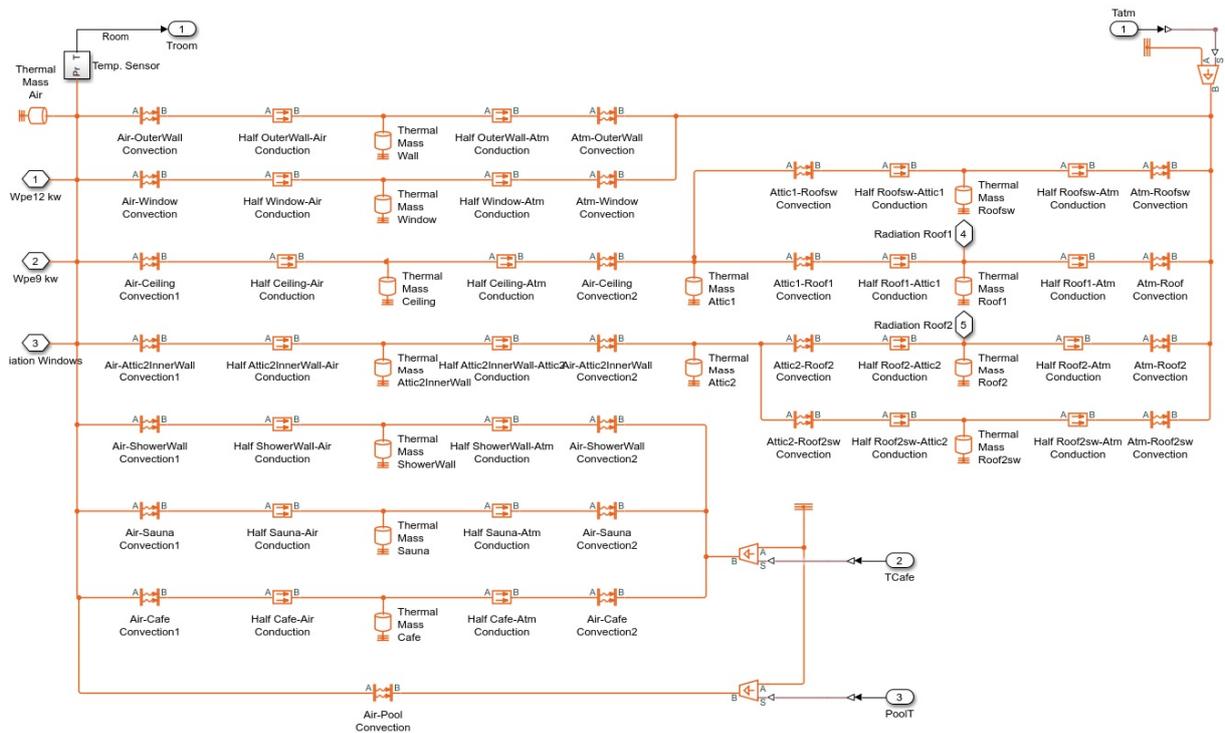


Abbildung 2-39: Wärmemodell der Schwimmhalle

Die obige Abbildung zeigt den Aufbau des Wärmemodells der Schwimmhalle in Simulink. Die Simscape-Toolbox von Matlab wird verwendet, um das thermische Modell des Gebäudes zu simulieren. In diesem Werkzeugkasten stellen geeignete Elemente den Wärmewiderstand der Wände einschließlich Oberflächenwiderstand und Leitwert sowie die thermische Wärmekapazität der Wände und zusätzlicher Wärmequellen zum Gebäude dar. Die bekannten Temperaturen an den Grenzen des Modells sind Beckenwassertemperatur, Cafeteria-Temperatur und Außentemperatur. Die im Modell verwendeten Wandmaterialien sind in den folgenden Tabellen dargestellt:

Außenwand Material	Wärmeleitfähigkeit (W/m/K)	Stärke (m)	Fläche (m <sup>2</sup> )	Cp (kJ/kg/K)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )
gemauerter Ziegelstein	0,9	0,24	43,719	0,92	2700
Steinwolldämmung	0,035	0,06	43,719	0,84	45
Airgap 50 mm	0,27313	0,04	43,719	1,006	1,2
Verblender B-Lochung	0,9	0,115	43,719	1	1660
Betonika	1,6	0,0175	43,719	0,879	2400

Tabelle 2-3: Außenwandmaterialien

Fenster Material	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Stärke (m)	Fläche (m <sup>2</sup> )	Cp (kJ/kg/K)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )
Glass	0,009987516	0,02	160,2	0,7	2000

Tabelle 2-4: Fenstermaterial

Innenwand Material	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Stärke (m)	Fläche (m <sup>2</sup> )	Cp (kJ/kg/K)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )
Betonplatte	1,4	0,2	77,72083	0,197	2427
Perimeterdämmung	0,09	0,1	77,72083	1,3	30
Fliesen	1,3	0,03	77,72083	0,422	2700
Estrich	1,4	0,03	77,72083	1,3	2000

Tabelle 2-5: Innenwandmaterial

Decken Material	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Stärke (m)	Fläche (m <sup>2</sup> )	Cp (kJ/kg/K)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )
Sparrenlage		0	455,45	1,5	1404
Mineralwolldämmung	0,035	0,2	455,45	1,9	45
Dachbahn	0,17	0,02	455,45	1,7	1380
Konterlattung		0	455,45		
Ziegeleindeckung	0,9	0,04	455,45	0,92	2700

Tabelle 2-6: Deckenmaterial

Zwischendecken Material	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Stärke (m)	Fläche (m <sup>2</sup> )	Cp (kJ/kg/K)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )
Holz	0,27	0,05	703,9333	870	802

Tabelle 2-7: Zwischendeckenmaterial

### 2.6.4.1 Modell der Hallenluftfeuchtigkeit

Das Hallenfeuchtemodell ist eine Feuchtebilanzberechnung, bei der die Oberflächenverdampfung die Hallenfeuchte erhöht und die Lüftung der Halle Feuchtigkeit entzieht. In der dargestellten Grafik ist WPE9 das vorhandene Bestandsgerät mit  $\dot{V}_{Nenn} = 9.000 \text{ m}^3/\text{h}$  und das WPE12 das neue für dieses Projekt verwendete Gerät mit  $12.000 \text{ m}^3/\text{h}$ .

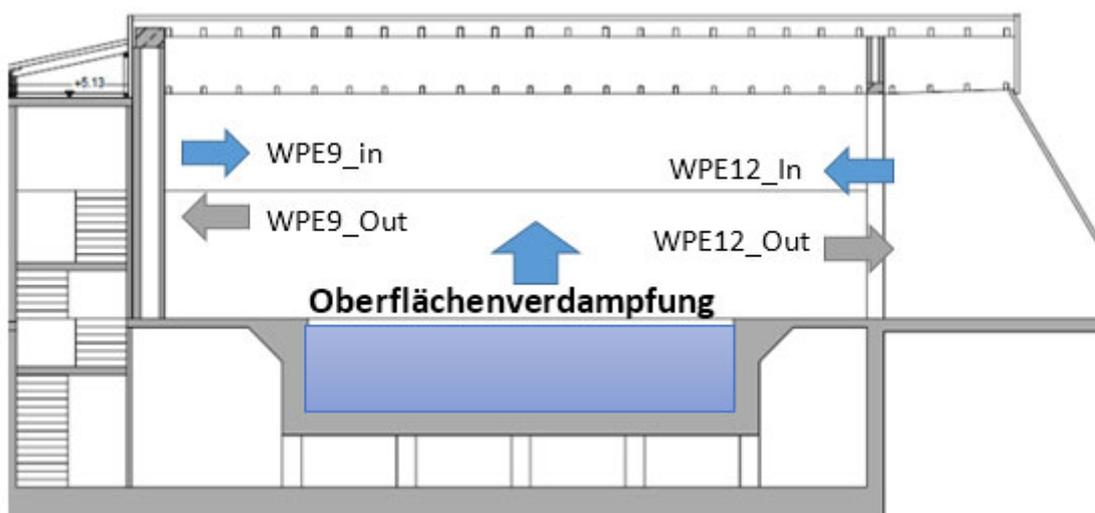


Abbildung 2-40: Entstehung und Beseitigung von Feuchtigkeit in der Halle

Die Verdunstung von Wasser aus einer Wasseroberfläche hängt von der Wassertemperatur, der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Luftgeschwindigkeit über der Wasseroberfläche ab.

Die Verdunstungsrate kann ausgedrückt werden als:

$$g_s = \phi A (X_s - X) \frac{kg}{s}$$

Formel 2-22: Verdunstungsrate

Dabei ist A die Wasseroberfläche und  $\phi$  der Verdunstungskoeffizient und kann in einer empirischen Formel (Engineering Toolbox) ausgedrückt werden:

$$\phi = 25 + 19 \cdot v \frac{kg}{m^2s}$$

Formel 2-23: Verdunstungskoeffizient

v ist die Geschwindigkeit der Luft über der Wasseroberfläche.

Die folgende Korrelation zeigt das Verhältnis zwischen belegter und unbelegter Schwimmhalle und kann wie folgt ausgedrückt werden [10]:

$$\frac{g_{s_{belegt}}}{g_{s_0}} = (1,9 - 21 \cdot (\rho_r - \rho_\omega) + 5,3 \cdot N)$$

Formel 2-24: Verhältnis von belegter zu unbelegter Schwimmhalle

Dabei ist  $(\rho_r - \rho_\omega)$  die Differenz zwischen der Dichte der Luft bei Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Sättigungszustand und N die Anzahl der Personen pro Quadratmeter des Pools. Die Gesamtänderung der absoluten Luftfeuchtigkeit in der Halle in einem Zeitschritt ergibt sich aus der Menge der Oberflächenverdunstung zuzüglich der von den Lüftungsgeräten abgesaugten Luftmenge.

$$x = \sum x_{Zuluft} + x_{Verdampfung} - x_{Abluft}$$

Formel 2-25: Berechnung der absoluten Feuchte

## 2.6.5 Modellierung neuronaler Netze

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der neuronalen Netzwerkmodelle zur bauphysikalischen Modellierung der Lüftungsanlage und des Gebäudes beschrieben. Neuronale Netze sind mathematische Modelle, die von biologischen neuronalen Netzen inspiriert sind. Sie imitieren ein menschliches Neuronensystem, um Lernfähigkeit zu erwerben. Aus historischen Daten lernend, passen die Netzwerke die Gewichtung der Verbindungen zwischen den Neuronen nach Lernregeln an, so dass trainierte Netzwerke korrekte Ergebnisse erzeugen können. Multi-Layer-Wahrnehmungen (MLPs) sind die am häufigsten verwendeten neuronalen Netze, die kontrolliert werden. Die Struktur eines neuronalen Netzwerks ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Die erste Schicht eines MLP ist eine Reihe von sensorischen Einheiten, die die Informationen aller Eingangsvariablen enthalten. Die zweite Schicht ist eine versteckte Schicht, die eine bestimmte Anzahl von Neuronen enthält. Jedes Neuron hat einen Summenoperator und eine Aktivierungsfunktion, die eine nichtlineare Transformation durchführen. Die versteckte Schicht verwendet eine logistische Sigmoidfunktion als Aktivierungsfunktion.

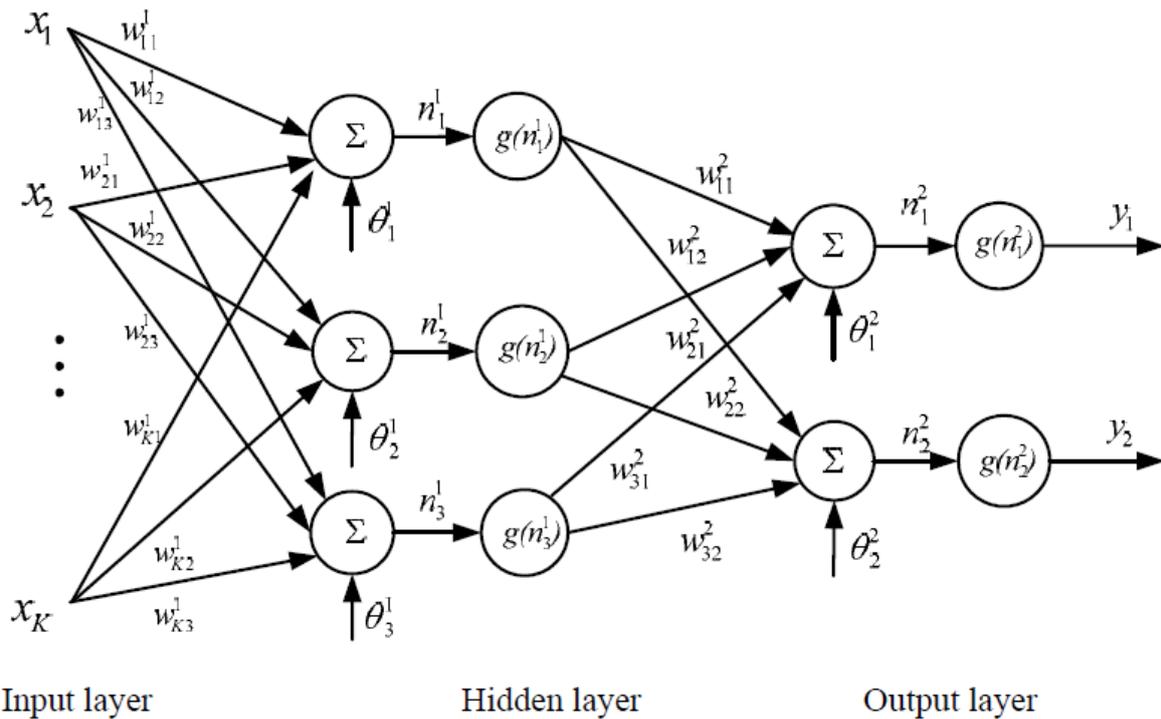


Abbildung 2-41: Struktur eines neuronalen Netzes

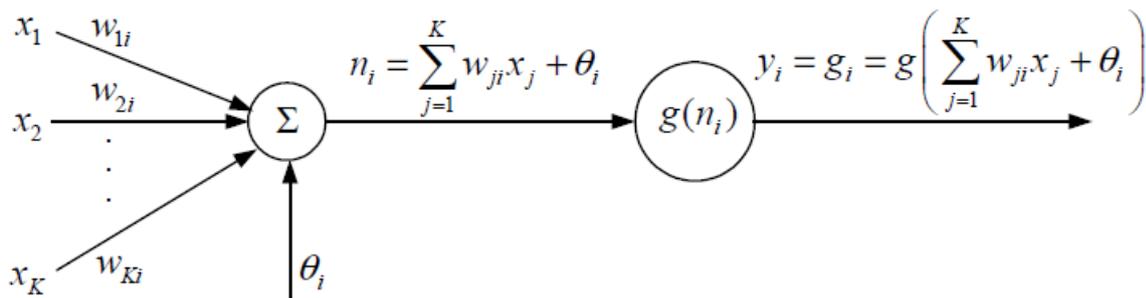


Abbildung 2-42: Struktur eines Neurons

Die Eingaben der ersten Schicht werden mit den Gewichten multipliziert, summiert und mit der Vorspannung addiert. Die Ergebnisse durchlaufen die Aktivierungsfunktion auf der versteckten Ebene, bevor sie auf die nächste Ebene wechseln. Die Aktivierungsfunktion  $g(x)$  bildet die Ausgänge der ersten Schicht auf einen Wert zwischen 0 und 1 ab, wie beispielsweise die Sigmoidfunktion oder -1 und 1 wie die Tanh-Funktion. Die dritte Schicht führt nur eine lineare Transformation zu den Ausgabedaten durch. Ein üblicher Ansatz zur Schätzung der neuronalen Netzwerkparameter ist das Training der Netzwerke nach Levenberg-Marquardt (LM), um die mittleren quadratischen Fehler (MSEs) zwischen den vorhergesagten und tatsächlichen Werten zu minimieren.

Diese Ansätze sind bekannt für ihre Fähigkeiten, nichtlineare, multivariable Modellierungsproblemen zu beschreiben [11]. Im Gegensatz zu den physikalischen Modellen sind die Parameter neuronaler Netze die Anzahl der Neuronen und die Gewichtungswerte der Verbindungen und Verzerrungen. Wird ein dynamisches neuronales Netzwerkmodell verwendet, sollten bei der Modellentwicklung auch die Ordnungen und Verzögerungsbedingungen berücksichtigt werden.

Die hier verwendeten neuronalen Netzwerkstrukturen sind Feedforward-Strukturen mit einer versteckten Schicht. Der Trainingsalgorithmus für die Ausbildung des Netzwerks ist nach Levenberg-Marquardt realisiert. Feed-Forward ANN's sind direkte Input-Output-Verbindungsrechnerstrukturen, die in der Lage sind, eine reibungslose Funktion mit beliebiger Genauigkeit zu approximieren, vorausgesetzt es werden genügend Neuronen verwendet. Ihre Fähigkeit, nichtlineare Funktionen zu approximieren bietet die Möglichkeit die Funktionen des RLT-Geräts zu approximieren. Die Genauigkeit der Approximation hängt von der Anzahl der Neuronen ab, die in den versteckten ANN-Schichten verwendet werden. Die ungefähre Anzahl der versteckten Schichten wird als Durchschnitt der Anzahl der Ein- und Ausgänge angenommen und gewählt, da die zunehmende Anzahl an versteckten Schichten und deren Größe die Genauigkeit erhöht, aber die Verallgemeinerung der Funktion aufgrund von Überpassungsproblemen gefährdet. Die für das Training der Netzwerke verwendeten Datensätze stammen aus der Datenhistorie eines Jahres. Die aufgezeichneten Daten sind mit einem Intervall von einer Minute aufgezeichnet und decken verschiedene Wetterbedingungen über ein Jahr ab. Da das System über viele Ein- und zwei Ausgänge verfügt, ist es nicht möglich, ein einziges neuronales Netzwerk zu erstellen, das das gesamte System modelliert. Um die Dimension des neuronalen Netzes zu reduzieren, wird das System auf mehrere Submodelle heruntergebrochen, die seriell arbeiten. Im vorgeschlagenen Modell für das Gebäude ist die Ausgangsvariable die Änderungsrate der Hallentemperatur. Zu den Eingaben gehören die Außenlufttemperatur der Trockenkugel, die relative vertikale Bestrahlung, die Beckenwassertemperatur und die Wärmeeinbringung durch die Lüftungsgeräte.

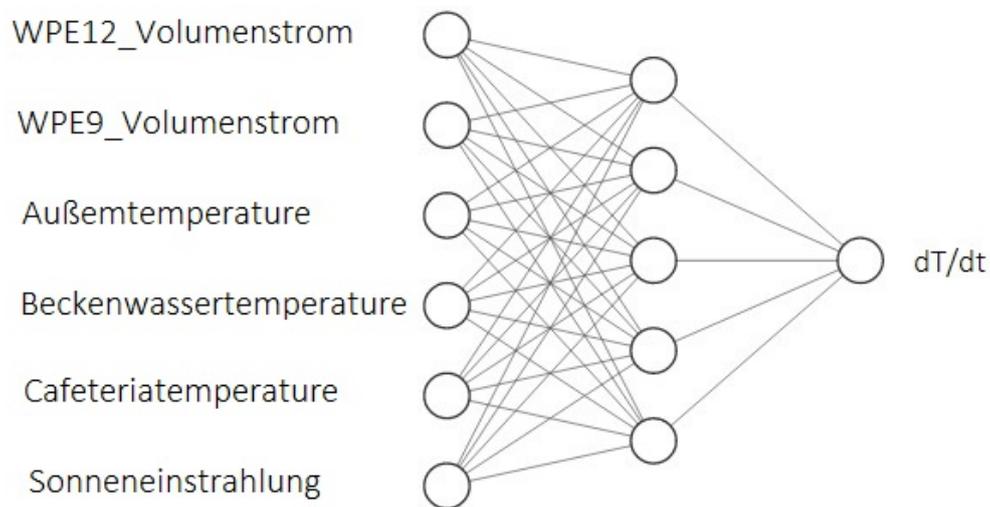


Abbildung 2-43: Neuronale Netzwerkstruktur für die Hallentemperatur

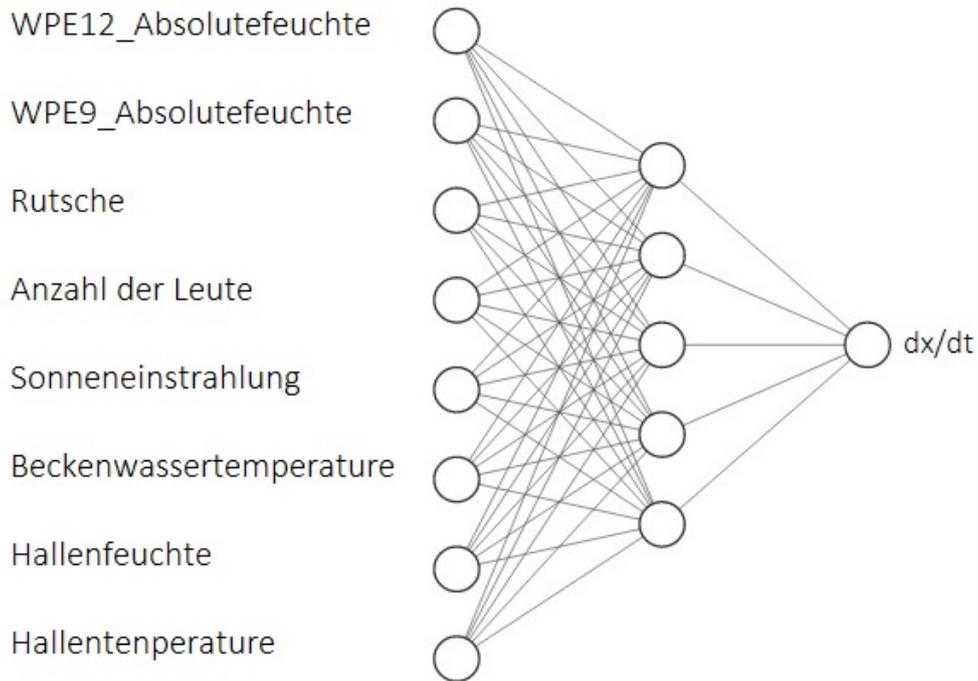


Abbildung 2-44: neuronale Netzwerkstruktur für die Hallenfeuchte

Die neuronalen Netzwerkstrukturen für Hallentemperatur und -feuchte sind in den obigen Abbildungen (Abbildung 2-43, Abbildung 2-44) dargestellt. WPE12Q und WPE9Q sind Wärmemengen die durch die Lüftungsgeräte WPE12 und die WPE9 erzeugt und in [kW] gemessen werden. Die Sonneneinstrahlung ist die gemessene Außenstrahlung. Die Ausgangsvariable ist die Änderungsrate der durchschnittlichen Hallentemperatur.

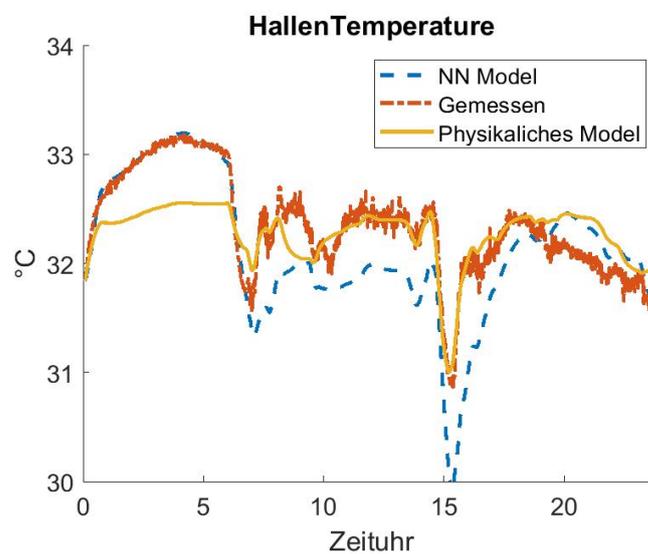


Abbildung 2-45: Validierungsssergebnisse der Hallentemperatur

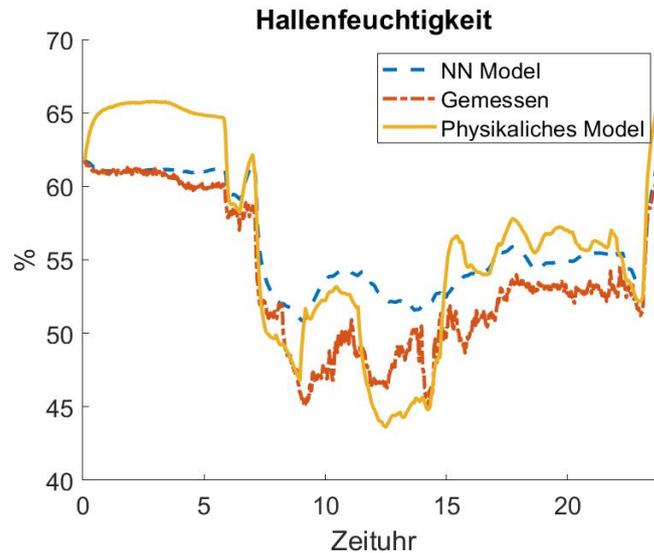


Abbildung 2-46: Validierungsergebnisse der Hallenfeuchte

Die Validierungsergebnisse sind in den obigen Abbildungen (Abbildung 2-45, Abbildung 2-46) dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass neuronale Netzwerke die Temperatur und Luftfeuchtigkeit während des normalen Betriebsbereichs, in dem das Netzwerk trainiert wird, genauer vorhersagen können. Das neuronale Netzwerk ist jedoch nicht zuverlässig, wenn die Eingangsdaten außerhalb des Betriebsbereichs liegen.

WPE12\_x und WPE9\_x sind die Nettomengen an Feuchte in [kg], die der Halle durch die Lüftungsgeräte zugeführt oder entnommen werden. Rutsche(on/off) ist der Status der Pumpe, die das Wasser vom Rutschenausgang hoch in den Rutschenturm fördert.

Die schematische Darstellung in (Abbildung 2-47) zeigt die Konfiguration der Netzwerke, die zur Modellierung des Klimagerätes verwendet werden. Da die zugeführte Außenluft des Geräts mit der Abluft vermischt wird, bilden die Netzwerke eine Schleife, die einen Ausgangspunkt für die Iterationen benötigt.

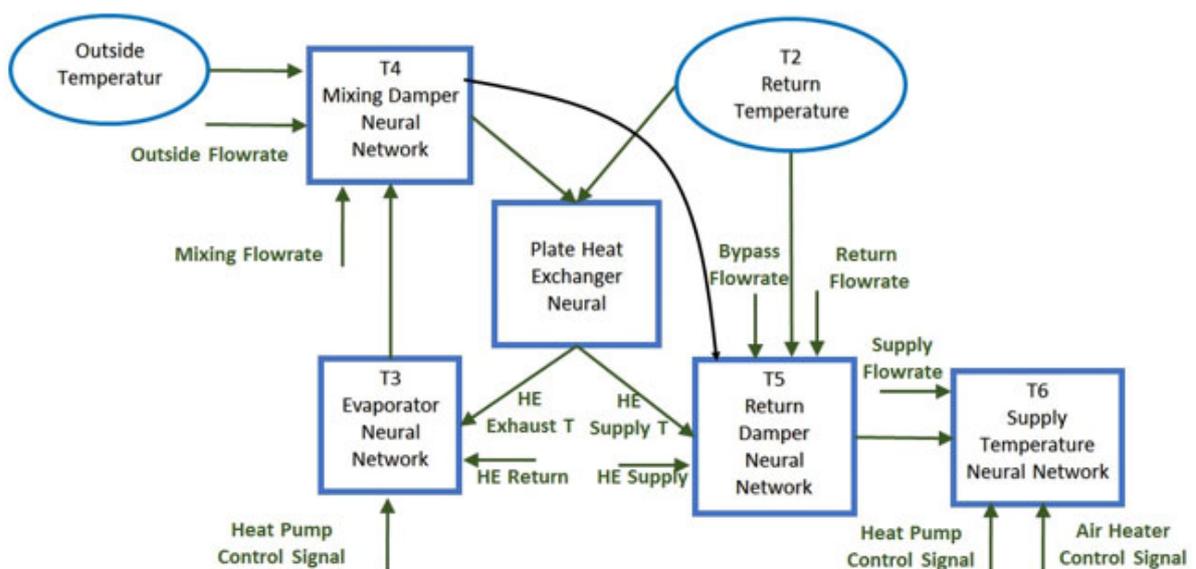


Abbildung 2-47: Schematische Darstellung der Konfiguration der Netze

Zur Lösung der Schleife wird der Anfangspunkt erraten und in einer Iterationsschleife die endgültige Lösung gefunden, bis die gewünschte Toleranz erreicht ist. Da es nicht möglich ist, die Menge der durchfließenden Luft innerhalb des Geräts direkt zu messen, um das Netzwerk zu trainieren, wurden die Drücke innerhalb des Geräts gemessen und in Volumenströme umgerechnet. Aus dem Differenzdruck an den Klappen und den Klappenstellungen wird eine Variable berechnet, die als Volumenstrom in den neuronalen Netzen verwendet wird. Die Ergebnisse aus Kapitel 2.4.3.1 wurden hier noch nicht berücksichtigt.

$$\dot{V} = \sqrt{\frac{\Delta p}{R}}$$

Formel 2-26: Volumenstromberechnung über die Klappen

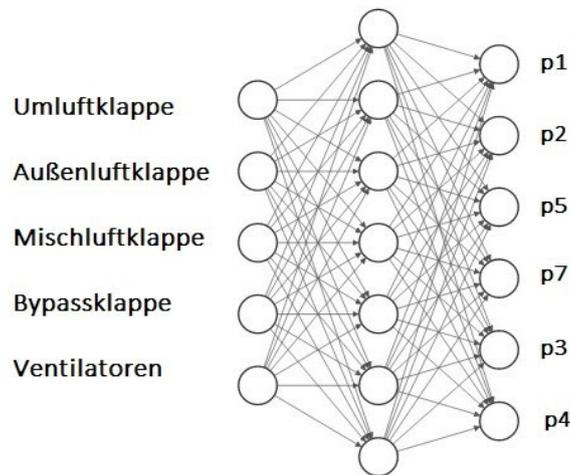
$$\dot{V} = \sqrt{\Delta p}$$

Formel 2-27: Volumenstromberechnung über den Wärmetauscher

$$R = e^{-0,07 \cdot \text{Klappensteuerung}}$$

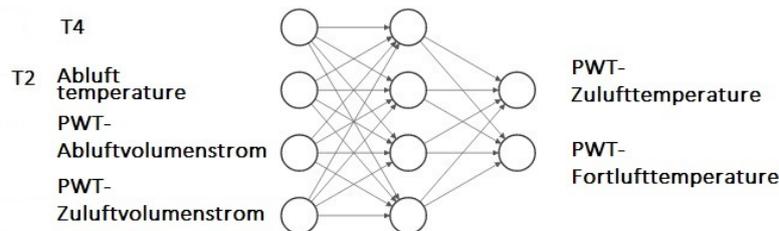
Formel 2-28: Widerstandswert der Klappen

Der Parameter  $\dot{V}$  ist hier nicht der richtige Volumenstrom, aber dies ist eine gute Möglichkeit, die Dimension des Netzwerks zu reduzieren, indem man die korrelierten Variablen kombiniert und sinnvollere Eingaben verwendet, wenn wir bereits das Wissen durch die gesammelten Daten haben.



Druckmodell des Geräts

Abbildung 2-48: Druckmodell des RLT-Geräts im neuronalen Netzwerk



Plattenwärmetauschermodell

Abbildung 2-49: Plattenwärmetauschermodell im neuronalen Netzwerk

Zunächst werden alle Drücke mit Hilfe des RLT-Druckmodells und der Klappenstellung berechnet. Wenn die Drücke bekannt sind, werden sie zur Berechnung der Volumenströme verwendet, wie in Gleichungen (Formel 2-26) dargestellt. Durch das Schätzen von T4 beginnt die Iterationen mit der Berechnung der Zu- und Ablufttemperaturen unter Verwendung des Plattenwärmetauschermodells.

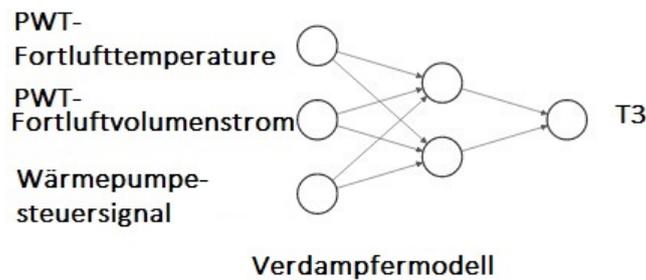


Abbildung 2-50: T3 Verdampfermodell des neuronalen Netzwerks

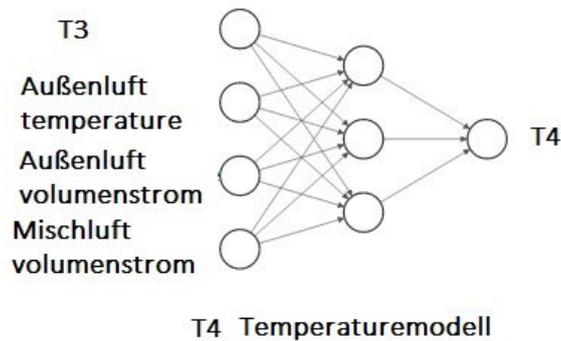


Abbildung 2-51: T4 Temperaturmodell des neuronalen Netzwerks

Die Außen- und Mischluftvolumenströme im T4-Temperaturmodell werden aus Druckdifferenzen und Klappenpositionen nach Gleichung (Formel 2-27) berechnet.

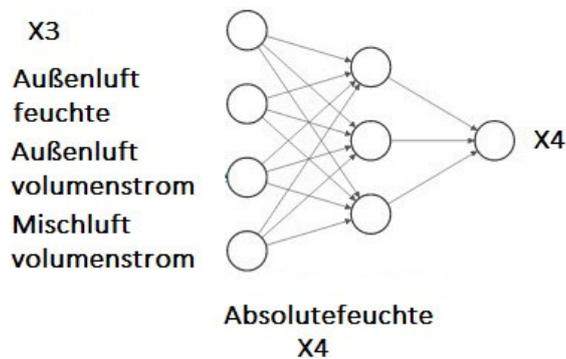


Abbildung 2-52: Modell der X4 absoluten Feuchte im neuronalen Netzwerk

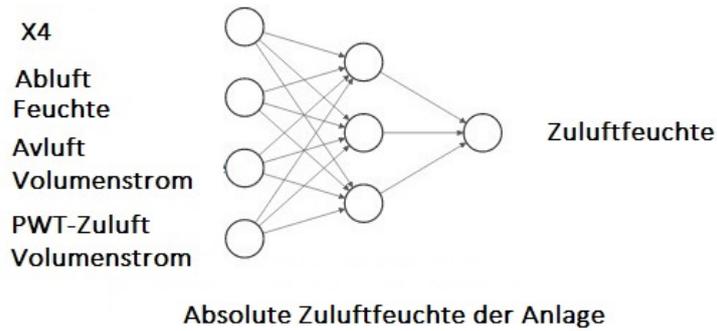


Abbildung 2-53: Modell der absoluten Zuluftfeuchte im neuronalen Netzwerk

X3 ist die absolute Feuchte an Punkt 3. Sie wird mit dem T3- Modell berechnet und gibt die Feuchte aus der Halle zurück. Outside X ist die absolute Feuchtigkeit der Außenluftseite und Return X ist die absolute Feuchtigkeit der Halle. Wenn die Berechnung der Temperatur T4 die gewünschte Toleranz erreicht, werden die Berechnungen mit der Zulufttemperatur des Wärmetauschers fortgesetzt. An dieser Stelle werden die prozentualen Anteile der Temperaturen, der Ablufttemperatur und der Wärmetauscher-Zulufttemperatur am Mischpunkt berechnet. Das Problem ist, dass die aufgezeichneten Daten zeigen, dass die an dieser Stelle gemessene Temperatur aus zwei Gründen nicht wirklich die Mischtemperatur abbildet. Zum einen, weil die Luftmengen nicht genügend Zeit zum Mischen haben, zum anderen, weil dieser Bereich von den Kondensatorrohren beeinflusst wird und bei eingeschalteter Wärmepumpe erwärmt wird.

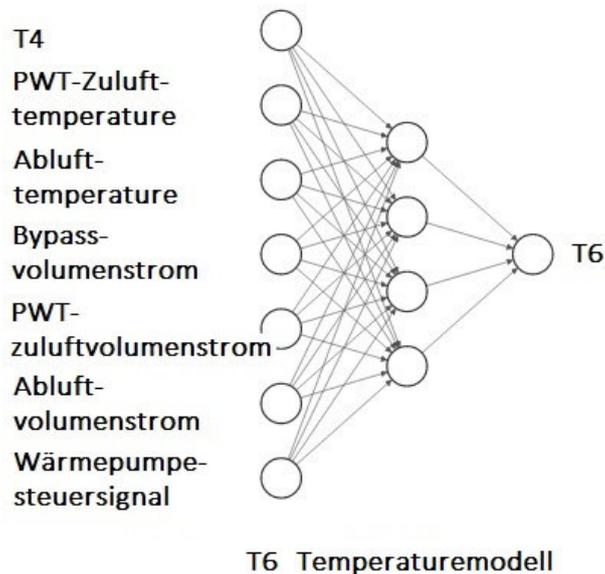


Abbildung 2-54: T6 Temperaturmodell im neuronalen Netzwerk

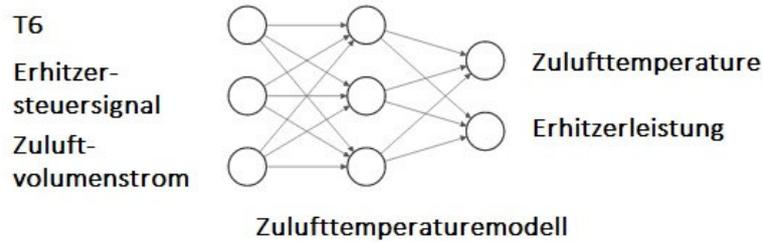


Abbildung 2-55: Zulufttemperaturremodell im neuronalen Netzwerk

Es entsteht also ein komplexeres Netzwerk wie vorstehend mit 7 Eingängen und der Temperatur T6 als Ausgang, gemessen an Punkt 6, nach dem Kondensator. Die Temperatur T6 wird dann im Zulufttemperaturremodell zusammen mit der Ansteuerung des Luftherhitzers und dem Zuluftvolumenstrom verwendet, um die endgültige Zulufttemperatur des Klimageräts zu definieren. Für die Berechnung der Leistungsaufnahme von Ventilatoren und Wärmepumpe werden ebenfalls separate Modelle erstellt.

### 2.6.6 Modellvalidierung

Die Ergebnisse der neuronalen- und physikalisch basierten Modelle werden in den folgenden Abbildungen mit den Messdaten für den Stichtag verglichen. Die Abbildungen zeigen die Ergebnisse des neuronalen Netz- Druckmodells. Wie man sieht, stimmen die Ergebnisse des neuronalen Netzwerks besser mit der Messung überein als die mit dem physikalischen Modell berechneten Werte.

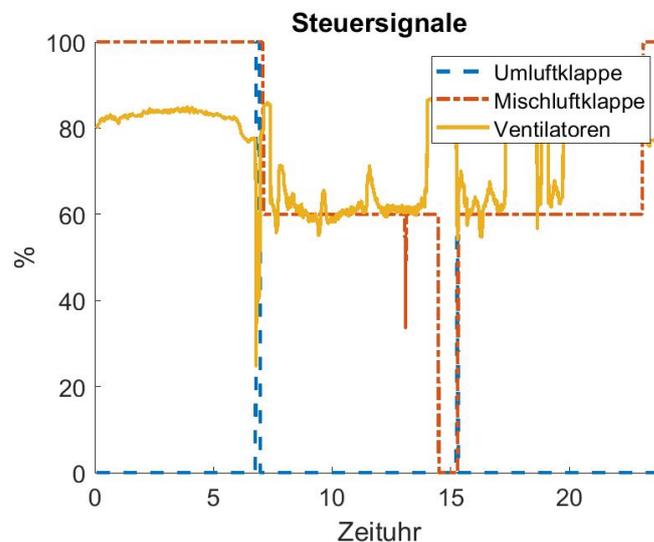


Abbildung 2-56: Zustand der Anlage am Testtag

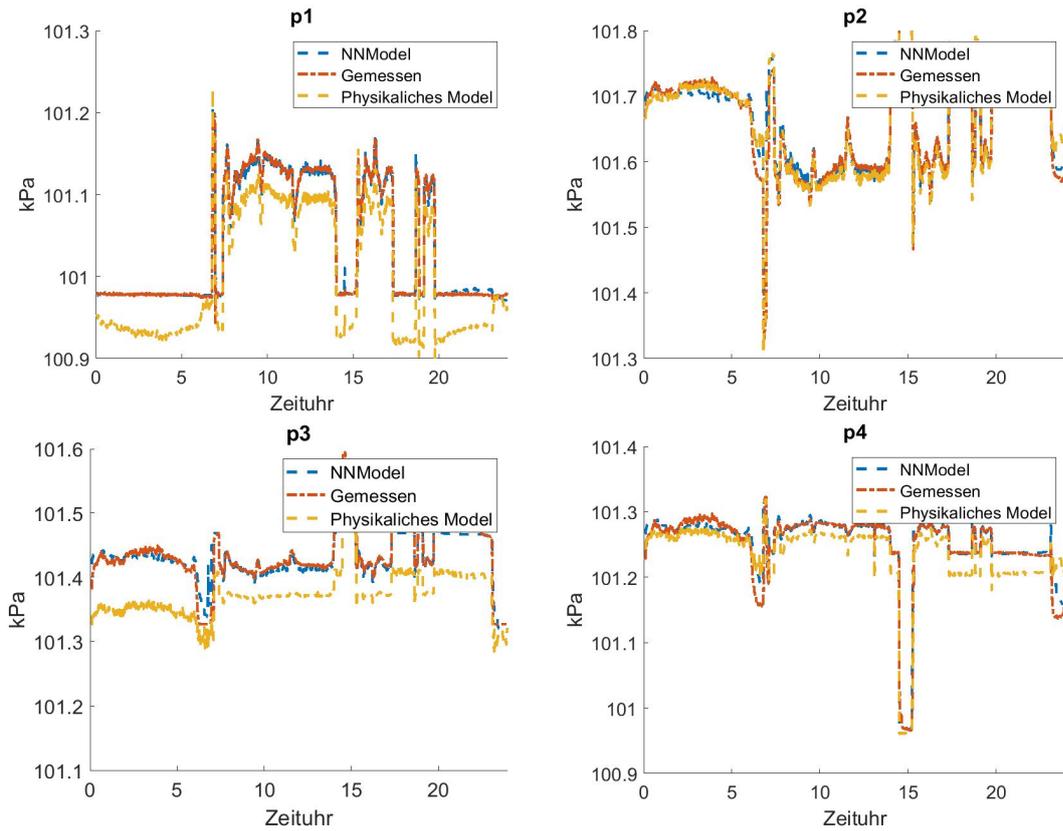


Abbildung 2-57: Vergleiche der Drücke an den Punkten P1-P4 mit den verschiedenen Regelvarianten

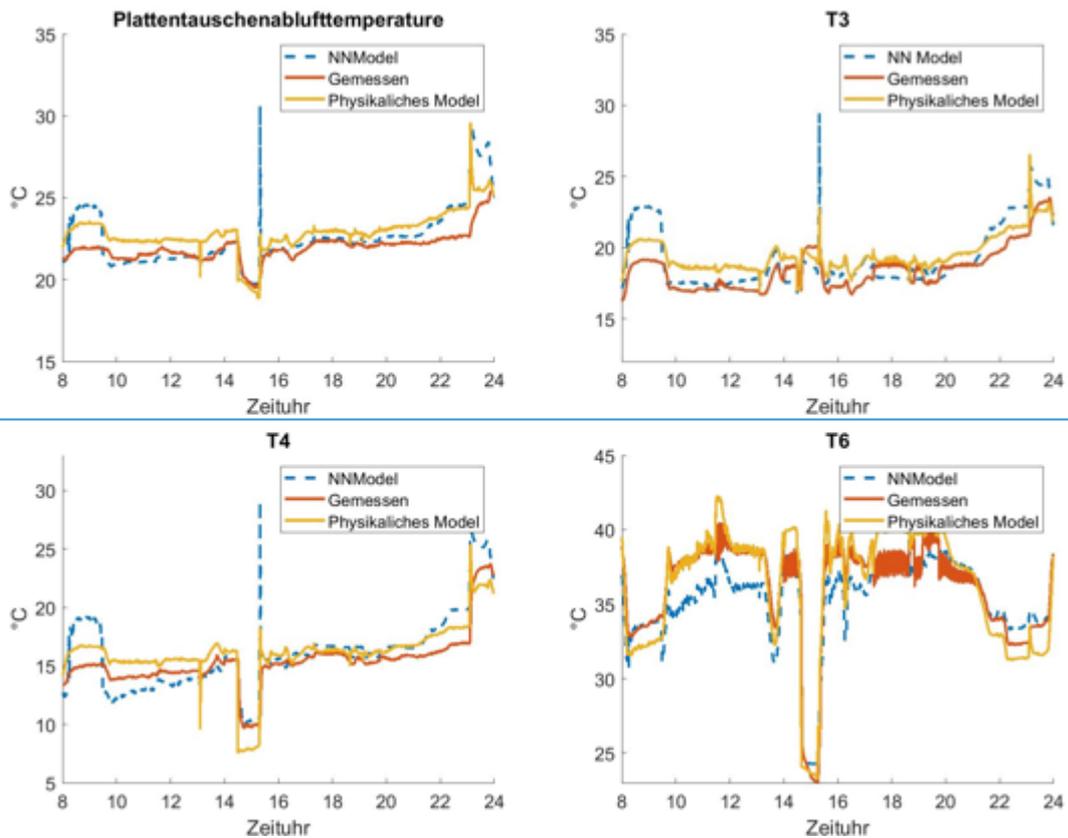


Abbildung 2-58: Vergleich der Temperaturen mit den verschiedenen Regelvarianten

Die dynamische Simulation mit dem neuronalen Netzmodell gibt die realen Daten im Trainingsbereich sehr gut wieder. Außerhalb des Trainingsbereichs kann das neuronale Netz nicht vorhersagen. Für einige Betriebsbereiche liegen nicht hinreichend Trainingsdaten vor, so dass das neuronale Netzwerk hier nicht hinreichend gut trainiert ist. Diese entsprechen den Betriebspunkten bei geöffneter Bypassklappe und eingeschaltetem Beckenwasserkondensator. Denn die Anzahl der Daten mit offenem Bypass ist unter den gesamten aufgezeichneten Daten vernachlässigbar klein.

### 2.6.7 Formulierung eines adaptiven Modells der prädiktiven Steuerung

Der erste Schritt bei der Erstellung der prädiktiven Modellsteuerung besteht darin, das Modell im normalen Betriebsmodus zu linearisieren. Wie im ersten Abschnitt beschrieben, kann das Gerät in verschiedenen Betriebsarten arbeiten, für die verschiedene linearisierte Modelle abgeleitet werden können.

Um das „Modell Predictive Control“ formulieren zu können, müssen wir das Modell als Zustandsraumform darstellen.

$$\begin{aligned} dx &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned}$$

*Formel 29 Zustandsraumdarstellung*

Dabei sind A, B, C und D Matrizen geeigneter Dimensionen, x ist der Zustandsvektor und u und y sind die Eingangs- und Ausgangsvektoren. Dies ergibt eine lineare Approximation eines nichtlinearen Systems, die in einem kleinen Bereich um einen Betriebspunkt gültig ist. Zur Beschreibung des linearisierten Modells wird ein neuer Satz von Variablen der Zustände definiert, wobei die Ein- und Ausgänge um den Arbeitspunkt zentriert sind:

$$\delta x(t) = x(t) - x_0$$

$$\delta u(t) = u(t) - u_0$$

$$\delta y(t) = y(t) - y_0$$

*Formel 30 Vektorformeln zur Zustandsraumdarstellung*

Die linearisierten Zustandsraumgleichungen in Bezug auf  $\delta x(t)$ ,  $\delta u(t)$  und  $\delta y(t)$  sind:

$$\delta \dot{x}(t) = A\delta x(t) + B\delta u(t)$$

$$\delta y(t) = C\delta x(t) + D\delta u(t)$$

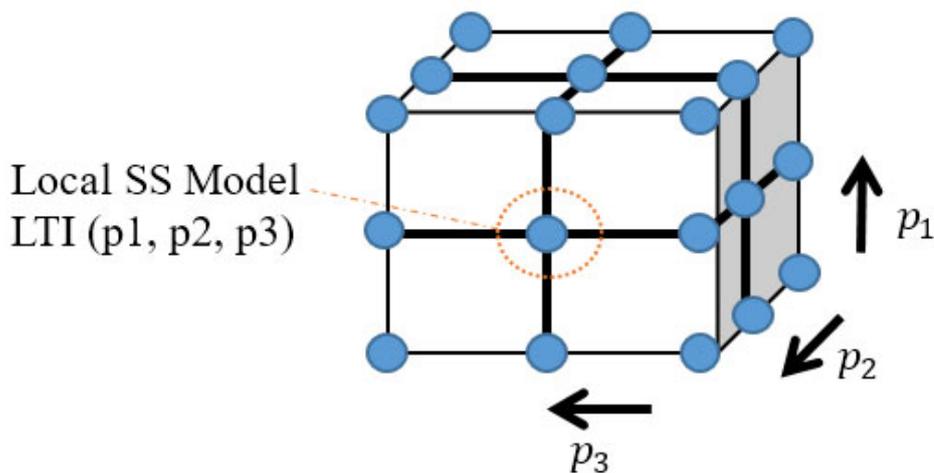
*Formel 31 linearisierte Zustandsraumdarstellung*

wobei A, B, C und D konstante Koeffizienten Matrizen sind. Diese Matrizen sind die Jacobi-Matrizen des Systems, die im Betriebspunkt ausgewertet werden.

Die Simulink-Software für den Regelungsentwurf linearisiert Blöcke, die keine vorprogrammierte Linearisierung haben, mit Hilfe numerischer Störungen. Die Software berechnet die Blocklinearisierung, indem sie die Zustände und Eingänge des Blocks numerisch um den Arbeitspunkt des Blocks stört. Der Block-Störungsalgorithmus führt eine kleine Störung in den nichtlinearen Block ein und misst die Reaktion auf diese Störung. Wenn die Zustandsraummatrizen von A, B, C und D in jeder Betriebsart bekannt sind, wird das linearisierte Modell in der Nähe dieser Betriebsart definiert.

Da es in diesem Fall keinen eindeutigen Betriebspunkt gibt und jedes LTI-Modell (Linear Time Invariant) nur um den Linearisierungspunkt  $x_0$ ,  $u_0$  und  $y_0$  herum gültig ist, müssen wir die Zustands-Raum-Matrizen des Modells bei verschiedenen Betriebsarten ableiten, um alle Betriebsarten abzudecken, die das Gerät normalerweise durchläuft.

$$\begin{aligned} dx &= A(p)x + B(p)u + \text{offsets} \\ y &= C(p)x + D(p) + \text{offsets} \end{aligned}$$



### Grid of State Space Models

Abbildung 2-59 Gitter von Zustandsraummodellen

So wird ein n-dimensionales Gitter gebildet, dessen Elemente ein lokales Zustandsraummodell in einer bestimmten Betriebsart repräsentieren, in der das Modell linearisiert wird. Die Zustandsraummodelle in der Nähe jedes Gitterpunktes werden durch Interpolation abgeleitet.

Einige Betriebsarten ändern nicht nur die Ableitungswerte, sondern auch das Ableitungszeichen.

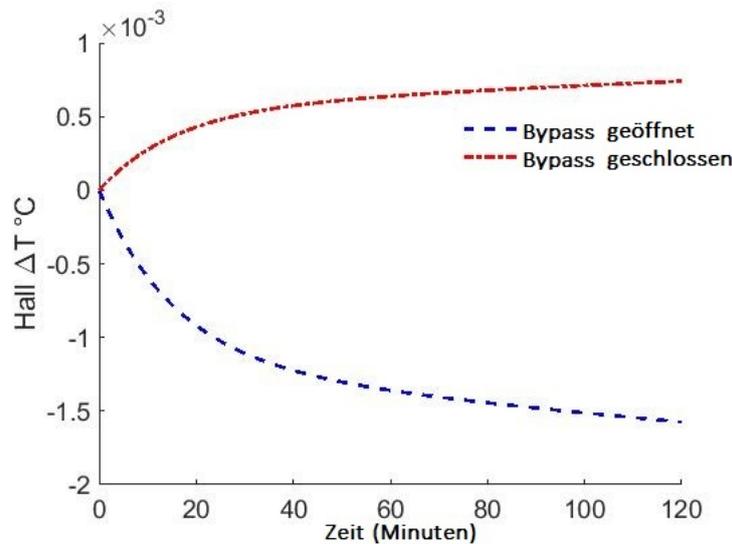


Abbildung 2-60: Auswirkung der Ventilator-drehzahl. auf die Hallentemperatur bei geöffneter und geschlossener Bypassklappe

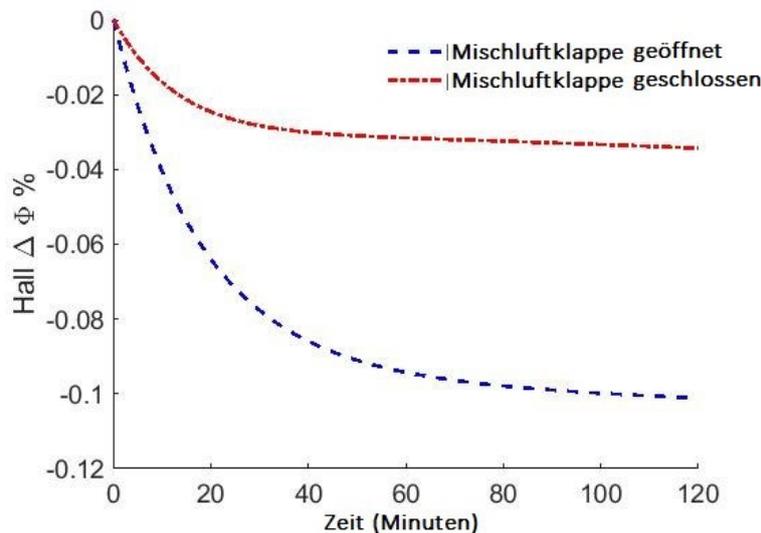


Abbildung 2-61: Auswirkung der Wärmepumpe auf die Hallenfeuchte bei geöffneter und geschlossener Mischluftklappe

So ist beispielsweise die Sprungantwort der Hallentemperatur in Abbildung 2-60 dargestellt, wenn sich die Ventilator-drehzahl durch Ändern des Sollwerts von 50% auf 51% sprunghaft erhöht. Die Antwort des Systems auf den Sprung am Eingang bewirkt eine Erhöhung der Hallentemperatur bei geschlossenem Bypass (Ansteuerung 0%), während bei geöffnetem Bypass (Ansteuerung 100%) die Hallentemperatur sinkt und es keine Wärmerückgewinnung gibt.

Abbildung 2-61 zeigt die Sprungantwort des Modellausgangs "Hallenfeuchte" auf die sprunghafte Änderung der Wärmepumpe von 30% auf 31% Ansteuerung. Wie bereits beschrieben, leitet die Mischklappe die entfeuchtete Luft zum Wärmetauschereinlass und zur Zuluft weiter. Wenn also die Mischklappe geschlossen ist, hat die Wärmepumpe keinen Einfluss auf die Hallenfeuchte.

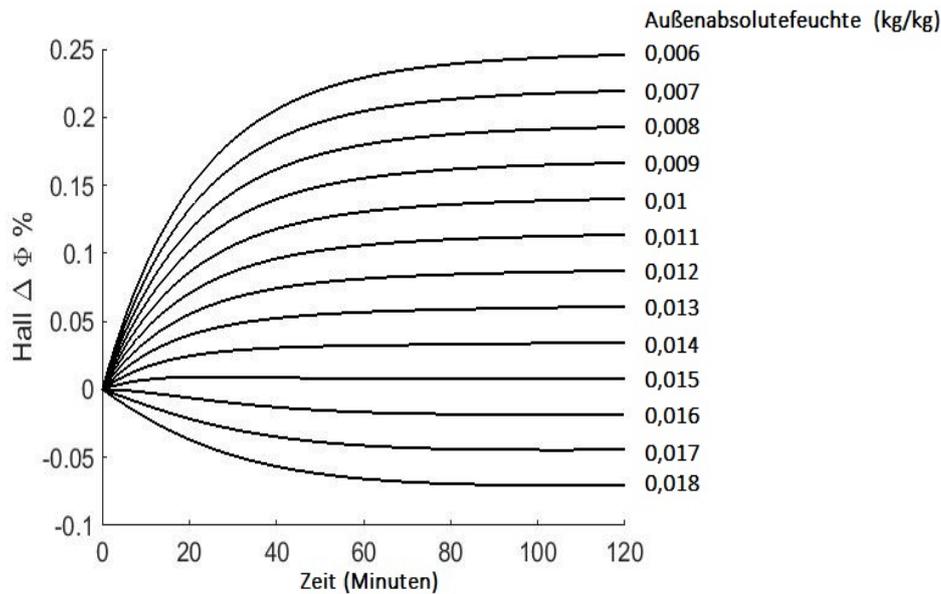


Abbildung 2-62: Auswirkung der Mischluftklappe auf die Hallenfeuchte bei versch. absoluten Außenluftfeuchten

(Abbildung 2-62) zeigt die Sprungantworten der Hallenfeuchte bei verschiedenen absoluten Außenluftfeuchten. Hierbei wurde die Wärmepumpe mit einer Ansteuerung von 30% betrieben und die Mischluftklappe sprunghaft von 15% auf 16% geöffnet. Es zeigt sich, dass der Einsatz der Wärmepumpe die Hallenfeuchte erhöhen kann, wenn die Außenluftfeuchtigkeit unter 15 g/kg liegt. Durch das Öffnen der Mischklappe wird der Außenluftanteil reduziert.

Um all diese unterschiedlichen Betriebspunkte zu berücksichtigen, wird die Toolbox "Linear Parameter Varying" des Simulink verwendet. Ein Raster von Werten für die Planungsparameter Bypassklappe, Mischklappe, Außenlufttemperatur und Außenluftfeuchtigkeit wird erstellt. Bei jedem Wert wird das entsprechende lineare System als Zustands-Raum-Matrix angegeben. Die Parameter sind skalarisch bewertete Größen, mit denen die lokale Dynamik im Betriebsraum ermittelt wird. Das richtige linearisierte Modell erhält man durch Interpolation dieser linearen Systeme.

So wird beispielsweise das physikalische Modell, in den folgenden Betriebspunkten linearisiert:

- Bypass (offen/geschlossen),
- Mischklappe (offen/geschlossen),
- Lufterhitzer (offen/geschlossen),
- Beckenwasserkondensator (offen/geschlossen)

Bei folgender Annahme:

- Außenlufttemperatur = [10, 20, 25, 30] und
- Absolute Außenluftfeuchtigkeit = [6, 10, 14, 18] (g/kg Luft)

Daraus ergibt sich eine 6-dimensionale Matrix mit 256 Betriebspunkten. Für jede Betriebsart wird ein LTI-Modell (Linear Time Invariant) erstellt und in einer Matrix gespeichert. Die Toolbox "Linear Parameter Varying" verwendet in dieser Matrix die Istwerte der Parameter und erstellt ein interpoliertes LTI-Modell, das für die Steuerung verwendet wird.

Die prädiktive Steuerung wird mit den folgenden Werten formuliert:

Fünf (5) manipulierte Variablen:

- Bypassklappe,
- Umluftklappe,
- Mischklappe,
- Wärmepumpe,
- Luftherhitzer
- Ventilator Drehzahl.

Neun (9) gemessene Störungen:

- Außentemperatur,
- Außenluftfeuchtigkeit,
- Strahlung,
- Anzahl der Benutzer,
- WPE9 Zulufttemperatur,
- WPE9 Zuluftfeuchtigkeit,
- WPE9 Volumenstrom,
- Cafeteria temperatur,
- Beckenwassertemperatur.

Vier (4) Ausgänge:

- Halltemperatur,
- Hallenfeuchte,
- äquivalenter Energieverbrauch,
- Zulufttemperatur.

Bei jedem Zeitschritt verwendet der Regler die vorhergesagten Anlagenausgänge zur Lösung eines quadratischen Programmieroptimierungsproblems, um optimale Regelbewegungen zu bestimmen.

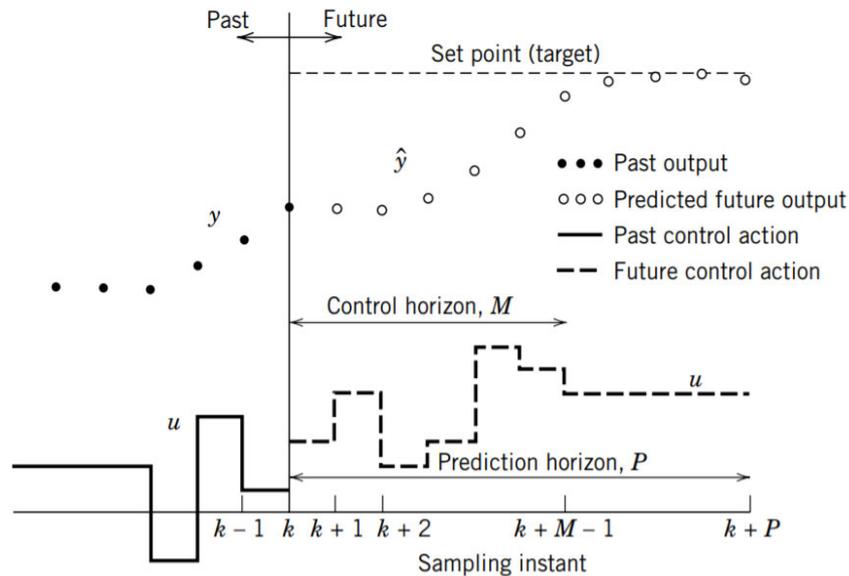


Abbildung 2-63 Vorhersagendarstellung MPC

Die Lösung des Optimierungsproblems ist eine Sequenz von Steuersignalen "U" durch den Steuerhorizont "M", die die Zielfunktion minimiert und folgende Merkmale umfasst:

- Die Ziel-, oder auch die "Kosten-", Funktion: Ein skalares, nicht negatives Maß für die zu minimierende Leistung des Controllers.
- Einschränkungen: Bedingungen, die die Lösung erfüllen muss, wie z.B. physikalische Grenzen für Steuersignale und Anlagenausgangsgrößen.
- Entscheidung: die Steuersignalanpassungen, die die Kostenfunktion minimieren und gleichzeitig die Einschränkungen erfüllen.

Um die Zielfunktion zu minimieren, hält der Regler die ausgewählten Anlagenausgänge auf oder in der Nähe von spezifizierten Referenzwerten.

$$\min \sum_{j=1}^{ny} \sum_{i=1}^P \left[ \frac{w_j}{s_j} (y_{ref_j} - y(t+i)_j) \right]^2 = f(\sum_{t=1}^M u(1)_t, \dots, u(nu)_t)$$

- ny → Anzahl der Ausgänge
- nu → Anzahl der Kontrollsignale
- P → Vorhersage Horizont
- w → Tuning Gewichtungsfaktor
- s → Skalierungsfaktor
- M → Kontroll Horizont

Formel 32 Minimierung der Zielfunktion

Die Ausgänge sind so definiert, dass sie sowohl Kriterien des menschlichen Komforts (Hallentemperatur, Hallenfeuchtigkeit und Zulufttemperatur) als auch des Energieverbrauchs (elektrische und thermische Leistungsaufnahme) umfassen.

*Bei einer Abtastrate von einer Minute, einem Vorhersagehorizont von zwei Stunden, einem Kontrollhorizont von zwei Stunden und den folgenden in*

*Tabelle 2-8 und*

Tabelle 2-9 angegebenen Gewichtungs- Faktoren:

Steuerbare Variablen	Min	Max	Gewichtung
Bypassklappe	0	100	0.4
Umluftklappe	0	66	0.4
Mischluftklappe	0	100	0.4
Wärmepumpe	0	100	0.4
Luftherhitzer	0	100	0.4
Ventilator	50	100	0.4

*Tabelle 2-8: Gewichtungsfaktoren der steuerbaren Variablen*

Ausgangsvariablen	Min	Max	Skalierungsfaktor	Gewichtung
Hallen T	28	33	3	1
Hallen Phi	25	75	30	2
Leistung	0	50	50	0.5
Zuluft T	25	45	50	0.1

*Tabelle 2-9: Gewichtungsfaktoren der Ausgangsvariablen*

Die Gewichtungs- Faktoren können durch „Try and Error“ abgeleitet werden, bis eine stabile Einstellung gefunden ist.

Der Skalierungsfaktor sollte gleich (oder ungefähr) der Spannweite der Variablen sein. Die Spannweite ist die Differenz zwischen ihrem Maximal- und Minimalwert in technischen Einheiten, d.h. der im Anlagenmodell angegebenen Maßeinheit. Intern dividiert die MPC jedes Eingangs- und Ausgangssignal der Anlage durch seinen Skalierungsfaktor, um dimensionslose Signale zu erzeugen.

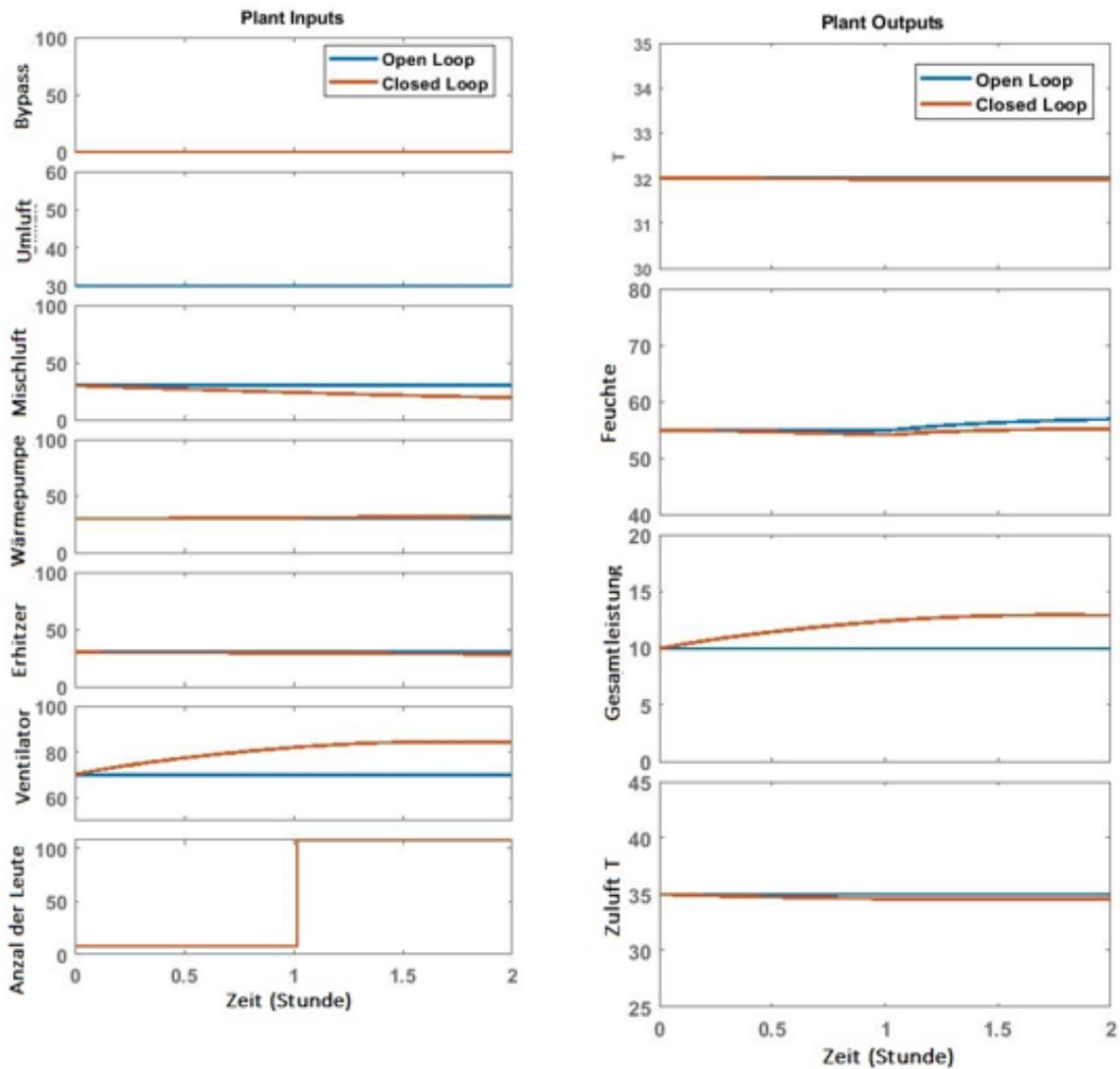


Abbildung 2-64: Reaktionen des neuronalen Netzwerks

Die obigen Diagramme zeigen die vom neuronalen Netz berechneten Voraussagen. Verglichen wird hier ein offener und ein geschlossener Regelkreis mit einer Voraussage von 60 Minuten, bei der sich die Anzahl der Besucher nach einer Stunde Sprunghaft von 20 auf 120 Personen erhöht. Der offene Regelkreis berechnet, dass die Luftfeuchtigkeit innerhalb von 60 Minuten auf über 70% ansteigt, wenn keine Maßnahmen ergriffen werden. Der geschlossene Regelkreis berechnet die MPC-Reaktion. 60 Minuten vor der Zeit wird versucht, den Sollwert von 55 % durch allmähliches Öffnen der Umluftklappe und Erhöhung der Ventilatordrehzahl sanft zu erreichen. Da dieses zu einer Absenkung der Temperatur führt, erhöht der Regler gleichzeitig die Ansteuerung von Luftherhitzer und Wärmepumpe, um diesen Effekt zu kompensieren.

## 2.7 Testphase und Validierung der Ergebnisse

Die vier Regelstrategien (konventionelle Steuerung, optimierte konventionelle Steuerung, physikalisches Modell und neuronales Netzwerk) wurden im Jahr 2019 drei Wochen lang in Folge getestet, wobei jede Strategie eine Woche lang annähernd kontinuierlich lief. In der folgenden Tabelle sind die Betriebszeiten der jeweiligen Tests festgehalten.

Betriebsmodus	Betrieb				Unterbrechung			
	Von		Bis		Von		Bis	
	Datum	Zeit	Datum	Zeit	Datum	Zeit	Datum	Zeit
<b>Konventionelle Steuerung</b>	04.09.	00:00	09.09.	23:59	--	--	--	--
<b>Optimierte konventionelle Steuerung</b>	18.09.	00:00	23.09.	23:59	--	--	--	--
<b>Physikalisches Modell</b>	02.10.	00:00	06.10.	03:40	06.10.	03:41	06.10.	09:53
	06.10.	09:54	07.10.	23:59	--	--	--	--
<b>Neuronales Netzwerk</b>	18.10.	00:00	20.10.	03:39	20.10.	03:40	20.10.	09:29
	20.10.	09:30	20.10.	20:46	20.10.	20:47	20.10.	22:51
	20.10.	22:52	23.10.	23:59	--	--	--	--

Während dieses Zeitraums wurden für jede Regelstrategie folgende Anzahlen an Datensätzen gespeichert.

Modell	Datensätze
Konventionelle Steuerung	8640
Optimierte konventionelle Steuerung	8640
Physikalisches Modell	8268
Neuronales Netzwerk	8167

Tabelle 2-10: Anzahl der Datensätze – Vergleich Regelalgorithmen

Wie oben ausgeführt, kam es bei den Tests teilweise zu Unterbrechungen der Datenaufzeichnung. Gründe hierfür waren Unterbrechungen zwischen der DDC und der virtuellen Maschine, Anpassungen der Modelle und manuelles Abschalten im Freizeitbad Ramsloh. Die dadurch verlorengegangenen Daten wurden entfernt, was die Unterschiede in den Häufigkeiten erklärt. Da es bei den Tests zu verschiedenen äußeren Einflüssen wie Außenlufttemperatur, Außenluftfeuchtigkeit, Einstrahlung der Sonne und Anzahl an Badegästen kam, sind die Vergleiche nur bedingt aussagekräftig. Die Verteilung der Abluft- und Außenluft Temperaturen und Feuchten sind in den Abbildungen Abbildung 2-65 und Abbildung 2-66 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die äußeren Randbedingungen nicht zu 100% reproduzierbar waren. So ist z.B. in dem Zeitraum, wo der physikalische basierte Regler getestet wurde, die Außentemperatur im Mittel deutlich niedriger.

## Außenlufttemperatur

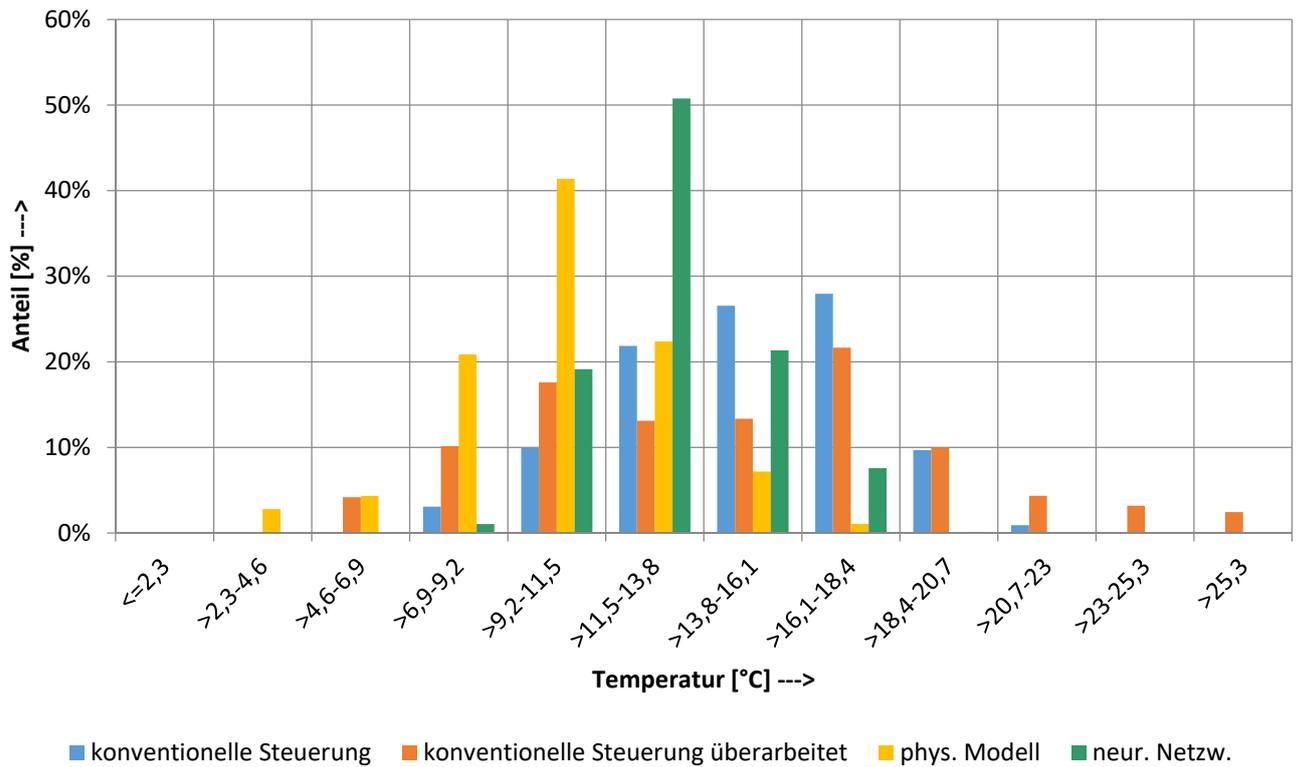


Abbildung 2-65: Verteilung der Außenlufttemperaturen während der Testphase

## relative Außenluftfeuchte

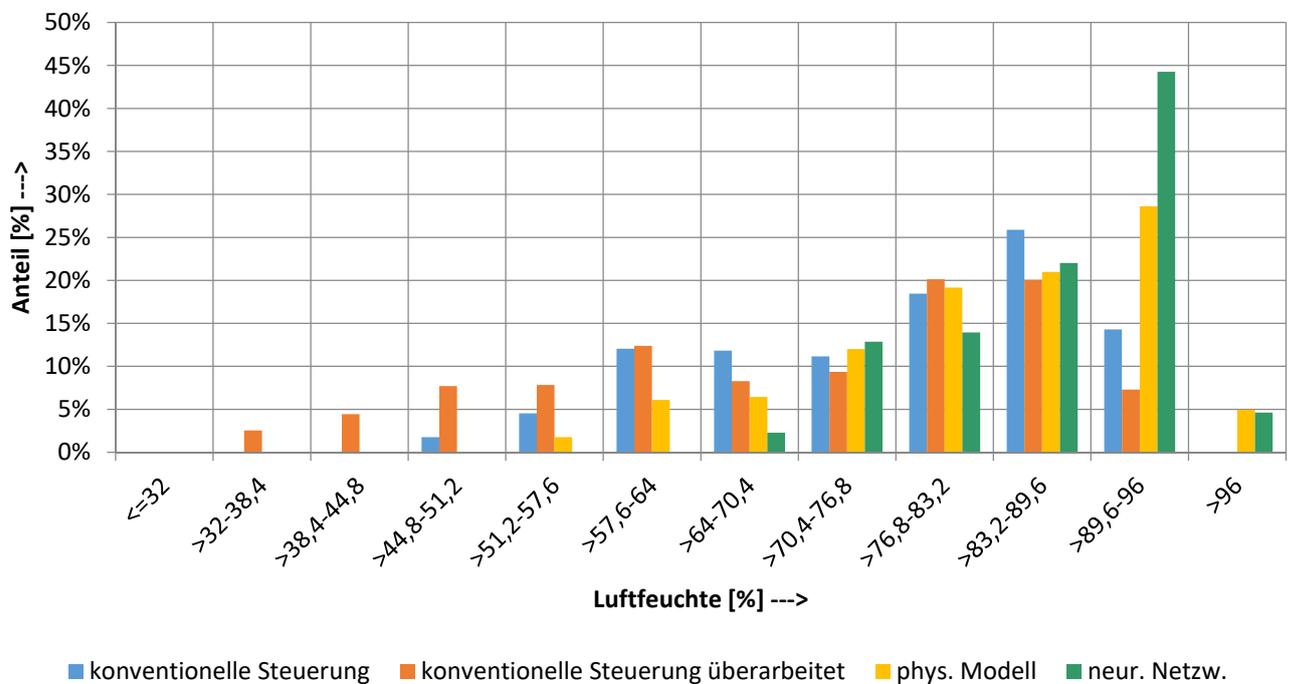


Abbildung 2-66: Verteilung der Außenluftfeuchtigkeit während des Tests

Da die verschiedenen Regelstrategien unterschiedlich arbeiten und verschiedene Belegungszahlen und weitere Einflüsse auf die Halle während des Tests einfließen, ergaben

sich auch verschiedene Hallenbedingungen, die in der Ablufttemperatur und Abluftfeuchte zu erkennen sind. Diese sind in den folgenden Diagrammen für den Testzeitraum dargestellt.

### Ablufttemperatur

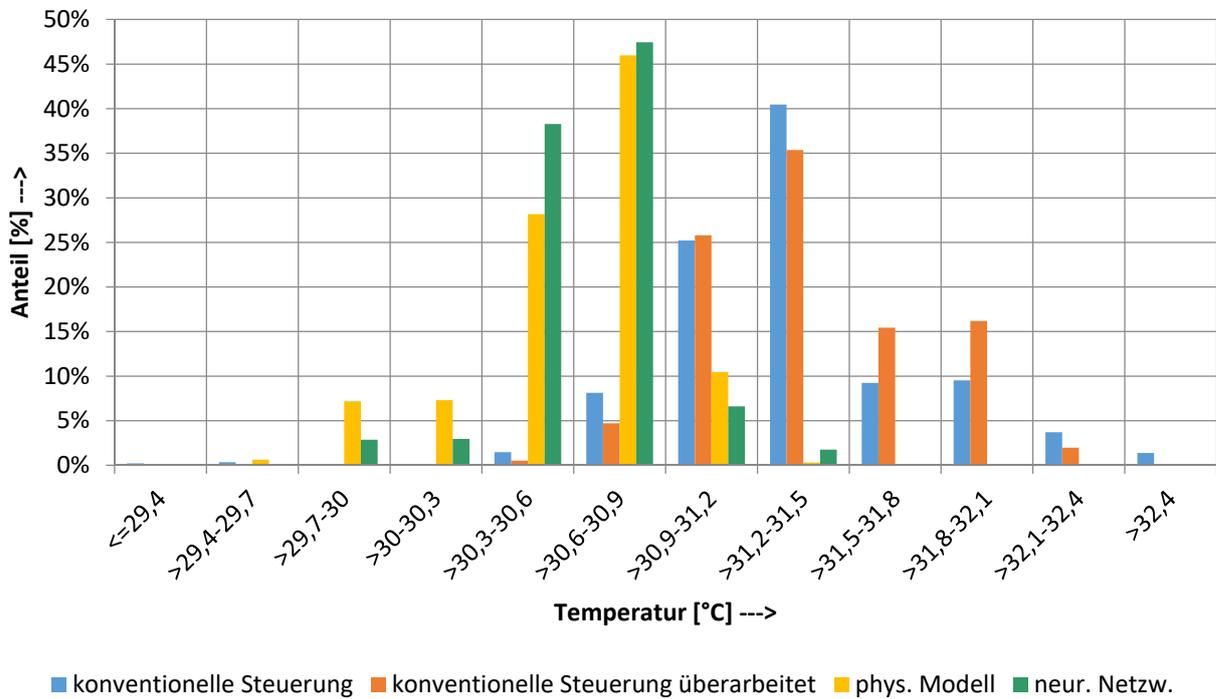


Abbildung 2-67: Verteilung der Ablufttemperaturen während des Tests

### relative Abluftfeuchte

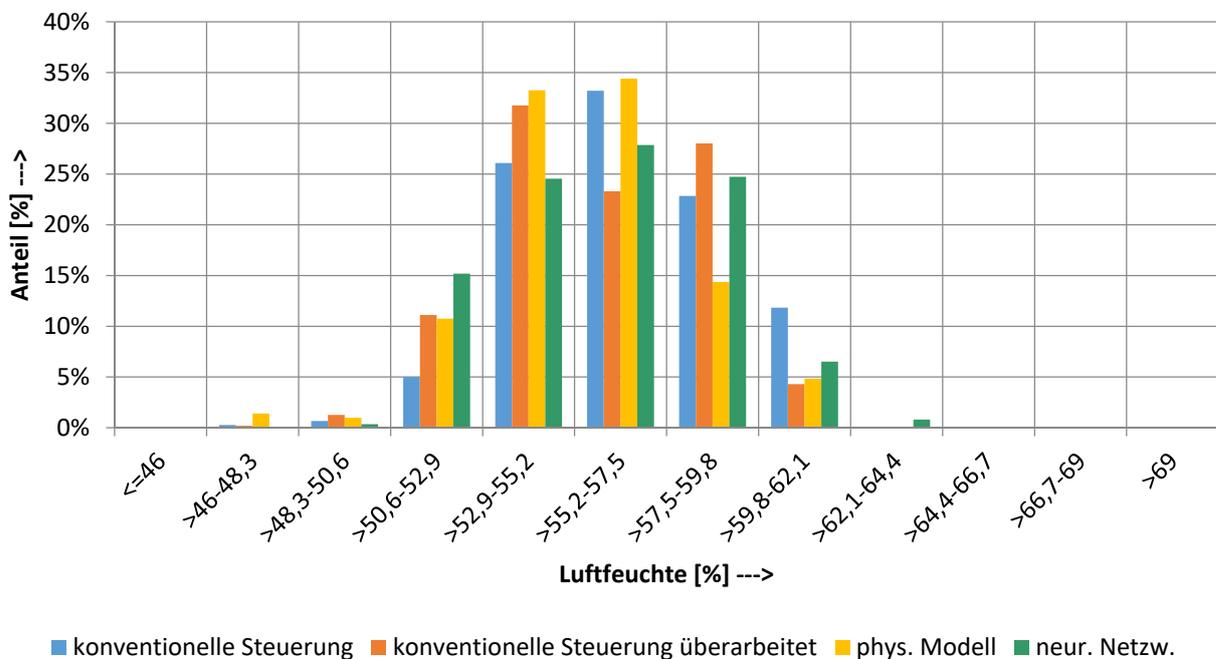


Abbildung 2-68: Verteilung der relativen Abluftfeuchte während des Tests

Es ist erkennbar, dass die modellbasierten Regelansätze jeweils auf eine niedrigere Hallentemperatur regeln, weil hier tatsächlich auf die mittlere gemessene Raumtemperatur in der Halle geregelt wird, während die konventionelle Regelung auf die Ablufttemperatur- und

feuchte direkt vor dem Lüftungsgerät regeln. Ein Teil der im Folgenden dargestellten Einsparung ist somit auch auf die Reduzierung der Raumtemperatur zurückzuführen. Es gab keine negative Rückmeldung, dass der Komfort der Badegäste beeinträchtigt war. Für einen besseren Vergleich sollen in der verbleibenden Projektzeit die konventionellen Regelansätze ebenfalls mit reduzierten Temperatursollwerten betrieben werden.

Im folgenden Abschnitt sind die Einsparungen dargestellt, die mit den verschiedenen Regelstrategien nach derzeitigem Stand erreicht wurden. Hier wurde bei der Betrachtung als Bezug die konventionelle Regelstrategie genommen (100%). Betrachtet werden hier die 4 wesentlichen Größen:

- Umgewandelte elektrische Energie
- Umgewandelte Wärmeenergie
- Kosten
- Erzeugte Mengen an  $CO_2$ Emissionen.

Die  $CO_2$ -Emissionen wurden auf Grundlage von Angaben des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle [12] errechnet. Für die Berechnung der Kosten wurden marktübliche Energiepreise angenommen. So wurde für eine kWh Gas mit 0,05€ und für eine kWh elektrischer Energie mit 0,2€ gerechnet. Die realen Energiepreise sind sehr komplex zu ermitteln, da das Freizeitbad Ramsloh über ein BHKW verfügt und hiermit das Warmwasser teilweise als „Abfallprodukt“ erzeugt wird.

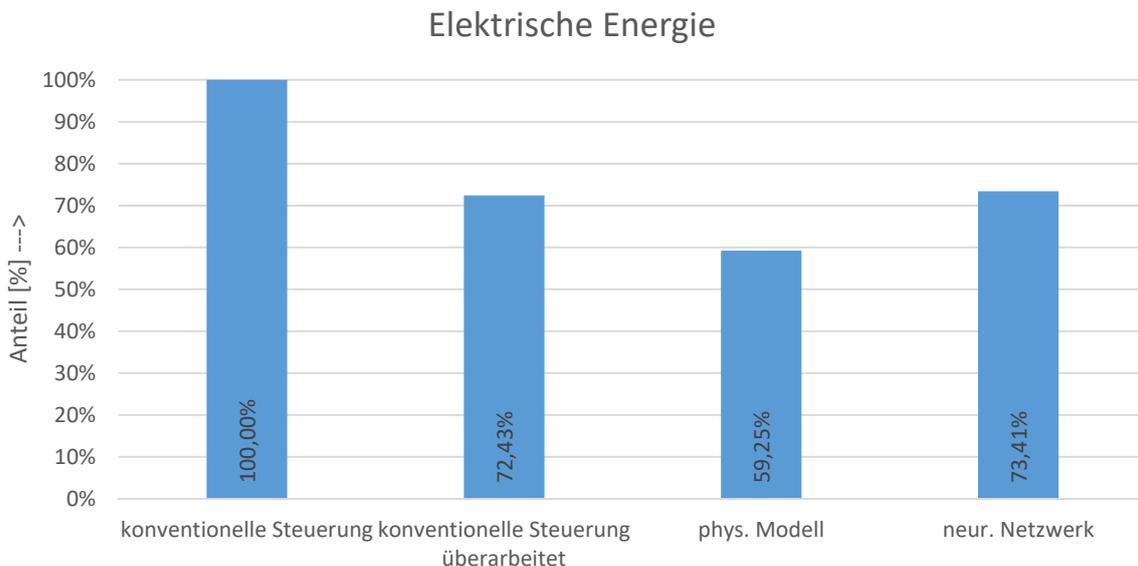


Abbildung 2-69: *Einsparung elektrischer Energie*

Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist noch zu berücksichtigen, dass bei den modellbasierten Regelstrategien auch der Energiepreis in die Regelstrategie einfließt. Weiterhin können auch unterschiedliche Wichtungen vorgegeben werden, so kann z.B. auf optimierte  $CO_2$ -Emissionen geregelt werden. In dieser Kampagne wurden die Energiekosten mit einem hohen Wichtungsfaktor versehen.

Bei der Betrachtung des elektrischen Energieverbrauches ist bereits mit der überarbeiteten konventionellen Steuerung ein deutlicher Rückgang von 28% zu erkennen, hauptsächlich basierend auf einer Reduktion des Volumenstromes sowie einer wirkungsgradabhängigen Aktivierung der Wärmepumpe. Das physikalisch basierte Modell zeigt sogar eine 40%-ige

Reduktion der elektrischen Leistung, während das neuronale Modell ähnlich wie die optimierte konventionelle Regelung 27% niedrigere Stromaufnahme zeigt.

Dieses Bild ist nur vollständig mit der Betrachtung der Wärmeenergie.

### Wärmeenergie PWW

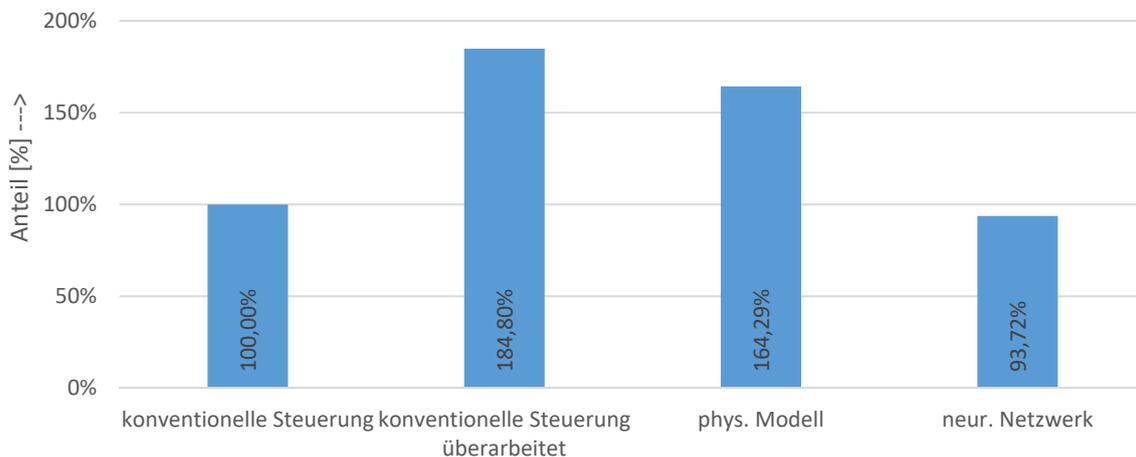


Abbildung 2-70: Einsparung Wärmeenergie

Während die konventionelle optimierte Regelung hier eine deutlich höhere Wärmeaufnahme zeigt, obwohl die Außentemperatur im Vergleich zu den anderen Messabschnitten im Mittel höher liegt, weist die KI-Regelung (neuronales Netzwerk) nochmal eine Reduktion von 7% auf. Allerdings ist bei der Regelung mit physikalisch basiertem Modell auch die Außentemperaturverteilung am niedrigsten.

### Gesamtkosten Strom und Gas

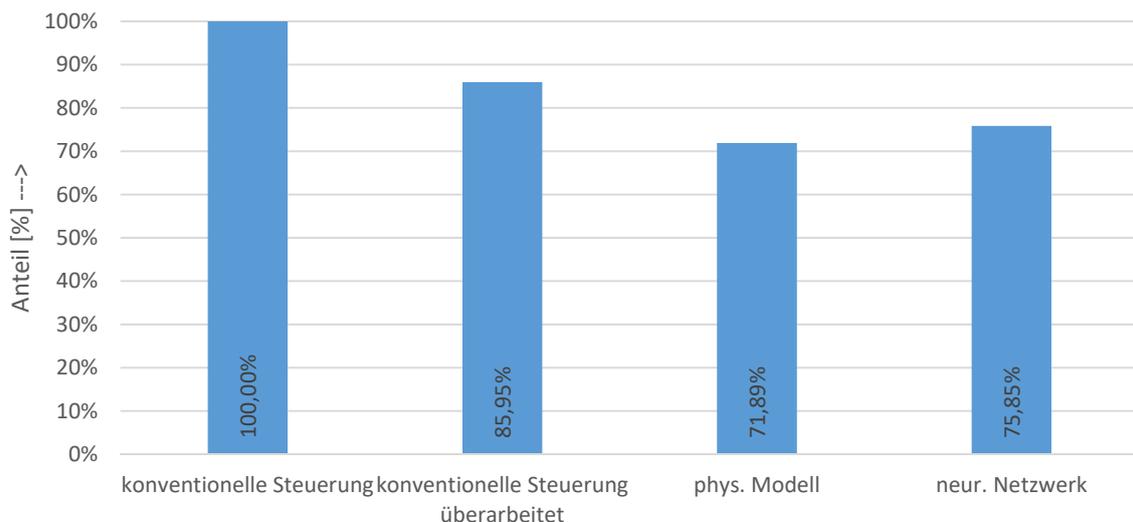


Abbildung 2-71: Einsparung Kosten

Betrachtet man die Gesamtenergiekosten, so ist (im jeweils hier betrachteten Zeitraum) für alle drei Ansätze eine Kostenreduktion von 14 bis 28% möglich.

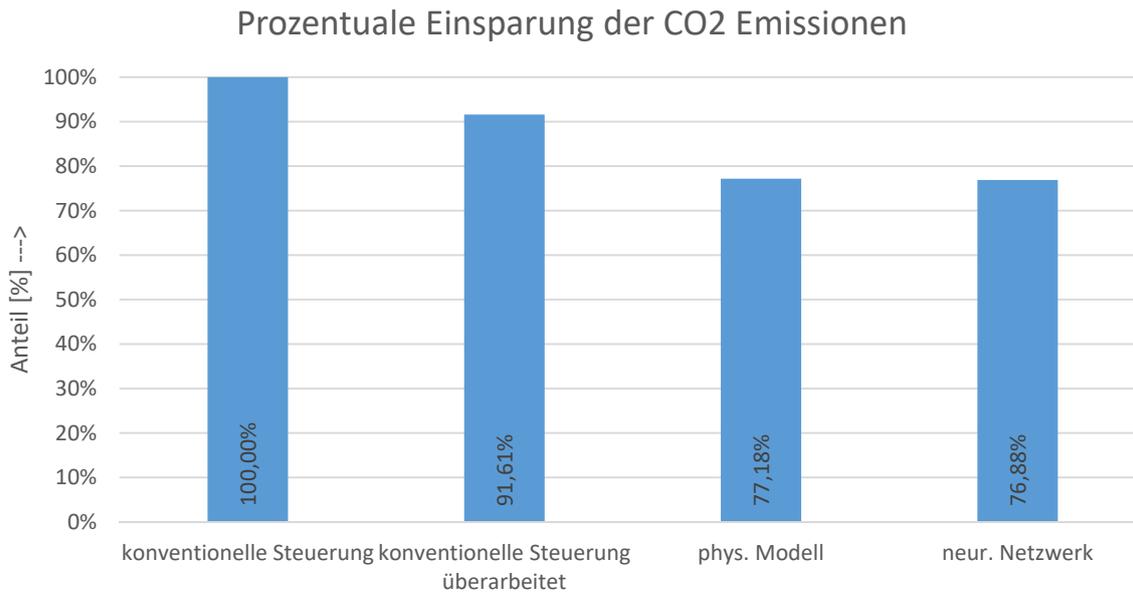


Abbildung 2-72: Einsparung von CO<sub>2</sub> Emissionen

Mit den hier vorliegenden Randbedingungen und Regelansätzen ergeben sich CO<sub>2</sub>-Emissions-Einsparungen von 9 bis 23%.

Wie bereits ausgeführt, stellen diese Ergebnisse eine Momentaufnahme dar, die aber eine sehr positive Tendenz zeigen. Es gilt jetzt, diese Ansätze über einen längeren Zeitraum zu betrachten. Dies war leider bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht möglich, da das Freizeitbad Ramsloh seit dem 01.11.2019 wegen renovierungsarbeiten geschlossen war und im März, als wieder geöffnet werden sollte, die Corona Pandemie zur verlängerten Schließung führte. Mittlerweile ist das Bad mit reduzierter Besucherzahl wieder geöffnet, die Geräte wurden allerdings auf 100% Außenluftbetrieb umgestellt um einen möglichst hygienischen Betrieb zu ermöglichen.

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der modellbasierten Regelstrategien nochmal etwas genauer betrachtet.

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die „Referenz-Tracking-Performance“ für einen Stichtag mit den verschiedenen Regelstrategien. Wie man sieht, steigt die Luftfeuchtigkeit in der Halle am Nachmittag an, wenn die Anzahl der Personen steigt. Die neu entwickelten Regelstrategien legen größeren Wert darauf, den Energieverbrauch niedrig zu halten, als um jeden Preis den Feuchtesollwert einzuhalten. Dadurch können sich, durch Erhöhen des Gewichtungsfaktors für die Feuchte, die Hallenfeuchte und auch der dazugehörige Sollwert ändern. Der Hallentemperatur Sollwert dagegen wird mit den modellbasierten Regelstrategien deutlich besser eingehalten. Ein deutlicher Überschwinger der konventionellen Steuerung deutet darauf hin, dass die Regelung auf einen direkt vor dem Gerät platzierten Fühler nicht zielführend ist, weil die Randbedingungen in der Halle nicht gut genug erfasst werden. Somit wäre auch eine weitere Optimierung der konventionellen Regelung dahingehend denkbar, dass auch hier auf die tatsächlichen Hallenwerte geregelt wird.

Dieses verdeutlicht auch noch einmal, dass eine Regelung, gleich welcher Art, nur mit einer guten Messdatenbasis das volle Potential eines energieoptimierten Lüftungsbetriebes darstellen kann. Mut machen hier Entwicklungen im Sensorbereich, da jetzt verstärkt kabellose Systeme am Markt verfügbar sind, die mit geringem Aufwand sowohl in Neubauten als auch in Bestandsgebäuden installiert werden können.

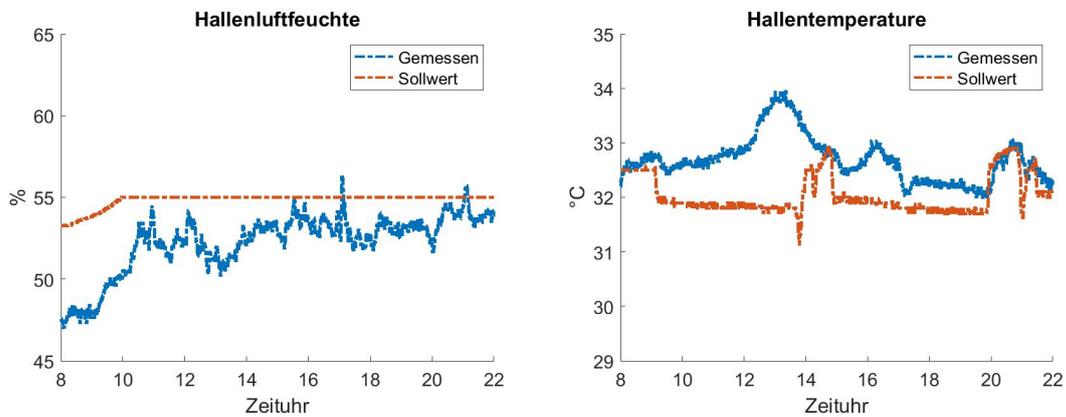


Abbildung 2-73: Konventionelle Steuerung Soll-Istwert Verfolgung

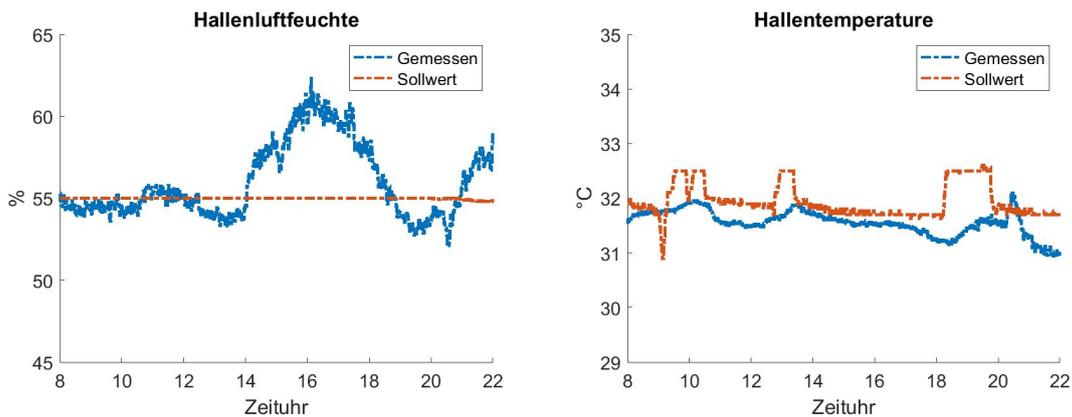


Abbildung 2-74: Physikalisches Model Soll-Istwert Verfolgung

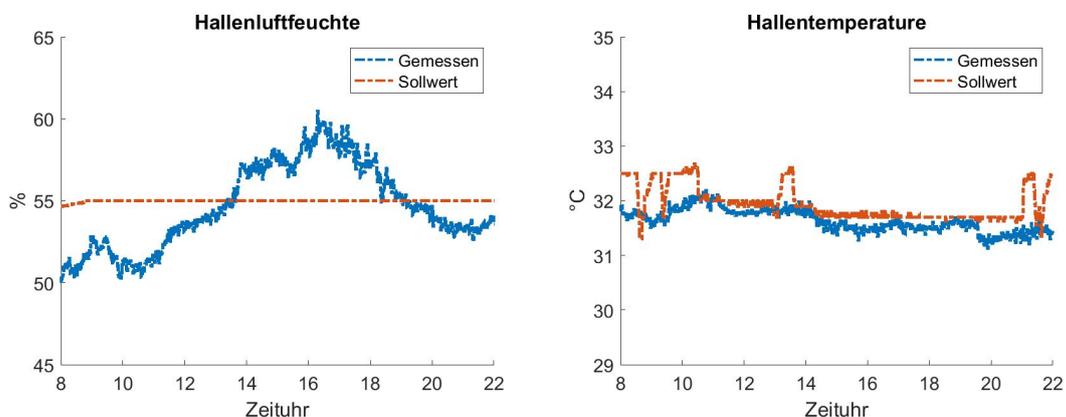


Abbildung 2-75: Neuronales Netzwerk Soll-Istwert Verfolgung

Die folgenden Diagramme vergleichen die Steuersignale während der Testphase für konventionelle und modellbasierte Steuersysteme.

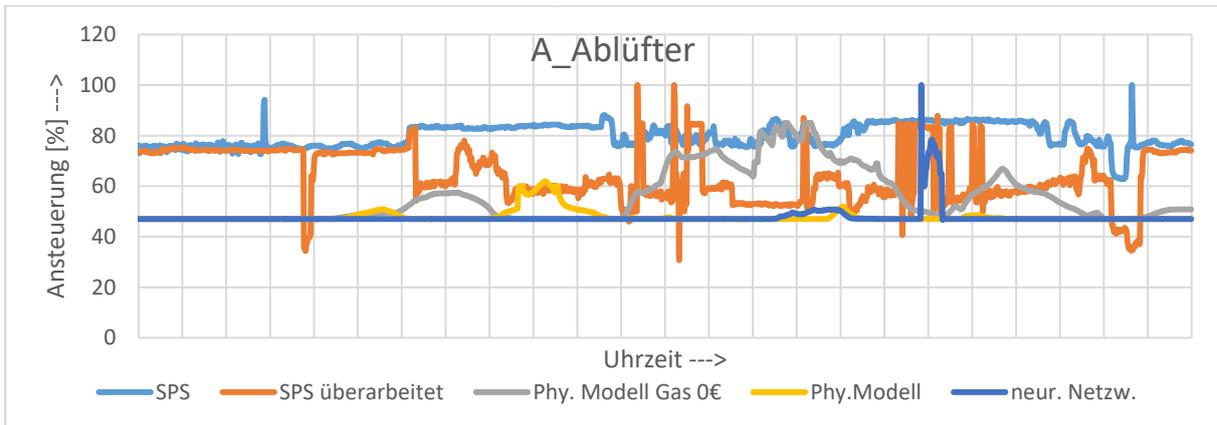


Abbildung 2-76: Ansteuerung des Ablüfters in der Testphase

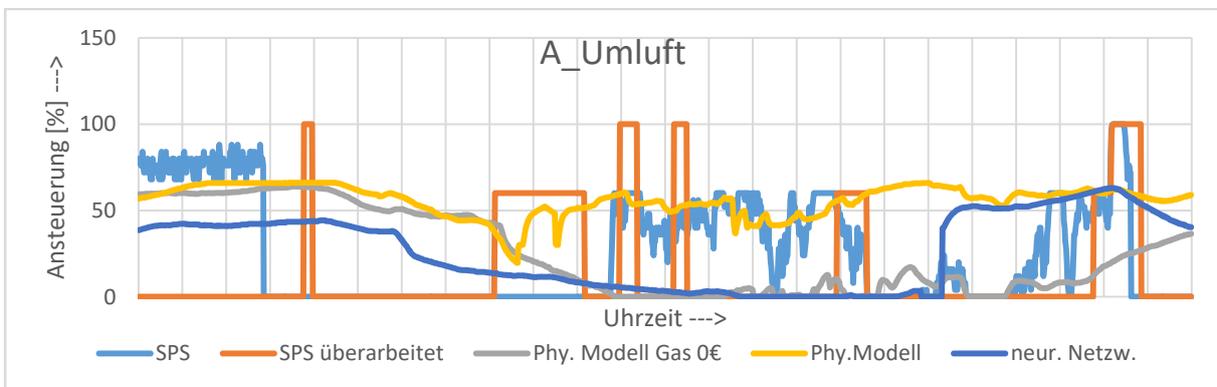


Abbildung 2-77: Ansteuerung der Umluftklappe während der Testphase

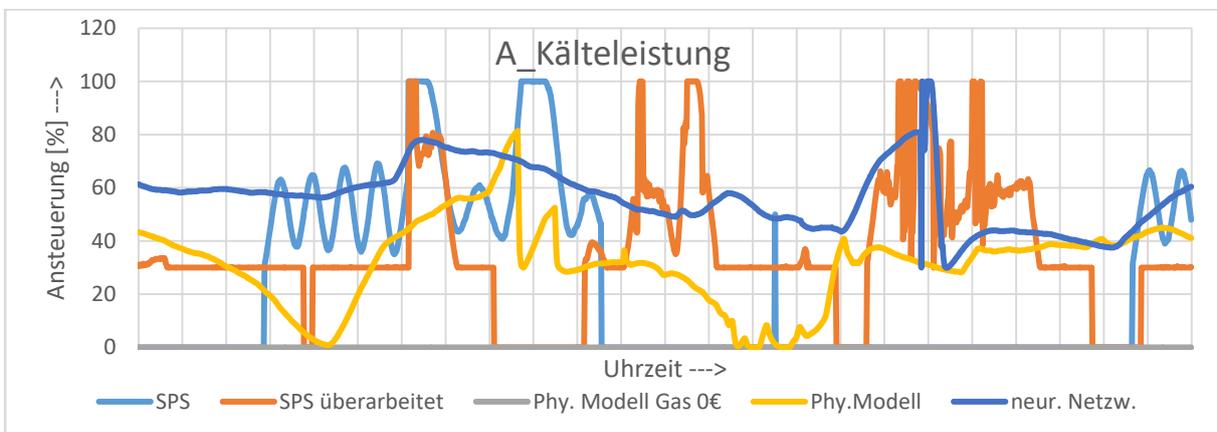


Abbildung 2-78: Ansteuerung der Kälteanlage während der Testphase

Die Diagramme zeigen, dass die modellbasierte Steuerung während des Tages mehr Außenluft zur Entfeuchtung verwendet, und die Ventilatorgeschwindigkeit auf dem geringstmöglichen Niveau gehalten hat, um die gewünschte Komfortbedingung zu erfüllen. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse einen reibungsloseren Betrieb in modellbasierten Reglern im Vergleich zu konventionellen Reglern, indem sie einer vorberechneten Trajektorie optimaler Signale im Voraus folgen, wobei Faktoren wie Wetterbedingungen, Anzahl der Personen in der Halle und die Vorhersage des Geräteverhaltens berücksichtigt werden.

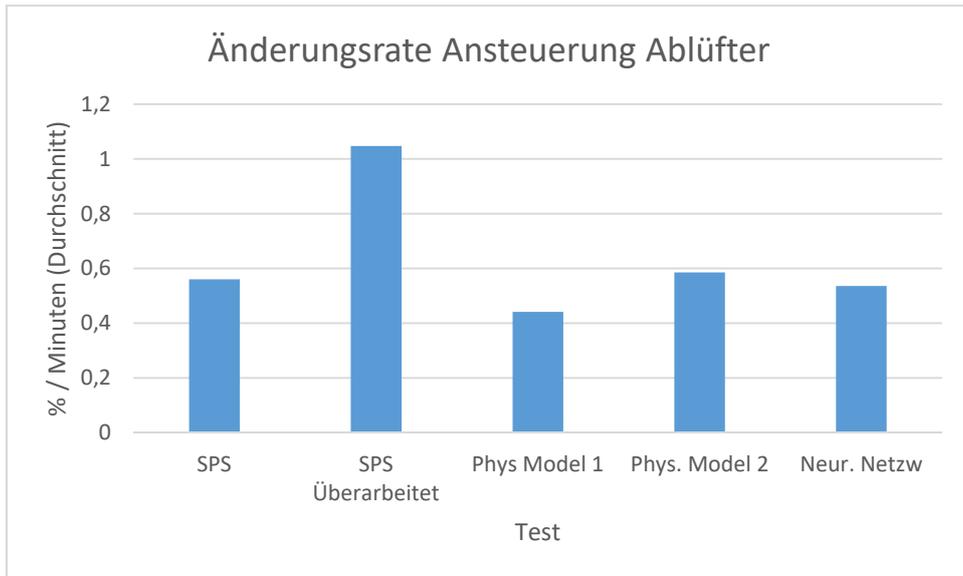


Abbildung 2-79: *Änderungsrate Ansteuerung Ablüfter*

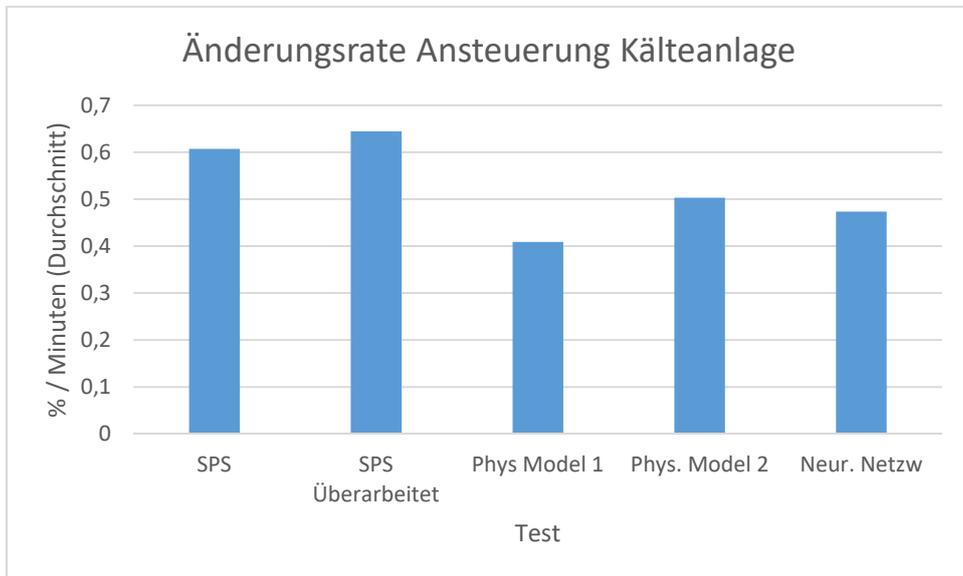


Abbildung 2-80: *Änderungsrate Ansteuerung Kälteanlage*

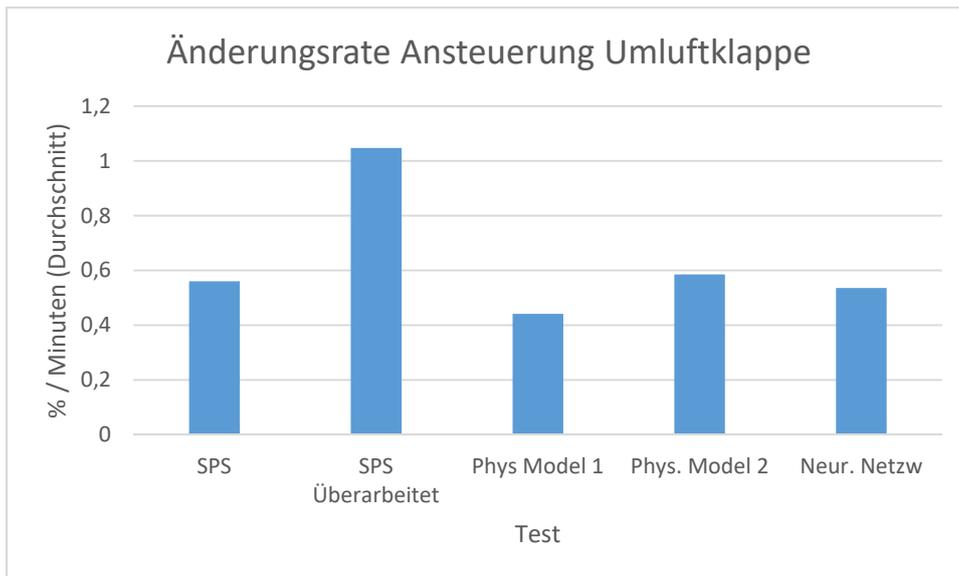


Abbildung 2-81: *Änderungsrate Ansteuerung Umluftklappe*

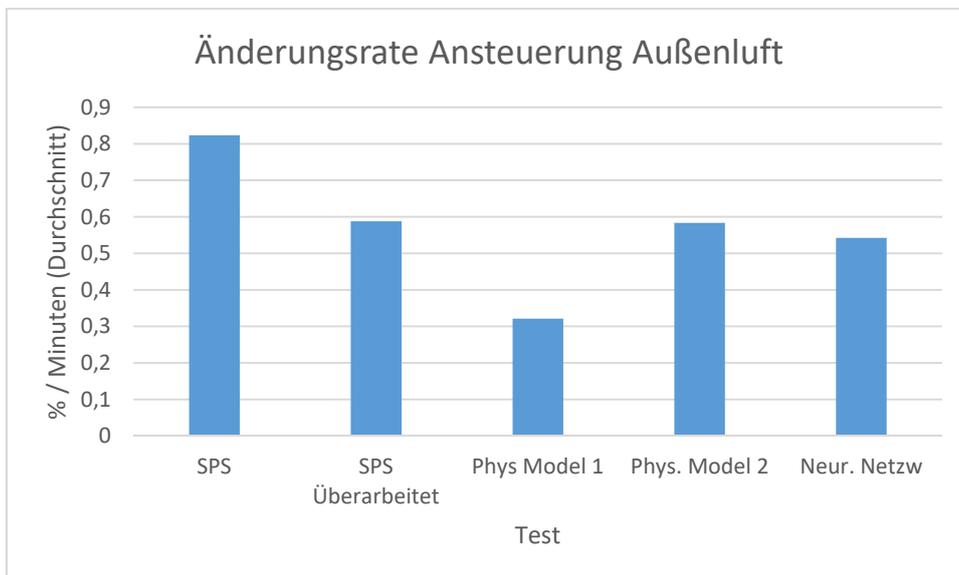


Abbildung 2-82: *Änderungsrate Ansteuerung Außenluft*

Die obigen Grafiken zeigen die durchschnittliche Änderungsrate der Steuersignale pro Minute während der Testphase. Sie zeigt eine über 30%ige Reduzierung der Änderungsrate der Steuersignale in der MPC im Vergleich zu konventionellen Reglern. Oszillationen treten in konventionellen Regelsystemen auf, wenn sie Schwierigkeiten mit Systemen mit mehreren Eingängen und mehreren Ausgängen haben. Modellbasierte Regler zeigen einen reibungsloseren Betrieb, indem sie die gekoppelte Dynamik des Ausgangs berücksichtigen und eine Bahn optimaler Steuersignale innerhalb des Regelhorizonts im Voraus berechnen. Dadurch sollen die Wartungskosten gesenkt und die Energieressourcen effizienter genutzt werden.

## 2.8 Implementierung modellbasierter Controller

Im Gegensatz zu konventionellen Reglern, die aufgrund ihres einfachen Designs und geringen Rechenaufwandes billige Hardwarelösungen erfordern, müssen modellbasierte Regler in jedem Zeitschritt ein Optimierungsproblem lösen, das auf einfachen SPS-Hardwarelösungen nicht

möglich ist. Zur Realisierung der MPC-Steuerung entwickelten wir zusammen mit Siemens eine IPC-Lösung von Siemens, die mit "SIMATIC LiveTwin Edge app" ausgeliefert wird. Dabei handelt es sich um eine browserbasierte Anwendung, die auf dem IPC arbeitet und es den Anwendern der Siemens Industrial Edge Plattform ermöglicht, Simulationsmodelle direkt auszuführen.

Die Anwendung kann modellbasierte Steuerungs- und Maschinensimulationen aus MATLAB® Simulink® und anderen Simulationswerkzeugen importieren, nachdem sie mit Hilfe eines Matlab-Coders in die Programmiersprache C++ konvertiert wurden. Dadurch ist es möglich, eine prädiktive Steuerungsfunktion (z. B. MPC - Model Predictive Control) direkt auf der Edge-Ebene zu implementieren. Dies wird durch die nativen Schnittstellen der Siemens Industrial Edge Plattform unterstützt, was die Anbindung an die Automatisierung erleichtert. Die vorinstallierten Schnittstellen der Plattform ermöglichen die Verbindung mit verschiedenen Controllern (PLCs).

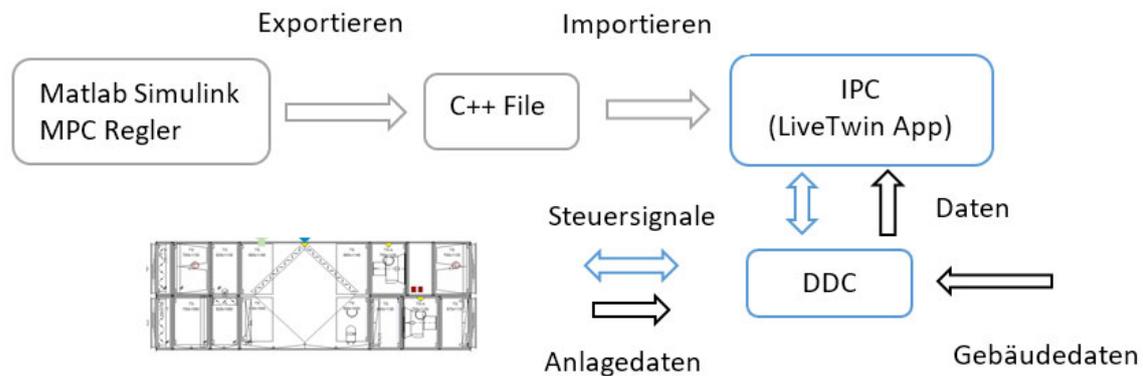


Abbildung 2-83: Ablauf der Implementierung des MPC in konventionelle Regelsysteme

Alle Geräte- und Gebäudedaten werden über DDC (SPS) per Modbus TCP Protokoll an den IPC gesendet und als Eingangsvariablen für das abgespielte Simulationsmodell verwendet. Es ermöglicht auch die Verbindung der importierten Modelle untereinander, so dass wir die Daten innerhalb der Anwendung vor- oder nachbearbeiten können. Die durch die Modelle berechneten Signale können dann zum Steuern via Modbus TCP Protokoll zurück an die DDC gesendet werden, welche diese an die Ausgänge für die Aktoren schreibt.

## 2.9 Konzeption der Cloud und der Cloudanbindung

Um die Daten nicht jedes Mal manuell von der Steuerung zu laden, diese schneller verfügbar zu machen und besser auswerten zu können ist ein Ziel dieses Vorhabens die Daten automatisiert in eine Cloud fließen zu lassen. Es gibt eine Vielzahl an Lösungen auf dem Markt. Zunächst war die Überlegung, das entwickelte Rechenmodell der Hochschule in einer Cloud arbeiten und aus dieser die DDC regeln zu lassen. Nach reichlicher Überlegung haben wir uns aber wegen Sicherheitsbedenken dagegen entschieden. Somit sollen lediglich die gesammelten Daten in der Cloud gespeichert und für zukünftige Projekte nutzbar gemacht werden. Das Rechenmodell soll sich aus dieser Cloud die benötigten Daten holen, das Modell updaten und somit aus den neuen Daten lernen und anschließend in festgelegten Intervallen das laufende Modell aktualisieren. Die Implementierung der Plattform ist im Kapitel 2.8 beschrieben.

Da sich die Firma HANSA in der Zwischenzeit auch weiterentwickelt hat und inzwischen eine eigene Cloud Lösung anbietet, entschloss man sich diese Plattform zu nutzen. Über einen Router der zusätzlich im Schaltschrank verbaut wurde ist es nun möglich die gesammelten Daten sicher in einer Cloud zu speichern. Die Daten werden dazu von der DDC als Modbus TCP Daten zur Verfügung gestellt und über den Router in die Cloud gesendet. Hier ist es möglich, die Daten in verschiedenen Intervallen oder bei einer Änderung des Wertes zu speichern. Bei Daten, die sich nur sehr selten ändern, macht diese Option Sinn um den Speicherplatz der Datenbank zu schonen. Um die Daten nutzen zu können gibt es hier eine Möglichkeit diese wieder als „.CSV“ Datei abzurufen. Des Weiteren bietet dieser Router eine sichere Lösung zur Fernwartung durch Aufschalten auf die DDC mittels eines VPN-Tunnels.

### Transferdaten

Zeit	Druck_Fortluft_vor_Klappe	Ablufttemperatur	Abluftvolumenstrom
06.02.2020 15:02:39.604	7,20 Pa	30,10 °C	794,30 m3/h
06.02.2020 15:02:27.526	7,20 Pa	30,10 °C	794,30 m3/h
06.02.2020 15:02:05.132	7,20 Pa	30,10 °C	794,30 m3/h
06.02.2020 15:01:50.985	7,20 Pa	30,10 °C	794,30 m3/h
06.02.2020 15:01:50.683	7,20 Pa	30,10 °C	794,30 m3/h

Abbildung 2-84: Auszug aus den gesammelten Daten aus der Cloud

Mittels des Routers und einem personalisierten Zugangs ist auch ein Vorteil für den Endnutzer entstanden. Dieser kann mittels einer App oder eines Browsers aus dem Internet heraus auf die Webseiten seiner Anlage zugreifen und diese bedienen.

Die Daten, die nun in der Cloud vorliegen, wurden weiter dazu genutzt, um verschiedenste Visuelle Darstellungen einzurichten.

## **2.10 Entwicklung eines Sensorkonzepts für verschiedene Geräte und räumliche Gegebenheiten**

Um das RLT-Gerät hinreichend genau beschreiben zu können ist es nötig, eine erhöhte Anzahl an Sensoren zu installieren. Welche Sensoren an welcher Stelle benötigt werden, wurde zusammen mit der Hochschule Emden ermittelt und in Kapitel 2.3.2 beschrieben. Der Einsatz dieser Anzahl an Sensoren ist mit einem erhöhten Kostenansatz verbunden. Für Folgeprojekte und für die Wirtschaftlichkeit ist es also zwingend notwendig, die Anzahl an Sensoren und den damit verbundenen Arbeits- und Kostenaufwand zu reduzieren.

Wenn ein RLT- Gerät einmal modelliert ist, werden die meisten der Sensoren für den Betrieb nicht mehr benötigt. Will man allerdings, dass das Modell weiter lernt, muss man es von Zeit zu Zeit updaten und mit den neusten gesammelten Daten schulen. Um diese Daten zu erlangen werden die Sensoren zur Aufzeichnung weiterhin benötigt. Aus diesem Grund ist das Ziel diese Daten in einer Cloud zu sammeln, siehe auch Kapitel 2.9, und baugleiche andere Geräte aus diesen Daten zu schulen. Möchte man also ein zweites baugleiches Gerät modellieren, reicht es eventuell aus, dieses mit den vorab schon gesammelten Daten zu trainieren. Das zweite Gerät benötigt somit eine geringere Anzahl an Sensoren. Möchte man nun allerdings ein Gerät anderen Typs modellieren, muss für dieses zunächst erneut ein Sensorkonzept erstellt und es müssen erneut Daten gesammelt werden, um das neue Modell zu schulen.

Beim ersten Modell eines Typs entsteht also immer ein erhöhter Kosten- und Entwicklungsaufwand. Dieser sollte sich aber amortisieren, je mehr Modell gesteuerte Anlagen man einsetzt. Dieses ist allerdings im Detail im Nachfolgevorhaben zu untersuchen.

Wird ein neuer Gerätetyp modelliert, benötigt man in jeder Kammer des RLT- Geräts Sensoren die Temperatur, Feuchtigkeit und Druck aufnehmen. Ist eine Kammer zur nächsten offen, reicht für diesen Bereich nur ein Paket der Sensoren.

Zusätzlich zu diesen Sensoren benötigt man noch Sensorik, die die elektrische Leistung des Geräts misst und anzeigt, sowie die Wärmeleistung der Register.

Werden zusätzlich zum RLT-Gerät auch noch Gebäudeteile modelliert, benötigt man hier individuell, je nach Bauart des Gebäudes, weitere Sensoren.

Hierzu sind noch weitere Überlegungen anzustellen.

### 3 Fazit

Die anfänglich gesetzten Ziele haben sich im Projektverlauf weiterentwickelt, so dass einige Teile hinzukamen und andere abgeändert wurden. Der Aufwand, der sich für eine Verbesserung der Regelung mittels Modell- Ansatz gezeigt hat, hat sich als generell sehr hoch herausgestellt. Jedoch sollte die Erfahrung, die jetzt gesammelt wurde, genutzt und in Folgeprojekten ausgebaut werden. Der Erfolg der sich hierbei abzeichnet dient als Motivation.

Die modellbasierten Steuerungen wurden sowohl mit neuronalen Netzen als auch mit physikalischen Modellen entwickelt.

Bei den bereits implementierten Modellen gibt es Vor- und Nachteile. Die Ergebnisse zeigen eine genauere Vorhersagefähigkeit mit neuronalen Netzen im dynamischen Modell, solange die Eingangsdaten im Trainingsbereich lagen. Der MPC-Algorithmus arbeitet nicht mit dem dynamischen Modell, sondern basiert auf dem Einfluss jeder einzelnen Eingabe auf die Ausgabe im (linearen zeitinvarianten) Modell. Das LTI-Modell wird aus dem dynamischen Modell in einem numerischen Prozess in Simulink erstellt.

Die Einflüsse der einzelnen Sensor- und Aktordaten auf die Ausgabe zeigen in einigen Fällen Diskrepanzen zwischen der Physik und dem neuronalen Netzmodell. Dies führt zu einem unterschiedlichen Verhalten der Regler basierend auf den beiden verschiedenen Modellen. Das Problem tritt auf, wenn die Funktion im Vergleich zu den Ausgabeparametern zu viele Eingabeparameter hat und es nicht genügend Trainingsdaten gibt, die den erforderlichen Bereich abdecken und den Einfluss jeder Eingabe beschreiben können.

Andererseits kann das neuronale Netzwerk den Einfluss einiger Eingaben nicht erfassen. Dieses geschieht immer dann, wenn die Anzahl der historischen Daten viel höher ist, als die in einer kurzen Periode erfassten „anderen oder abweichenden“ Daten. Das neuronale Netzwerk erkennt diese Eingaben dann lediglich als Rauschen. Zu beobachten ist dies bei der Bypassklappe. Diese öffnet sich, im Vergleich zu anderen Klappen, nicht sehr oft. Aus diesem Grund konnte der Einfluss der Bypassklappe in diesem Datensatz vom Netzwerk nicht erlernt werden. Dasselbe gilt für den Beckenwasserkondensator, der in der Datenhistorie nicht in Betrieb war. Aus diesem Grund hat die LTI-Matrix, basierend auf einem physikalischen Modell, mehr Dimensionen und ist komplexer als die LTI-Matrix, welche aus einem neuronalen Netzwerk erstellt wurde. Deshalb soll in einem Nachfolgevorhaben ein System-Identifikationstest entworfen werden, bei dem alle notwendigen Daten für das Training des Netzwerks generiert und die erfassten Zeitverlaufsdaten durch diese ersetzt werden können.

Wie bereits erwähnt, werden die Parameter, deren Auswirkungen auf die Systemleistung nicht gesteuert werden können, deren Modelle aber bekannt sind, als externe Störgrößen betrachtet. Dazu gehören die Außenwetterlage und die Anzahl der Personen, die sich in der Halle aufhalten. Das andere Lüftungsgerät in der Halle (WPE9), welches in dieser Projektphase nicht modelliert wurde, wird mit seinen Einfluss auch als äußere Störung betrachtet. Dies erhöht die Anzahl der äußeren Störungen im MPC-Algorithmus und verschlechtert damit die Leistung der Steuerung. Andererseits verwendet das andere Lüftungsgerät (WPE9) eine andere

Steuerungslogik mit unterschiedlichen Sollwerten, was irgendwann zu widersprüchlichen Betriebsarten der beiden Lüftungsgeräte in der Halle führen kann. Wird das zweite RLT-Gerät auch mit einem Model basiertem Algorithmus versehen – so wie in der Projektskizze zum Nachfolgeantrag vorgesehen - und zum bestehenden Modell hinzugefügt, wird erwartet dass eine gleichmäßigere Leistung der Steuerungen erreicht wird.

Der Test der unterschiedlichen Regelansätze ergab bereits jetzt ein Energieeinsparpotenzial bei Verwendung der MPC-Steuerung von bis zu 30%. Die Höhe der Energieeinsparung hängt von den Gewichtungsfaktoren der Steuerung und den angegebenen Energiepreisen für die thermischen und elektrischen Energiepreise ab. Weiterhin ist der bislang betrachtete Zeitraum noch nicht lang genug und bezüglich der herrschenden Randbedingungen teilweise unterschiedlich, so dass diese Einsparung nicht auf ein ganzes Betriebsjahr übertragen werden kann.

Bereits mit dem auf Basis der gewonnenen Daten optimierten konventionellen Regelansatz ist eine Optimierung des Energieverbrauches von 10% möglich. Die hier ermittelten Ansätze können ohne großen Aufwand und Kosten für den Betreiber in der vorhandenen Steuerung implementiert werden. Dadurch wird bereits jetzt eine signifikante Energieeinsparung der HANSA Geräte erzielt. Von besonderer Bedeutung hat sich dabei die Zählung der Badbesucher herausgestellt. Bereits darüber ist eine optimierte weil bedarfsgerechte Lüftung möglich. Eine Regelung auf die tatsächliche Raumtemperatur wird nochmal eine weitere Verbesserung bewirken.

Die Regelgüte bei der Sollwertverfolgung der menschlichen Komfortparameter zeigt im betrachteten Zeitraum bei der Hallentemperatur eine um 40 prozentige respektive bei der Hallenfeuchte 20% prozentige Verbesserung mit der modelbasierten Variante als mit der konventionellen Regelung. Dieser Vergleich ist jedoch zu diskutieren, da die Regler unterschiedliche Signale als Rückmeldewerte verwenden: die modelbasierte Variante verwendet durchschnittliche Hallenwerte und die konventionelle Steuerung verwendet die Abluftwerte, gemessen im Kanal vor dem Gerät. Der Referenzverfolgungsfehler wird jedoch basierend auf den Sollwerten für die durchschnittlichen Hallenparameter in beiden Steuerungen berechnet.

Ein weiterer Vorteil des MPC-Controllers, der während der Testphase beobachtet wurde, war ein reibungsloserer Betrieb im Vergleich zum konventionellen Controller. Normalerweise haben konventionelle Regelsysteme Schwierigkeiten in Systemen mit mehreren Eingängen und mehreren Ausgängen, was zu Schwingungen führt. MPC-Regler bewerkstelligen einen reibungslosen Betrieb, indem sie die gekoppelte Dynamik des Systems berücksichtigen und eine Sequenz optimaler Steuersignale innerhalb eines Regelhorizonts im Voraus planen. Dies führt zu einer Reduzierung der Wartungskosten in der Zukunft.

Die Leistung der MPC-Steuerung bezüglich menschlicher Komfortparameter kann durch Unsicherheiten in den Modellen negativ beeinflusst werden. Die Unsicherheiten im physikalisch basierten Modell ergeben sich hauptsächlich aus den Kalibrierparametern. Insbesondere im Wärmemodell des Gebäudes wurde das Modell mangels ausreichender

Informationen über die exakten Materialien, die in den Wänden verbaut wurden, und deren Wandstärken mit den zunächst vermuteten thermischen Eigenschaften der Wände auf der Grundlage der verfügbaren Informationen erstellt und dann mit den erfassten Daten kalibriert. Andererseits trägt die Modellierung einer so großen Halle als Lumped-element-model (Modellierung der Halle als einheitlichen Raum mit gleicher Temperatur und Luftfeuchtigkeit), zur Unsicherheit des Modells bei. Das Hinzufügen weiterer Sensoren zur Messung der Wandtemperaturen oder das Sammeln präziser Informationen über die Wandmaterialien könnte dazu beitragen, die Kalibrierparameter oder damit die Leistung der Steuerung im physikalischen Modell zu verbessern. Dennoch kann der Vergleich zwischen den Leistungen der verschiedenen Modelle nach einem Langzeittest, der alle Wetterbedingungen über das ganze Jahr abdeckt und bei dem verschiedene Gewichtungsfaktoren und Tuningparameter ausprobiert werden, bessere Ergebnisse liefern.

Um die Implementierungskosten zu reduzieren, ist es vorstellbar, die neuronale Netzwerkstruktur zu ändern, um die Anzahl der im Gebäude und in dem RLT- Gerät installierten Sensoren zu reduzieren. Im Modell des neuronalen Netzwerks des Gebäudes könnten die Sensoren eliminiert werden, bei denen sich die Temperaturen nur unmerklich ändern. Hierzu zählen z.B. die Sensoren der klimatisierten Räume um die Halle herum (Cafeteria, Umkleiden, etc.) sowie der Temperatursensor des Beckenwassers. Eine durchschnittliche Hallentemperatur und die Außentemperatur, zusammen mit den Informationen der Lüftungsgeräte, sollten also ausreichen, um das Hallenmodell zu beschreiben. Innerhalb des RLT- Geräts können auch einige Sensoren eliminiert werden, indem die Struktur des neuronalen Netzwerks so verändert wird, dass sie die endgültige Leistung nicht beeinträchtigt.

Die im Projektantrag skizzierten Ziele wurden erreicht.

# Formelverzeichnis

Formel 2-1:	Gleichung zum berechnen des Volumenstroms.....	19
Formel 2-2:	Gleichungen zum Berechnen von Volumenströmen und Druckdifferenzen über Klappen.....	27
Formel 2-3:	Berechnung von Volumenstrom und Differenzdruck mittels Messblende.....	28
Formel 2-4:	Geschwindigkeit- und Differenzdruckberechnung.....	29
Formel 2-5:	Messabweichung der Messblende.....	30
Formel 2-6:	Luftgeschwindigkeit im Klappenquerschnitt.....	30
Formel 2-7:	Berechnen der Klappenöffnungsfläche.....	30
Formel 2-8:	Anpassung des Anstellwinkels zur Ansteuerung.....	30
Formel 2-9:	Durchflussbeiwert von Klappen.....	31
Formel 2-10:	Formel zum Berechnen der spezifischen Luftfeuchtigkeit.....	35
Formel 2-11:	Ansatz zum errechnen des Volumenstroms über Klappen.....	38
Formel 2-12:	Strömungswiderstand.....	44
Formel 2-13:	Berechnung der Parallelwiderstände.....	45
Formel 2-14:	Funktion Ventilator Kennlinie.....	45
Formel 2-15:	Kontinuitätsgleichung.....	45
Formel 2-16:	Druckberechnung.....	45
Formel 2-17:	Newton Methode.....	45
Formel 2-18:	empirische Gleichung für kompakte Kreuzstromwärmetauscher.....	52
Formel 2-19:	Enthalpie Gleichung zur Bestimmung des virtuellen Mischpunkts.....	52
Formel 2-20:	Feuchtigkeitsgleichung zur Bestimmung des virtuellen Mischpunkts.....	52
Formel 2-21:	Differenzialgleichung der Schwimmhalle.....	53
Formel 2-22:	Verdunstungsrate.....	56
Formel 2-23:	Verdunstungskoeffizient.....	56
Formel 2-24:	Verhältnis von belegter zu unbelegter Schwimmhalle.....	56
Formel 2-25:	Berechnung der absoluten Feuchte.....	56
Formel 2-26:	Volumenstromberechnung über die Klappen.....	61
Formel 2-27:	Volumenstromberechnung über den Wärmetauscher.....	61
Formel 2-28:	Widerstandswert der Klappen.....	61
Formel 29	Zustandsraumdarstellung.....	66
Formel 30	Vektorformeln zur Zustandsraumdarstellung.....	66
Formel 31	linearisierte Zustandsraumdarstellung.....	66
Formel 32	Minimierung der Zielfunktion.....	71

# Literaturverzeichnis

- [1] U. C. Birkenfeld, „Studie zur Entwicklung des Energiebedarfs zentraler Raumluftechnischer Anlagen in Nicht-Wohngebäuden in Deutschland,“ 15.06.2014.
- [2] J. O. a. C. P. L. Pérez-Lombard, „A review on buildings energy consumption,“ *Energy and Buildings*, pp. 394-398, 2008.
- [3] A. R. J. L. T. a. J. P. J. Richalet, „Algorithmic Control of Industrial Process,“ in *Symposium on Identification and System Parameter Estimation. IFAC*, Tbilisi, 1976.
- [4] Z. H. D. S. Filip Belic, „HVAC Control Methods - A review,“ in *International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Cheile Gradistei, Romania, 2015.
- [5] V. D. I. e.V., Hrsg., *Technische Gebäudeausrüstung von Schwimmbädern / Hallenbäder VDI 2089*, Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH, 2019.
- [6] T. Reddy, „Literature review on calibration of building energy simulation programs,“ *ASHRAE Transactions* 112, 2006.
- [7] J. W. P. Shun Li, „Development and Validation of a Dynamic Air Handling Unit Model,“ *ASHRAE Transactions*, 2010.
- [8] L. a. P. H. Norford, „A standard simulation testbed for the evaluation of control algorithms and strategies,“ *ASRAE 825-RP*, 1997.
- [9] L. C. G. H.A. Navarro, „Effectiveness-NTU computation with a,“ *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, pp. 509-521, Oct 2007.
- [10] P. P. Mirza Mohammed Shah, „Methods for Calculation of Evaporation from Swimming Pools and Other Water Surfaces,“ *ASHRAE*, SE-14-001, 2014.
- [11] L. C. E. H. Hao Huang, „A neural network-based multi-zone modelling approach for predictive control system design in commercial buildings,“ *Energy and Buildings*, pp. 86-97, 2015.
- [12] bafa, „Merkblatt zu den CO2 Faktoren,“ Eschborn, 2019.
- [13] P. D.-I. J. B. & D.-I. T. Finke, „Leitfaden Abschlussbericht,“ 1995.
- [14] MathWorks, „Grey-Box Model Estimation,“ <https://www.mathworks.com/help/ident/grey-box-model-estimation.html>.
- [15] J. Maciejowski, *Predictive control with constraints*, Prentice Hall, 2001.
- [16] P. Bastian, H. Bumiller, M. Burgmeier, W. Eichler, T. Käppel, W. Klee, K. Kober, J. Manderla, J. Schwarz, O. Spielvogel, K. Tkotz, U. Winter und K. Ziegler, *Fachkunde Elektrotechnik*, 27. Auflage Hrsg., 42781 Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2009.
- [17] „engineeringtoolbox,“ [Online]. Available: <https://www.engineeringtoolbox.com>.
- [18] S. Ochs, „Berechnung von Taupunkt und relativer Feuchte - Wetterochs,“ <https://www.wetterochs.de/wetter/feuchte.html>.



Selbstlernende energieeffiziente Regelung komplexer Raumlufttechnischer Geräte  
 AZ 33401/01

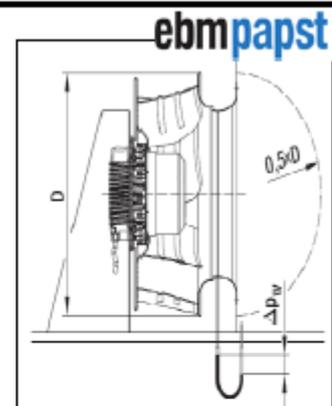
AP Nr.	Arbeitspaket	Bearbeiter		Projektmonat																								
		HANSA	HS EMDEN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
0	<b>Projektkonzeption</b>																											
0.1	Erstellung eines Pflichtenheft	X	X																									
0.2	Projektbegleitende Patent- und Literaturrecherche	X	X																									
1	<b>Entwicklung des Sensor- und Datenkonzept</b>																											
1.1	Geräteauswahl im Hansa Profid in ausgewählten Betriebspunkten zur Ermittlung der Betriebsdaten	X																										
1.2	Geräteanordnung eines installierten Schwimmbadbeheizungsgeräts im Feld und Ermittlung der Betriebsdaten.	X																										
1.3	Entwicklung und Integration eines Sensorkonzerts als Balkastensystem. Zur einfachen Übertragung auf verschiedene räumliche Gegebenheiten, Vermeidung von Bad Data, z. B. durch kurzfristiges Einschalten eines Strahlers, o. ä.	X																										
2	<b>Konzeption und Erstellung des Geräterehners</b>																											
2.1	Darstellung von Zusammenhängen und Prognose physikalischer Betriebsgrößen	X																										
2.2	Entwicklung des Geräterehners	X	X																									
3	<b>Generierung des Gerätemodells und Entwicklung der Matrix</b>																											
3.1	Definition der Ein- und Ausgangsgrößen des Geräts	X																										
3.2	Beschreibung des Systems anhand statistischer Methoden und Entwicklung eines statischen Gerätemodells und der Lernalgorithmen	X																										
3.3	Entwicklung des intelligenten Optimierungsalgorithmus	X																										
4	<b>Entwicklung eines neuronalen Netzes und Trajektorienplanung</b>																											
4.1	Analyse und Bewertung der Datenbasis	X																										
4.2	Entwicklung der Algorithmen für die neuronale Netze	X	X																									
4.3	Training der KNN und Validierung	X	X																									
4.4	Entwicklung der Modellreduktion des neuronalen Netzes um eine Implementierung in das Automatisierungssystem zu ermöglichen	X	X																									
4.5	Entwicklung Balkastensystem zur Übertragung auf verschiedene RL-T-Geräte	X	X																									
4.6	Tests	X	X																									
4.7	Konzeption der Cloud und der Cloudanbindung	X																										
5	<b>Entwicklung der intelligenten Gerätesteuerung</b>																											
5.1	Entwicklung der intelligenten Gerätesteuerung unter Einbindung des dynamischen Regelmodells	X																										
5.2	Entwicklung Trainingskonzept durch Bündelung der Daten	X	X																									
5.3	Entwicklung einer Backup-Funktion	X																										
6	<b>Aufbau Demonstrator und Test</b>	X	X																									
7	<b>Redesign</b>	X	X																									

# Anhang B

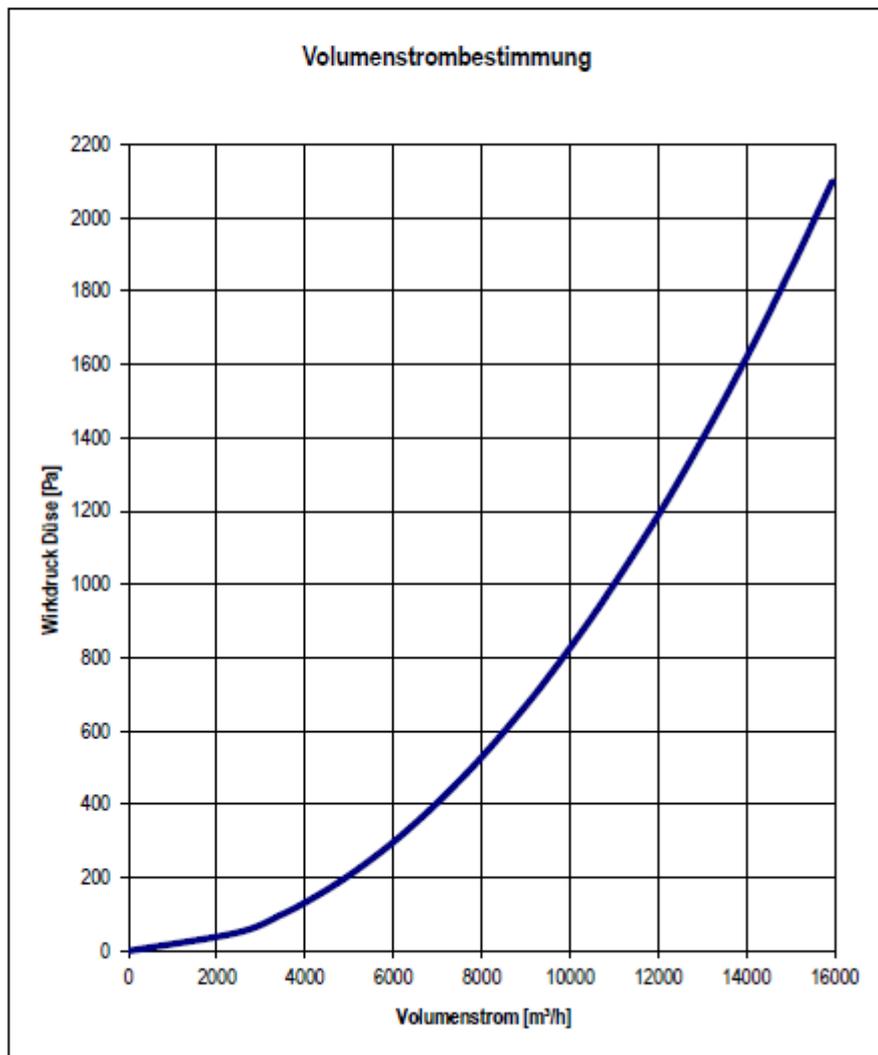
## Volumenstrombestimmung mit Wirkdruckverfahren

Ventilator K3G560

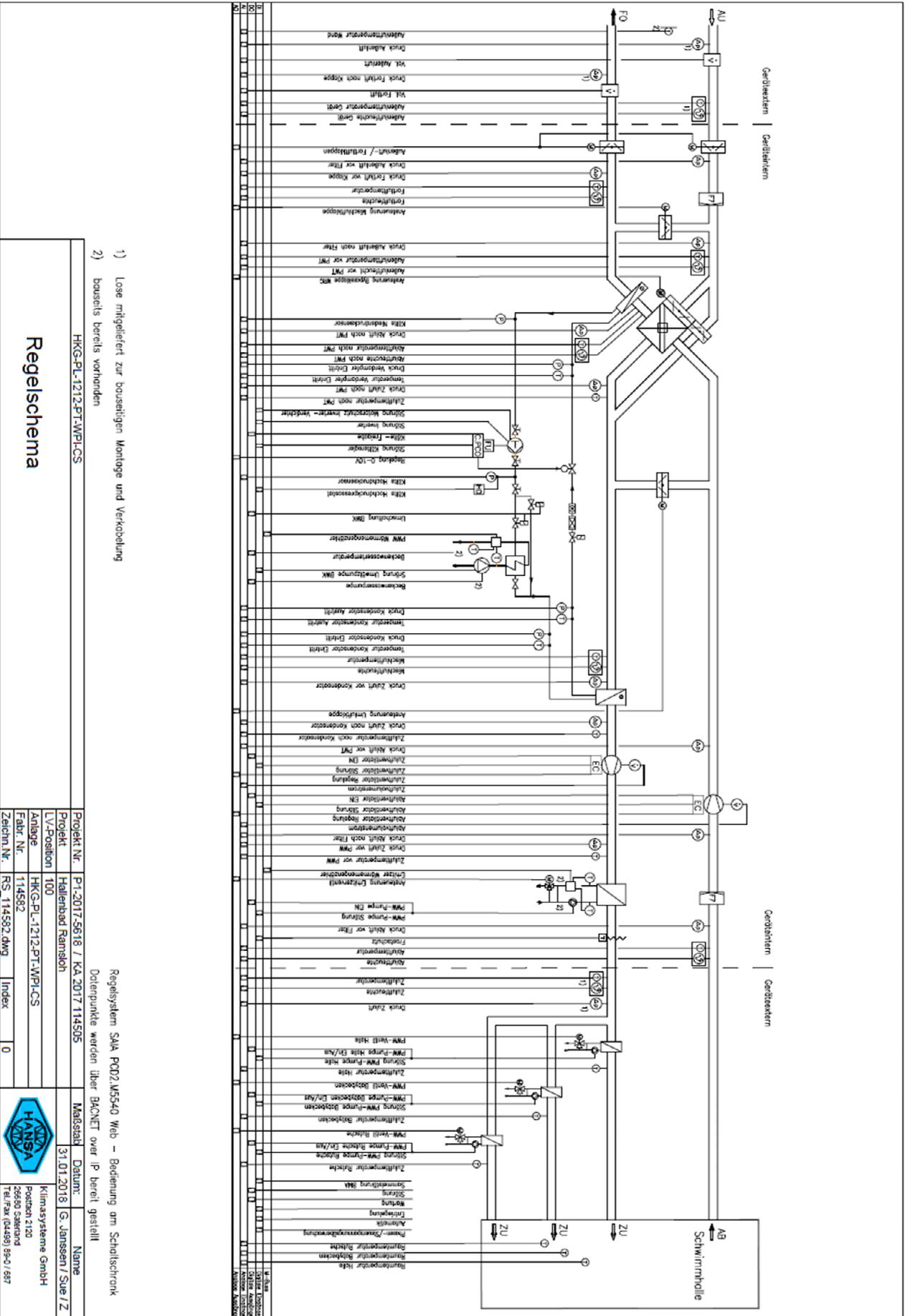
Formel  $qv = k \cdot [\text{WURZEL}(\Delta p)]$   $k\text{-Wert}=348$   
 Düse 64030-2-4013  
 Dichte  $1,2 \text{ kg/m}^3$



k-Wert	348
Volumenstrom [m³/h]	Wirkdruck [Pa]
0	0
2460	50
3480	100
4260	150
4920	200
5500	250
6030	300
6510	350
6960	400
7380	450
7780	500
8160	550
8520	600
8870	650
9210	700
9530	750
9840	800
10440	900
11000	1000
11540	1100
12060	1200
12550	1300
13020	1400
13480	1500
13920	1600
14350	1700
14760	1800
15170	1900
15560	2000
15950	2100



# Anhang C



- 1) Lose mitgeliefert zur bauseitigen Montage und Verkabelung
- 2) bauseitig bereits vorhanden

HG-PL-1212-PT-WPLCS		Name	
Projekt Nr.	P1-2017-5618 / KA 2017 114505	Messjahr	Datum
Projekt	Hallenbad Ramsloh	31.07.2018	G. Janssen / Suer / Z
LV-Position	100	Klimasysteme GmbH	
Anlage	HG-PL-1212-PT-WPLCS	Papestr. 2100	
Fabrik-Nr.	114582	29699 Sauerland	
Zeichn.Nr.	RS_114582.dwg	Tel: (0493) 894 687	
Index	0		