



Wissenschaftlicher Zwischenbericht I

Optimale Regelungsstrategie zum effizienten Betrieb
von Klimaanlage und deren Kälteversorgung

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Olaf Zeidler
Prof. Dr.-Ing. Horst Schulte

Prof. Dr. habil.-Ing. Birgit Müller
Prof. Dr.-Ing. Heiko Werdin

Wissenschaftlicher Mitarbeiter:

M.Eng. André Badura
M.Eng. Philipp Krimmel

Projektnummer: 1050-B5-O

31.08.2017 | Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

 **Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin**
University of Applied Sciences

Förderung aus dem Berliner Programm für Nachhaltige Entwicklung



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
Formelverzeichnis.....	VII
Indizes.....	VIII
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	IX
1 Einführung.....	1
2 Stand des Wissenschaft.....	2
3 Projektübersicht.....	5
3.1 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 1.....	6
3.2 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 2.....	8
3.3 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 3.....	8
3.4 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 4.....	9
3.5 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 5.....	10
3.6 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 6.....	11
3.7 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 7.....	12
4 Grundlagen.....	13
4.1 Grundlagen der Thermodynamik.....	13
4.2 Das h,x-Diagramm.....	13
4.3 Berechnungen von Luft-Zustandsgrößen.....	14
4.4 Hydraulische Schaltungen in der Lüftungstechnik.....	18
4.5 Luftkühlung.....	18
4.6 Luftmischung.....	21
4.7 Kälteerzeugung.....	22
5 Stand des Projektes.....	25
5.1 Ist-Stand Arbeitspaket 1.....	25
5.1.1 Aufgabenstellung.....	25
5.1.2 Aktueller Stand.....	25
5.1.2.1 RLT-Anlage im Labor G318.....	27
5.1.2.2 Hörsaalanlage Campus Wilhelminenhof.....	34
5.1.2.3 RLT-Anlage Campus Charité-Mitte.....	38
5.1.2.4 RLT-Anlage im Labor G326.....	39

5.1.2.5	RLT-Anlage im Raum G329.....	42
5.2	Ist-Stand Arbeitspaket 2.....	43
5.2.1	Aufgabenstellung	43
5.2.2	Aktueller Stand.....	43
5.3	Ist-Stand Arbeitspaket 3.....	52
5.3.1	Aufgabenstellung	52
5.3.2	Aktueller Stand.....	52
5.4	Ist-Stand Arbeitspaket 4.....	54
5.4.1	Aufgabenstellung	54
5.4.2	Aktueller Stand.....	54
5.5	Ist-Stand Arbeitspaket 5.....	56
5.5.1	Aufgabenstellung	56
5.5.2	Aktueller Stand.....	56
5.6	Ist-Stand Arbeitspaket 6.....	56
5.6.1	Aufgabenstellung	56
5.6.2	Aktueller Stand.....	57
5.7	Ist-Stand Arbeitspaket 7.....	57
5.7.1	Aufgabenstellung	57
5.7.2	Aktueller Stand.....	57
6	Zusammenfassung	58
I	Anhang	1
I.I	Glossar.....	1
I.II	Verwendete Konstanten.....	1
I.III	Quellenverzeichnis	2
II	Anhang.....	1

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Verlauf der Luft- Zustandsänderung im Mollier-h,x-Diagramm; vom Lufteingangspunkt A zum Luftausgangspunkt D, A nach B Kühlen, B nach C Entfeuchten, C nach D Erwärmen	2
Abbildung 2-2:	Kombination der Mengen- und Temperaturregelung durch Verwendung eines Durchgangs- und eines Dreiwege-Ventils bei konstanter Pumpendrehzahl (links) oder durch Verwendung eines Dreiwege-Ventils und ein Pumpe mit variablen Wassermassenstrom (rechts) – aus dem Projekt OpDeCoLo	3
Abbildung 2-3:	Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung der OpDeCoLo-Schaltung [Goldschmidt et al.]	3
Abbildung 2-4:	Mischpunkt (orange) als Endzustand der Luft aus der Kombination von Mengenregelung (über DV) und Beimischregelung (über DWV)	4
Abbildung 3-1:	Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 1	7
Abbildung 3-2:	Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 2	8
Abbildung 3-3:	Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 3	9
Abbildung 3-4:	Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 4	10
Abbildung 3-5:	Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 5	10
Abbildung 3-6:	Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 6	11
Abbildung 3-7:	Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 7	12
Abbildung 4-1:	Darstellung eines Mollier-h,x-Diagramms mit Angabe der Temperatur und Enthalpie (linke vertikale Achse), der absoluten Feuchte (untere horizontale Achse) und den Linien der relativen Feuchte	14
Abbildung 4-2:	h,x-Diagramm mit hervorgehobener Darstellung der Linien konstanter Relativer Feuchte – rote Linie entspricht 100 %, blaue volle Linien Einteilung 10 bis 90 %	16
Abbildung 4-3:	h,x-Diagramm mit hervorgehobener Darstellung der Linien konstanter Enthalpie (Isenthalpen, blau)	17
Abbildung 4-4:	Darstellung der Beimischregelung (links) und der Mengenregelung (rechts) für die Verwendung bei Luftkühlern	18
Abbildung 4-5:	Verlauf des Luftzustandes im Kühlungsfall ohne Taupunktunterschreitung der Luft	19
Abbildung 4-6:	Verlauf des Luftzustandes im Kühlungs- und Entfeuchtungsfall mit Taupunktunterschreitung der Luft	20
Abbildung 4-7:	Darstellung der Mischung zweier Luftströme mit unterschiedlichen Zuständen bei gleichem Massenstrom, Anwendung z.B. bei Luftmischung	

	durch einen Bypass, Luftzustand unbehandelt von A nach D, Luftzustand behandelt von C nach D	21
Abbildung 4-8:	Prinzip-Darstellung einer Kälteerzeugung	22
Abbildung 4-9:	Darstellung des Carnot-Kreisprozesses im t,S-Diagramm	23
Abbildung 4-10:	Darstellung des Kreisprozesses im log-p,h-Diagramm	24
Abbildung 5-1:	Darstellung der absoluten Feuchte der Außenluft (stündlichen Messung der Außenluftbedingung durch die Wetterstation der HTW Berlin, 01. Januar 2017 bis 01. Juli 2017)	26
Abbildung 5-2:	Darstellung der Häufigkeit absolute Luftfeuchtigkeit für den Zeitraum 01. Januar 2017 bis 01. Juli 2017	27
Abbildung 5-3:	Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus der Laboranlage des Antragstellers	28
Abbildung 5-4:	Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der Versuchsdurchführung – Mengen-Regelung bei einer Leistungseinstellung des Ventilators von 30 Hz – an der Anlage G 318	29
Abbildung 5-5:	Ergebnisdarstellung von Temperaturverlauf von Kälte-Vorlauf und Kälte-Rücklauf und Wassermassenstrom der Mengenregelung an der Anlage G 318.....	30
Abbildung 5-6:	Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der Versuchsdurchführung – Mengen-Regelung bei einer Leistungseinstellung des Ventilators von 50 Hz – an der Anlage G 318	31
Abbildung 5-7:	Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der Versuchsdurchführung – Mengen-Regelung bei einer Leistungseinstellung des Ventilators von 50 Hz und 30 Hz – an der Anlage G 318.....	32
Abbildung 5-8:	Ergebnisdarstellung der Leistungsbilanzen und Enthalphiedifferenzen von Eingangs- und Ausgangszustand der Mengenregelung Anlage G 318.....	32
Abbildung 5-9:	Ergebnisdarstellung von Temperaturverlauf und Feuchteverlauf (abs. nach dem Luftkühler in Abhängigkeit des Kühlwasser-Massenstromes bei der Mengenregelung an der Anlage G 318	33
Abbildung 5-10:	Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus der Hörsaal-Anlage (K 12) an der HTW Berlin	34
Abbildung 5-11:	Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der Versuchsdurchführung – Mengen-Regelung – an der Anlage K 12.....	35
Abbildung 5-12	Ergebnisdarstellung von Temperaturverlauf von Kälte-Vorlauf und Kälte-Rücklauf und Wassermassenstrom der Mengenregelung an der Anlage K 12.....	36
Abbildung 5-13	Darstellung Verlauf der Taupunkttemperatur während der Versuchsdurchführung an der RLT-Anlage K 12	37
Abbildung 5-14	Ergebnisdarstellung der Leistungsbilanzen und Enthalphiedifferenzen von Eingangs- und Ausgangszustand der Mengenregelung RLT-Anlage K 12 ...	37
Abbildung 5-15:	Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus der Anlage 2 – Dachzentrale Nord – Campus Charité Mitte.....	38
Abbildung 5-16:	Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus der Anlage WH G 326 – Kühlanlage im Labor der HTW Berlin	39

Abbildung 5-17:	Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der Versuchsdurchführung – Mengen-Regelung mit Ventileinstellung von 100 bis 0 %– an der Anlage G 326.....	40
Abbildung 5-18	Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der Versuchsdurchführung – Mengen-Regelung mit Ventileinstellung von 0 bis 100 %– an der Anlage G 326.....	41
Abbildung 5-19	Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der dritten Versuchsdurchführung – Mengen-Regelung mit Ventileinstellung von 0 bis 100 %– an der Anlage G 326.....	41
Abbildung 5-20:	Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus der Anlage WH G 329 – Klimaanlage für ein Versuchs-Labor der HTW Berlin	42
Abbildung 5-21:	Vorplanung Anschluss von drei Laborräumen an die RLT-Anlage G 318 zur Weiterentwicklung des Reglers	44
Abbildung 5-22:	Draufsicht des aktuellen Anlagenaufbaus der RLT-Anlage ohne Simulations-einheit im Labor G318	46
Abbildung 5-23:	Planungsvariante 1 für den Bau Luft-Bypass, ebenfalls Vorlage für die Matlab-Simulink-Modellierung.....	46
Abbildung 5-24:	Planungsvariante 2 für den Bau Luft-Bypass, mit zusätzlicher Klappe im Strömungspfad über den Luftkühler	47
Abbildung 5-25:	Ausgangslage der Anlage G 318 (Aufbau gespiegelt dargestellt) zur Modellbildung.....	47
Abbildung 5-26:	Erstes Modell der RLT-Anlage G318 mit Luftansaugung, Ventilator und Luftauströmung	47
Abbildung 5-27:	Vergleich des Simulationsergebnisses Luftvolumenstrom gemessen (blaue Linie) zu Luftvolumenstrom simuliert (grüne Linie)	48
Abbildung 5-28:	Erweiterung des Simulationsmodells der Anlage G 318 durch einen WT..	48
Abbildung 5-29:	Erweiterung des Simulationsmodells der Anlage G 318 durch einen Luft-Bypass	49
Abbildung 5-30:	Darstellung der Simulationsergebnisse zum Verhalten des Volumenstromes bei Öffnung der Bypassklappe, zusätzlich Darstellung des Volumenstromes bei geschlossener Klappe und reduziertem Druckverlust in der RLT-Anlage.....	50
Abbildung 5-31:	Darstellung der Berechnungsergebnisse durch Anwendung der Mischgleichungen von Enthalpie und abs. Feuchte für einen Luftstrom über den Luftkühler und einen Luftkühler über den Bypass.....	51
Abbildung 5-32:	Darstellung des Raummodells als ein Teil des Mehrgrößen-Reglers	53
Abbildung 5-33:	Darstellung der Anlagenkomponenten zur Kälteerzeugung (Kreisprozess der Kälteerzeugung).....	54
Abbildung 5-34:	Darstellung der Erzeugerstufen in der DeCoSuLo-Schaltung – Ausbaustufe 1	55
Abbildung 5-35:	Darstellung der Veränderung von Enthalphiedifferenzen bei Änderung der Temperaturen am Kaltwassersatz	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Übersicht der Arbeitspakete des Projektes OpReeBeK ²	5
Tabelle 5-1:	RLT-Anlagen zur Messung der Luftzustände	25
Tabelle 5-2:	Zusammenfassung der Häufigkeiten der absoluten Feuchte der Außenluft .	26
Tabelle 5-3:	Zusammenfassung der technischen Daten RLT-Anlage G318.....	28
Tabelle 5-4:	Zusammenfassung der technischen Daten RLT-Anlage K 12	35
Tabelle 5-5:	Zusammenfassung der technischen Daten RLT-Anlage der Charité	38
Tabelle 5-6:	Zusammenfassung der technischen Daten RLT-Anlage G 326.....	39
Tabelle 5-7:	Zusammenfassung der technischen Daten RLT-Anlage G 329.....	42
Tabelle 5-8:	Kenngößen des Raummodells für die Entwicklung des Mehrgrößen-Regler	52

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
c_{pD}	Spezifische Wärmekapazität – Dampf	kJ/kgK
c_{pL}	Spezifische Wärmekapazität – Luft	kJ/kgK
c_{pW}	Spezifische Wärmekapazität – Wasser	kJ/kgK
COP	Coefficient of Performance	–
h_{1+x}	Enthalpie	kJ/kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/h
p_{amb}	Umgebungsdruck	Pa
p_D	Wasserdampf-Partialdruck	Pa
p_S	Wasserdampf-Sättigungsdruck	Pa
φ	Luftfeuchte, relativ	–
\dot{Q}	Wärmemenge	W
R_0	Verdampfungswärme, Wasser	kJ/kg
R_L	Gaskonstante – Luft	J/kgK
R_W	Gaskonstante – Wasserdampf	J/kgK
ρ_{tL}	Dichte – trockene Luft	kg/m ³
ρ_W	Dichte – Wasserdampf	kg/m ³
T	Temperatur, absolut	K
ϑ	Temperatur	°C
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /h
x	Luftfeuchte, absolut	kg/kg
Z	Luftzustand	–

Indizes

Indizes	Beschreibung
A	Ausgang
E	Eingang
E1	Erzeuger 1
E2	Erzeuger 2
ED	Enthalpiedifferenz
KM	Kältemaschine
L	Luft
KÜ	Luftkühler
O	Kondensator
Pers	Personen
RL	Rücklauf
U	Verdampfer
t	Taupunkt
tL	Trockene Luft
Trans	Transmission
VL	Vorlauf
W	Wasser

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Beschreibung
CFM	Charité Facility Management
COP	Coefficient of Performance
DV	Durchgangsventil
DWV	Drei-Wege-Ventil
HTW	Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
IDA	Raumluft (Indoor Air)
MS	Meilenstein
ODA	Außenluft (Outdoor Air)
OpDeCoLo	Optimized Dehumidification Control Loop
DeCoSuLo	Demand Controlled Supply Loop
RCA	Umluft (Recirculation Air)
SUP	Zuluft (Supply Air)
ZN	Zwischennachweis

1 Einführung

Der vorliegende Zwischenbericht 01 für das Projekt OpReeBeK² - Optimierte Regelungsstrategien für Klimaanlage und deren Kälteerzeugung - bildet eine ausführliche Beschreibung des aktuellen Projektstandes ab. Der Zwischenbericht 01 folgt dem zweiten Zwischennachweis (ZN02). Das Projekt ist erfolgreich am 01. September 2016 gestartet und wird, wie bisher geplant, am 31. August 2019 mit einem wissenschaftlichen Bericht abgeschlossen.

Mit der Programmträgerschaft ist die Beratungs- und Service Gesellschaft Umwelt mbH, Saarbrücker Straße 38A, 10405 Berlin beauftragt.

Die Projektleitung wird von Herrn Prof. Dr.-Ing. Olaf Zeidler in Zusammenarbeit mit Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Birgit Müller und Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Schulte vertreten. Durchgeführt wird das Projekt an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW Berlin) im Fachbereich Energie und Information sowie im Bereich der Projektpartner wie der Charité Facility Management GmbH (CFM) und der Betriebstechnik der HTW. Der Bericht orientiert sich beim Aufbau an der Struktur der Arbeitspakete. Es folgt eine detaillierte Beschreibung der Projektstände inklusive der Darstellung von Ergebnissen.

2 Stand der Wissenschaft

Die Vorgabe eines definierten Luftzustandes für einen Raum macht immer häufiger den Einsatz von raumluftechnischen Anlage notwendig. Je nach Grad des Luftzustandes steigt der benötigte Energieeinsatz zur Luftbehandlung, u.a. für die Luftkühlung und die Luftentfeuchtung. Die herkömmliche Anwendung der Luftentfeuchtung besteht aus den Schritten Kühlen der Luft unter den Taupunkt, Entfeuchten der Luft bis zum vorgegebenen Feuchtegrad und Erwärmen der Luft auf die vorgegebene Temperatur. Diese ist oft höher als die Temperatur, die zur Entfeuchtung notwendig ist (Abbildung 2-1).

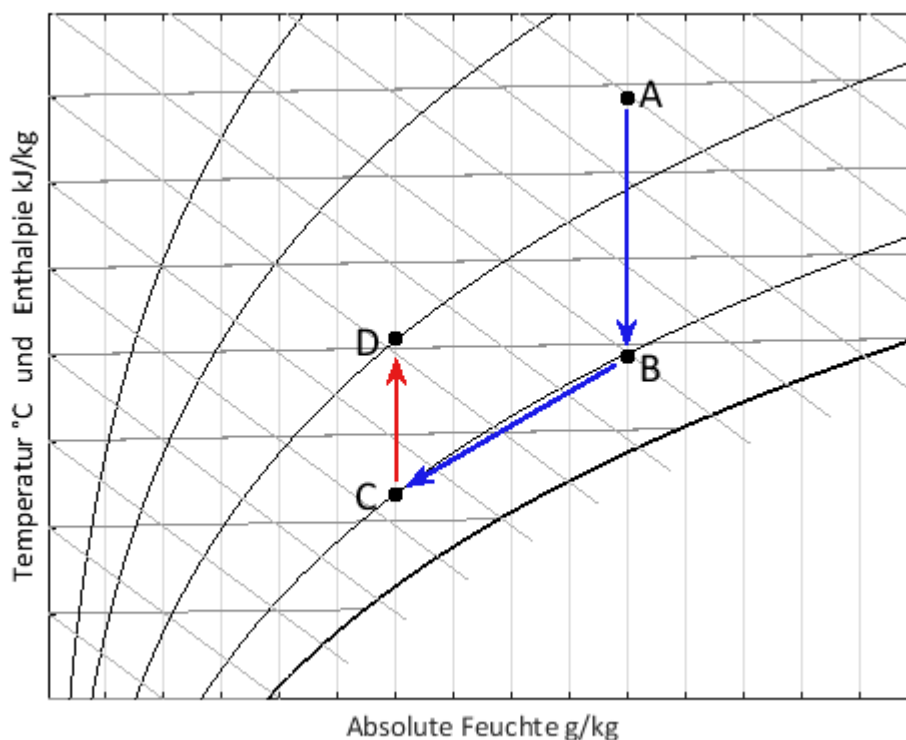


Abbildung 2-1: Verlauf der Luft- Zustandsänderung im Mollier-h,x-Diagramm; vom Lufteingangspunkt A zum Luftausgangspunkt D, A nach B Kühlen, B nach C Entfeuchten, C nach D Erwärmen

Im vorhergehenden Projekt OpDeCoLo (Optimized Dehumidification Control Loop) wurden bereits Anstrengungen unternommen, den Energieaufwand für die Entfeuchtung und Kühlung zu verringern. Dafür wurde eine modellbasierte Regelstrategie entwickelt, die für einen definierten Arbeitsbereich die Regelparameter zur genauen Zustandseinstellung bietet. Neben der modellbasierten Regelstrategie wurde auch eine veränderte hydraulische Schaltung entworfen [Goldschmidt et al.]. Diese hydraulische Schaltung – siehe Abbildung 2-2 – stellt eine Kombination aus der Mengen- und Beimischregelung dar – vgl. nachfolgenden Abschnitt 4.4. Obwohl die modellbasierte Regelstrategie bei der Einstellung der Kaltwasser-Vorlauftemperatur sehr gute Ergebnisse lieferte, waren bei der kombinierten hydraulischen Schaltung weiterhin Abweichungen vorhanden. Eine Untersuchung am Luftkühler führte zum Ergebnis, dass die Mengenregelung und Beimischregelung ähnliche Effekte liefern (Abbildung 2-3).

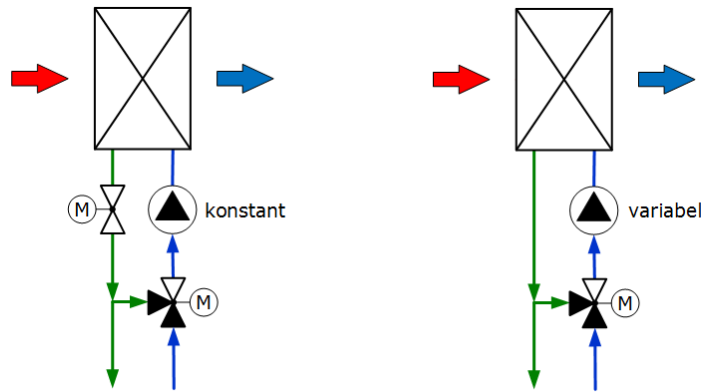


Abbildung 2-2: Kombination der Mengen- und Temperaturregelung durch Verwendung eines Durchgangs- und eines Dreiwege-Ventils bei konstanter Pumpendrehzahl (links) oder durch Verwendung eines Dreiwege-Ventils und ein Pumpe mit variablen Wassermassenstrom (rechts) – aus dem Projekt OpDeCoLo

Eine Kombination der Temperatur- und Mengenreglung wird zu einem Luftzustand zwischen den beiden Einzelnen Luftzuständen führen. Daher wurde der Ansatz weiter überarbeitet und führte zum Ergebnis der Luftmischung aus entfeuchteter und ungekühlter Luft.

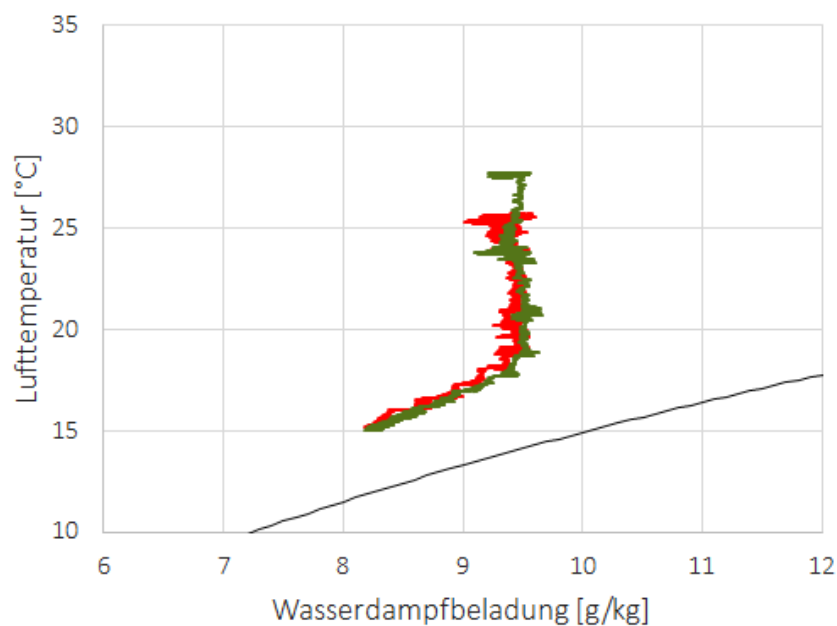


Abbildung 2-3: Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung der OpDeCoLo-Schaltung [Goldschmidt et al.]

Das Projekt OpReeBeK² steht für die „Optimale Regelungsstrategie für den effizienten Betrieb von Klimaanlage und der Kälteversorgung“. Im Projekt OpReeBeK² werden zunächst Untersuchungen zur Luftzustandsänderung an Luftkühlern durchgeführt. Damit werden die Untersuchungsergebnisse aus OpDeCoLo validiert. In Abhängigkeit der Ergebnisse der Untersuchungen resultieren zwei Ansätze, von denen einer im Projekt OpReeBeK² fortgeführt wird. Der erste Ansatz ist die Fortführung und Erweiterung der OpDeCoLo-Schaltung. Diese kann fortgeführt werden, wenn ein deutliches unterschiedliches Verhalten

zwischen der Mengenregelung und der Beimischregelung erkennbar ist, vgl. Abbildung 2-4. Grundsätzlich wird bei der Mengenregelung durch die vorhandene geringe Vorlauftemperatur entfeuchtet. Bei der Beimischregelung hingegen bei geringer Ventileinstellung nur gekühlt. Als Kombination der Regelung wird ein Mischpunkt im Regelbereich beider Ventile erwartet.

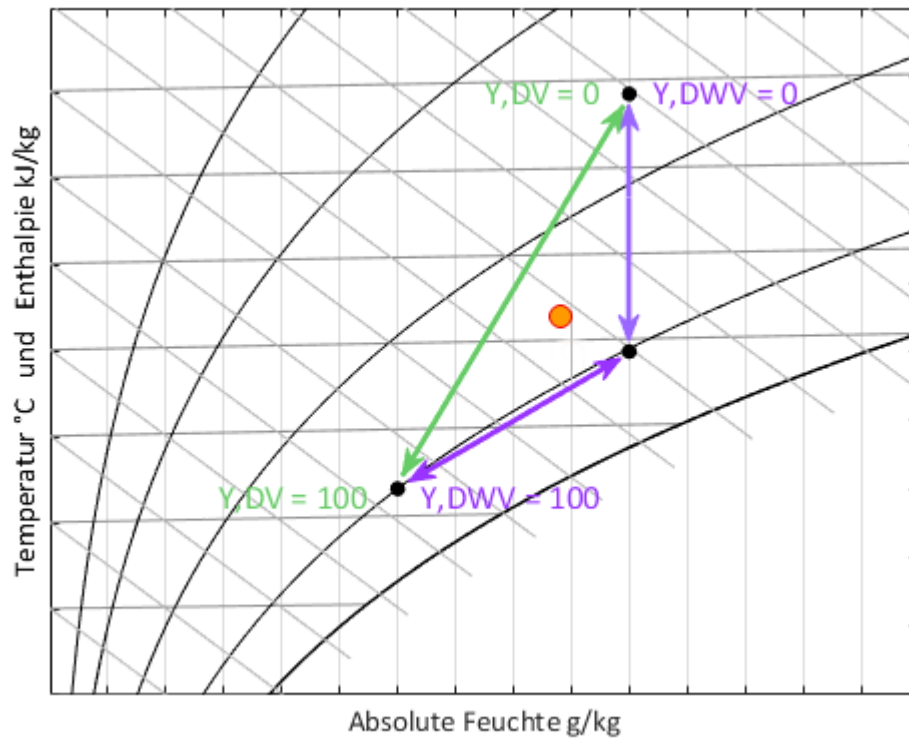


Abbildung 2-4: Mischpunkt (orange) als Endzustand der Luft aus der Kombination von Mengenregelung (über DV) und Beimischregelung (über DWV)

Der zweite Ansatz ist der Einsatz eines Luftbypasses. Wird ein geringerer Luftvolumenstrom durch den Luftkühler geführt, kann dieser Luftstrom bei geringerer Leistung mehr entfeuchtet werden. Wird die Luft mit ungekühlter Luft gemischt, wird wiederum eine höhere Lufttemperatur erreicht. Die sich ergebenden Luftzustände nach dem Luftkühler wurden im Projekt OpDeCoLo bereits durch Simulationen nachgewiesen. Daher soll ein Luftbypass mit einer modellbasierten Regelstrategie zur Verringerung des Energieeinsatzes für die Nachbehandlung führen.

3 Projektübersicht

Das folgende Kapitel zeigt die Projektplanung und den aktuellen Stand der einzelnen Arbeitspakete vom Projektstart im September 2016 bis Ende August 2017. Das Projekt ist in sieben Arbeitspakete aufgeteilt. Diese Aufteilung ist in der Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Übersicht der Arbeitspakete des Projektes OpReeBeK²

Arbeitspaket	Kurzbeschreibung
1	Messtechnische Überprüfung, Auswertung und Umrüstung der RLT-Anlagen
2	Umbau und Umrüstung der Laboranlage (WH G 318)
3	OpDeCoLo: Entwicklung der Regelstruktur
4	DeCoSuLo: Aufrüsten der Laboranlage, Reglerentwicklung
5	Entwicklung der Software
6	Messtechnische Untersuchungen der Regelung
7	Projektmanagement, Berichte





Das Projekt gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil wird die Kälteverbraucherseite betrachtet. Es werden Messungen auf Grundlage des vorherigen Forschungsvorhabens (OpDeCoLo 11406UEPII/2) an weiteren Lüftungsanlagen in öffentlichen Einrichtungen erfolgen, um eine erweiterte Basis für die Gültigkeit des technischen Verhaltens von Luftkühlern zu erhalten. Des Weiteren wird anhand der vorhandenen und erprobten Simulation für die OpDeCoLo-Schaltung mit Hilfe eines Luftbypasses ein Konzept für die Komponente Luftkühler mit Bypass und deren Regelung umgesetzt werden (AP 1-3).

Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Entwicklung des Regelungskonzeptes für die Erzeugerseite, DeCoSuLo (Demand Controlled Supply Loop). Entsprechend der Bedarfsanforderung im Verbraucherkreis, soll die Vorlauftemperatur für die Kühlung im Erzeugerkreis nur so weit wie notwendig gekühlt werden (AP 4 und AP 6).

Das Arbeitspaket AP 5 bezieht sich auf alle Projektteile, da hierbei Berechnungswerkzeuge für das gesamte Projekt entwickelt werden.

Im übergeordneten Arbeitspaket 7 (Projektmanagement) erfolgt die Koordination der Projektarbeiten. Es werden regelmäßig Projekttreffen mit den Projektbeteiligten durchgeführt. Weiterhin wird die Zeitplanung regelmäßig abgesprochen und gegebenenfalls angepasst. In den folgenden Abschnitten (3.1 bis 3.7) werden die einzelnen Arbeitspakete detailliert erläutert.

Nachfolgend werden die verwendeten Kennzeichnungen der Projektablauf-Zeitafeln erläutert.

	Bearbeitungszeit nach Projektplan
	Aktuelle Bearbeitungszeit
	Zusätzliche Arbeitsmaßnahmen
	Abschluss von Meilensteinen

3.1 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 1

Das AP 1 beinhaltet die messtechnische Überprüfung und Auswertung der Luftkühlung an Klimaanlage und Teilklimaanlagen, im Folgenden raumluftechnische Anlagen – kurz RLT-Anlagen – genannt. Zur Mindestausstattung der RLT-Anlagen für die Untersuchungen gehört das Vorhandensein eines Luftkühlers.

Eine Übersicht der Planung für das Arbeitspaket 1 ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Die messtechnische Überprüfung führt zu Kennlinien der klassischen hydraulischen Schaltungen von Luftkühlern an RLT-Anlagen außerhalb eines Laborbetriebes, zum Beispiel zur Raumlufthkonditionierung von Hörsälen oder Büroräumen sowie RLT-Anlagen im Laborbetrieb der HTW Berlin. Im weiteren Verlauf des Berichtes werden die Anlagen unterschieden in Typ 1 und Typ 2 (Laborbetrieb).

Eine ausführliche Beschreibung des Ist-Zustandes für das AP 1 erfolgt im Abschnitt 5.1.

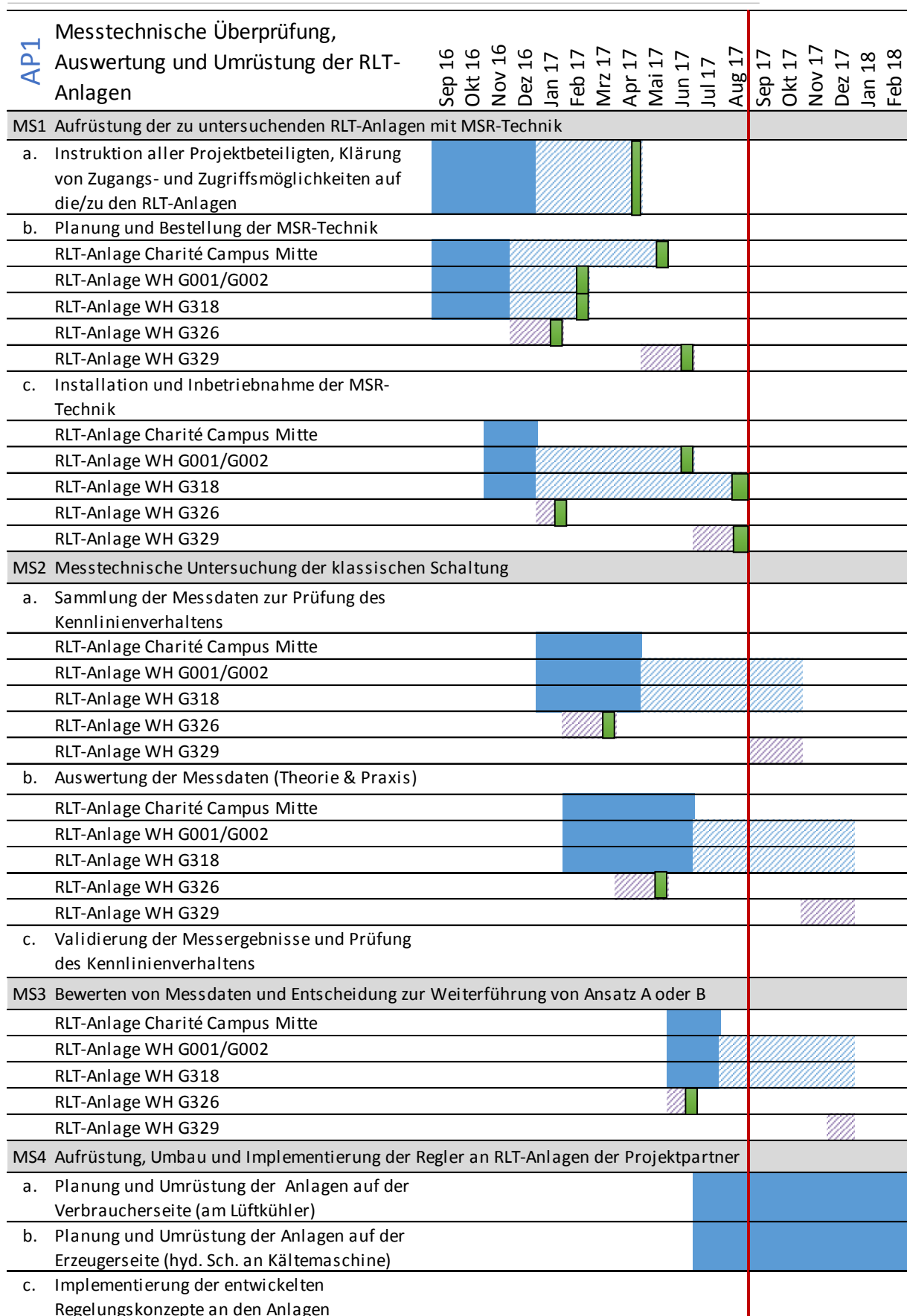


Abbildung 3-1: Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 1

Ziel ist die Überprüfung des theoretischen Verlaufes zum praktischen Verlauf der Luftzustandsänderung an RLT-Anlagen. Im Vordergrund der Messungen stehen die Aufnahme und Auswertung der Kennlinien bei Luftkühlern mit Mengenregelung. Die Ergebnisse der Untersuchungen führen dann zur Entscheidung, welcher Ansatz im Projekt weiter fortgeführt wird. Der Ansatz A beruht auf der Anwendung und Optimierung der OpDeCoLo-Schaltung. Der Ansatz B ist die Verwendung eines Bypasses um den Luftkühler. Durch Mischung zweier Luftströme mit unterschiedlichen Eingangszuständen soll ohne Nachbehandlung ein gewünschter Endzustand erreicht werden.

3.2 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 2

Das AP 2 beinhaltet den Umbau und die Aufrüstung der Laboranlage des Antragstellers am Campus Wilhelminenhof Gebäude G Raum 318. Geplant sind der Anschluss von Laborräumen, die durch die RLT-Anlage zu konditionieren sind, und – in Abhängigkeit welcher Ansatz im Projekt fortgeführt wird – gegebenenfalls der Einbau des Luftbypasses um den Luftkühler. Eine Übersicht der Planung für das Arbeitspaket 2 ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

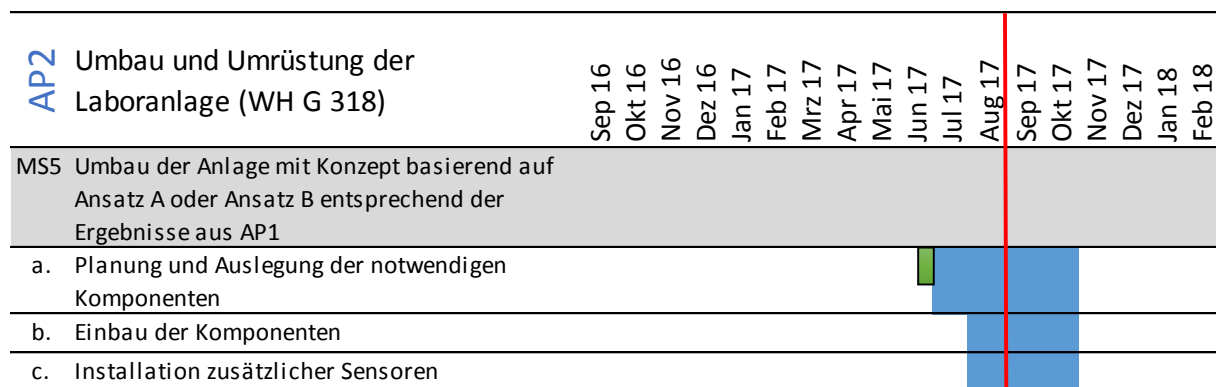


Abbildung 3-2: Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 2

Der Anschluss von Räumen an die RLT-Anlage zur Raumluftkonditionierung ist ein Bestandteil für die Fortführung der Reglerentwicklung in dem folgenden Arbeitspaket des Projektes. Eine ausführliche Beschreibung des Ist-Zustandes für das AP 2 erfolgt im Abschnitt 5.2.

3.3 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 3

Das AP 3 beinhaltet die Weiterentwicklung der Regelstruktur für den Verbraucherkreislauf. Es wird ein modellgestützter Regler-Prototyp entweder für das Konzept A oder das Konzept B entwickelt. Mit Beginn des Projektes bietet die Regelstruktur die Möglichkeit für einen Ausgangspunkt (Luftzustand vor dem Luftkühler) einen Zielpunkt (Luftzustand nach dem Luftkühler) herzustellen. Der Ausgangspunkt liegt bei einer Lufttemperatur von 32 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 40 %. Der Regler soll in diesem Arbeitspaket so erweitert werden, dass Ausgangspunkt und Endpunkt in einem variablen Bereich liegen können. Zudem erfolgt die Bereitstellung einer Regelstruktur, die in branchenüblichen

Industriesteuerungen integriert werden kann, um die Effizienz des Betriebs von RLT-Anlagen zu erhöhen. Anschließend wird ein Regler-Prototyp als Black-Box-Gerät entwickelt, der dezentral mit bestehenden Automatisierungssystemen verbunden werden kann. Eine Übersicht der Planung für das Arbeitspaket 3 ist in Abbildung 3-3 dargestellt.

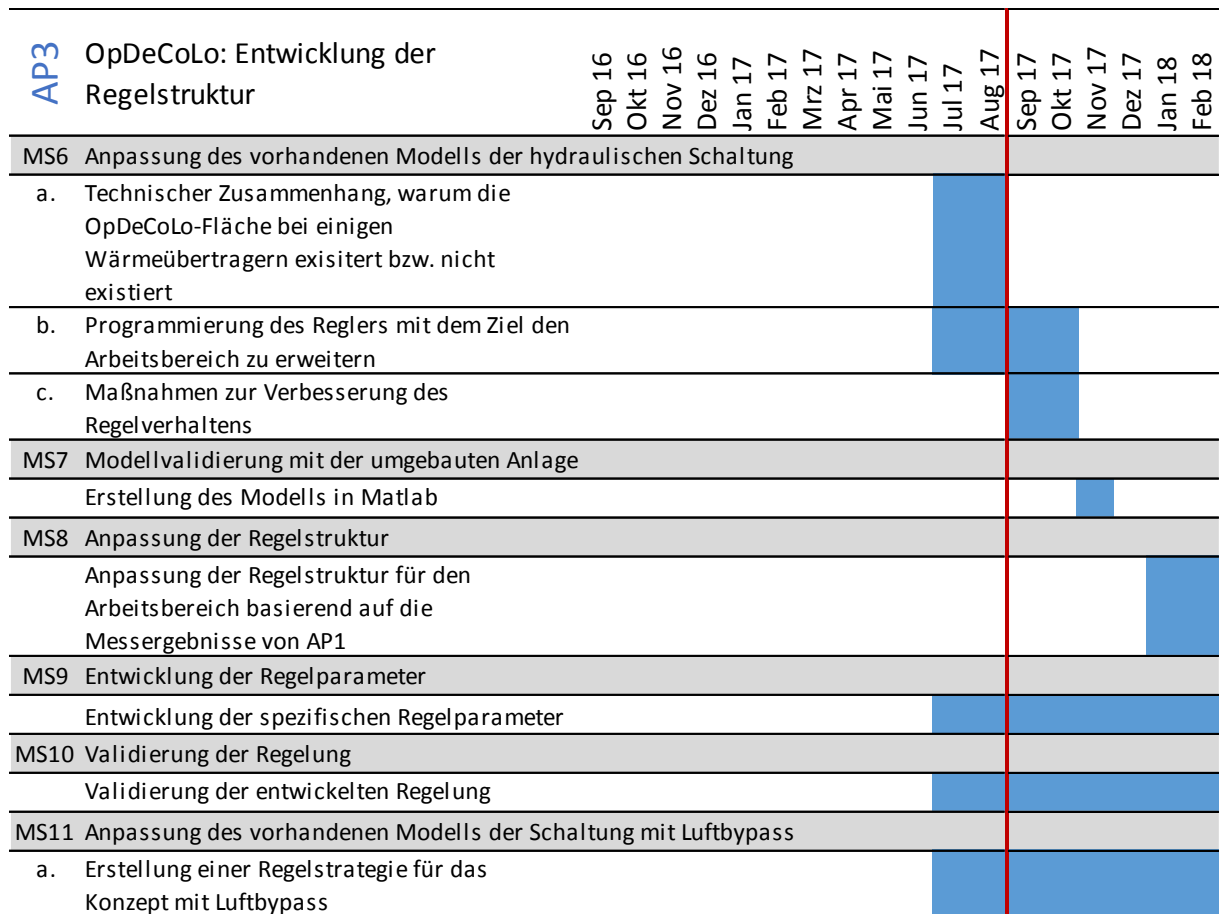


Abbildung 3-3: Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 3

Nach der Festlegung der Fortführung von Ansatz A oder Ansatz B im Projekt OpReeBeK², werden die Komponenten des Ansatzes in die Regelstruktur integriert. Eine ausführliche Beschreibung des Ist-Zustandes für das AP 3 erfolgt im Abschnitt 5.3.

3.4 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 4

Arbeitspaket 4 untersucht die Energieeinsparung der Kälteerzeugung von raumluft-technischen Anlagen. Für die RLT-Anlage des Antragstellers ist ein separater Kaltwassersatz vorhanden, der die Versorgung des Kaltwassers für den Luftkühler sicherstellt. Die Konzepte der Kühlung benötigen in Abhängigkeit des Ausgangszustandes der Luft unterschiedlich hohe (tiefe) Vorlauftemperaturen zum Kühlen oder Kühlen/Entfeuchten. Wird die Luft nur gekühlt, soll der Erzeuger das Kaltwasser ebenfalls nur soweit wie nötig kühlen. Dazu ist eine Regelung/Regelstruktur für den Erzeuger zu erstellen und zu untersuchen, in wie weit in das geschlossene System der Kälteerzeugung eingegriffen werden kann. Die Planung des AP 4 ist als Übersicht in Abbildung 3-4 dargestellt.

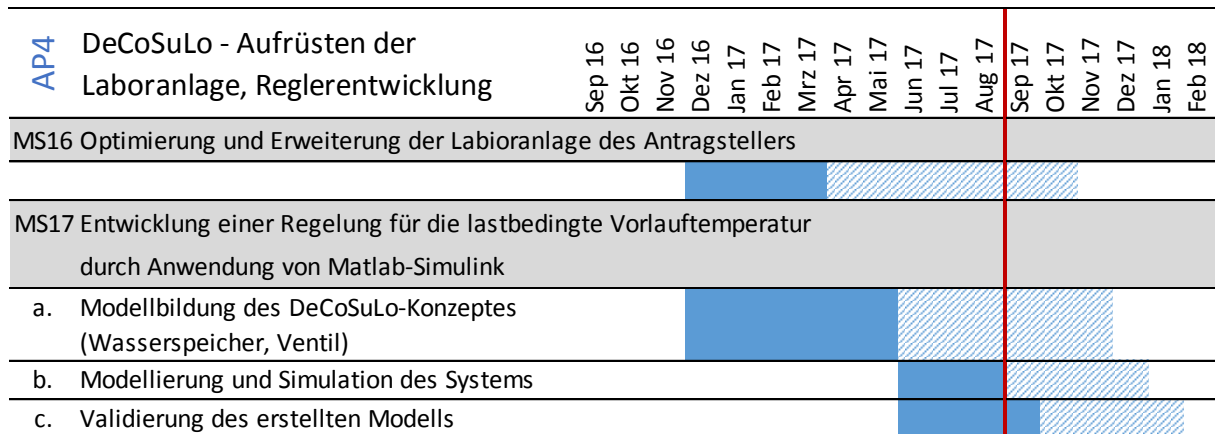


Abbildung 3-4: Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 4

Die Arbeitsschritte für das AP 4 bestehen aus einer Nachbildung der Kälteerzeugung als Modell, Durchführung von Modellversuchen und die anschließende Umsetzung des Modells an der realen Kälteerzeugung. Eine ausführliche Beschreibung des Ist-Zustandes für das AP 4 erfolgt im Abschnitt 5.4.

3.5 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 5

In Abbildung 3-5 ist der Meilensteinplan des Arbeitspaketes 5 dargestellt. Ziel des AP 5 ist die Erstellung/Erweiterung einer Software zur Berechnung von Einsparpotentialen an RLT-Anlagen durch die Verwendung von Matlab-Simulink.

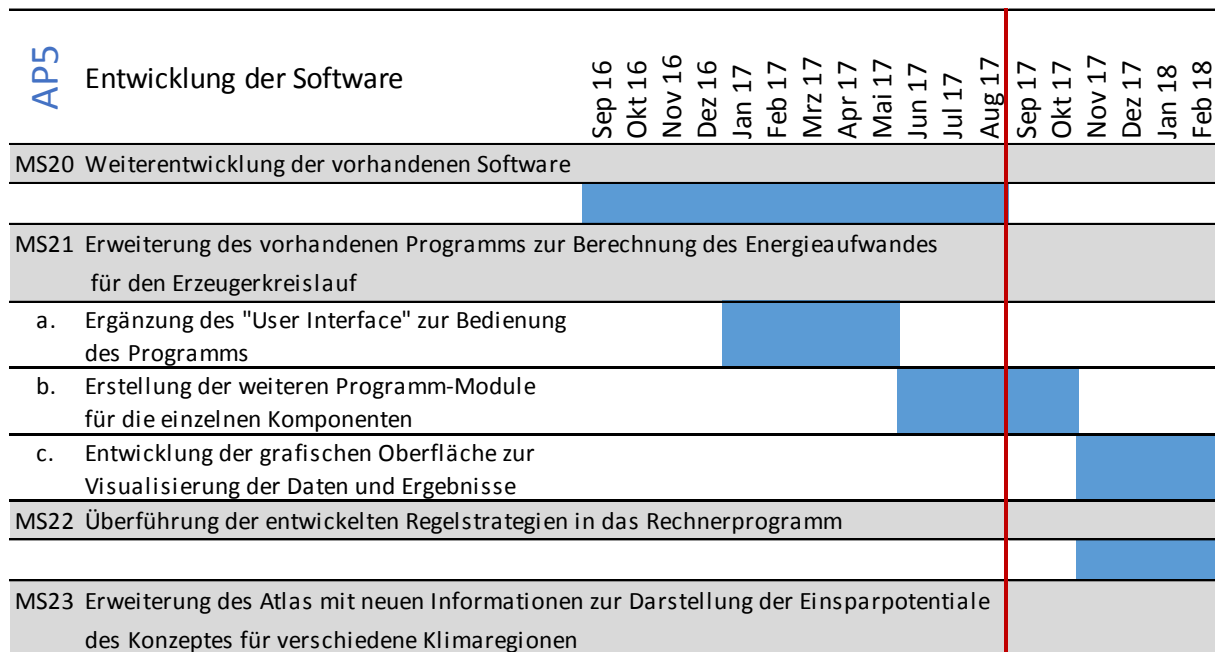


Abbildung 3-5: Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 5

Als Ausgangslage dient eine Software aus dem Vorgängerprojekt OpDeCoLo auf Basis von Excel. Mit dieser Software werden Systemkomponenten von RLT-Anlagen durch ein Drag & Drop – Prinzip ausgewählt und zu einer Anlage zusammengefügt. Anschließend werden der Standard-Energiebedarf sowie der Energiebedarf bei Verwendung einer OpDeCoLo-Schaltung gegenübergestellt. Im aktuellen Bearbeitungszeitraum hat sich herausgestellt, dass die Weiterentwicklung der Software auf Basis von Excel unvorteilhaft ist, da diese nicht genug flexible Sprachmittel zur Verfügung stellt. Weiterhin ist die Anbindung an die bestehende Simulation zu umständlich. Aus diesem Grund hat man sich für ein Werkzeug (Matlab/Simulink) entschieden. Eine ausführliche Beschreibung des Ist-Zustandes für das AP 5 erfolgt im Abschnitt 5.5.

3.6 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 6

Das Arbeitspaket 6 umfasst die Durchführungen der Messungen des Konzeptes DeCoSuLo und des Ansatzes A oder B. Die Ergebnisse ermöglichen einen Vergleich der Konzepte hinsichtlich der Einsparpotentiale. Abbildung 3-5 stellt den Ablauf des AP 6 dar. Eine Bearbeitung erfolgt erst nach dem aktuellen Berichtszeitraum.

AP6	Messtechnische Untersuchungen der Regelung	Sep 16	Okt 16	Nov 16	Dez 16	Jan 17	Feb 17	Mrz 17	Apr 17	Mai 17	Jun 17	Jul 17	Aug 17	Sep 17	Okt 17	Nov 17	Dez 17	Jan 18	Feb 18
		MS24 Messungen der neuen Regelstechnologie																	
	a. Testen bzw. Auswerten des neuen Konzeptes an der Laboranlage																		
	b. Feststellen des tatsächlichen Einsparpotentials der neuen Konzept-Schaltung im Teillastbetrieb																		
	MS25 Messungen der DeCoSuLo-Technologie																		
	a. Testen bzw. Auswerten des neuen Regelungsstrategie an der Laboranlage																		
	b. Feststellen des tatsächlichen Einsparpotentials der neuen DeCoSuLo-Schaltung im Teillastbetrieb																		

Abbildung 3-6: Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 6

Eine ausführliche Beschreibung des Ist-Zustandes für das AP 6 erfolgt im Abschnitt 5.6.

3.7 Übersicht der Projektplanung von Arbeitspaket 7

Das letzte Arbeitspaket AP 7 – Abbildung 3-7 – beinhaltet die Übersicht für das Projektmanagement, die Öffentlichkeitsarbeit sowie die Meilensteine für die Zwischennachweise und die bevorstehenden Präsentationen. Im aktuellen Berichtszeitraum wurden der Zwischennachweis ZN 01 und ZN 02 wie gefordert eingereicht.

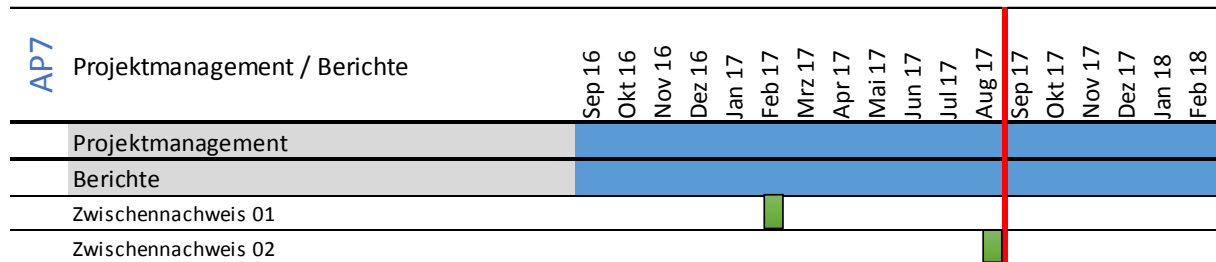


Abbildung 3-7: Darstellung der Projekt-Meilensteine / Soll-Status / Ist-Status / Abschlüsse von Projektaufgaben im Arbeitspaket 7

Eine ausführliche Beschreibung des Ist-Zustandes für das AP 7 erfolgt im Abschnitt 5.7. Im Anhang ist die gesamte Planung von Projektbeginn bis Projektende dargestellt.

4 Grundlagen

In den Industrienationen halten sich die Menschen immer öfter in Innenräumen auf. Zu diesen Innenräumen zählen zum Beispiel das Büro, die Fahrt zur/von der Arbeit, die Reise in den Urlaub oder sportliche Aktivitäten in der Freizeit. Somit ist die Behaglichkeit in Innenräumen ein wichtiger Aspekt, für Gesundheit und Produktivität, Zufriedenheit des Nutzers.

Um die Behaglichkeit in Innenräumen sicherzustellen, sind in der Regel Lüftungsanlagen notwendig. Die einfachste Form - eine Belüftungsanlage - sorgt lediglich für einen Luftaustausch im Raum. Komplexere Systeme bis hin zur Klimaanlage (oder auch Voll-Klimaanlage) hingegen können einen zuvor definierten Luftzustand im Raum herstellen. Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der Luftbehandlung, die im Projekt OpReeBeK² von Bedeutung sind, näher erläutert.

4.1 Grundlagen der Thermodynamik

Die Zustandsänderung der Luft ist das zentrale Thema in der Lüftungstechnik. Luft ist ein Gemisch aus verschiedenen Gasen, Dämpfen und Verunreinigungen. In der freien Atmosphäre kommt die Luft nicht im absolut trockenen Zustand vor. In ihr ist immer ein Anteil an Wasserdampf enthalten. Somit wird von feuchter Luft gesprochen. In der Lüftungstechnik spielt der Wasserdampfanteil der Luft eine wichtige Rolle. Durch eine zu geringe oder zu hohe Luftfeuchtigkeit wird u.a. die thermische Behaglichkeit des Menschen beeinflusst. Weitere Zustandsgrößen werden im nächsten Abschnitt beschrieben [Siemens].

4.2 Das h,x-Diagramm

Das Mollier-h,x-Diagramm ermöglicht es, Zustandsänderungen feuchter Luft grafisch darzustellen, und wurde 1923 von Richard Mollier vorgeschlagen [Mollier]. Das Erwärmen, Kühlen, Entfeuchten, Befeuchten und die Mischung verschiedener Luftmengen sind in diesem Diagramm darstellbar. Das h,x-Diagramm gilt nur für einen bestimmten (Umgebungs)-Druck [Baumgarth et al.]. Die Messungen im Projekt OpReeBeK² finden in der Region Berlin/Brandenburg statt. Für die Berechnungen wird der Umgebungsdruck p_{amb} mit 1013.25 hPa angewendet.

Die Zustandsgrößen Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit (relativ und absolut), Dichte und Enthalpie können direkt aus einem Mollier-h,x-Diagramm (auch psychometrisches Diagramm genannt) abgelesen werden. Abbildung 4-1 zeigt das h,x-Diagramm. Eine Haupteinteilung ergibt sich durch die Linie $\varphi = 1$, bei der die relative Luftfeuchtigkeit 100 % beträgt. Oberhalb dieser Linie befindet sich das ungesättigte Gebiet feuchter Luft, unter dieser Linie befindet sich das Nebelgebiet [Baumgarth et al.].

Weitere Zustandsgrößen, die im h,x-Diagramm ermittelt werden können, sind die Taupunkt-, Feuchtkugel- und Trockenkugeltemperatur sowie der Wasserdampfpartialdruck.

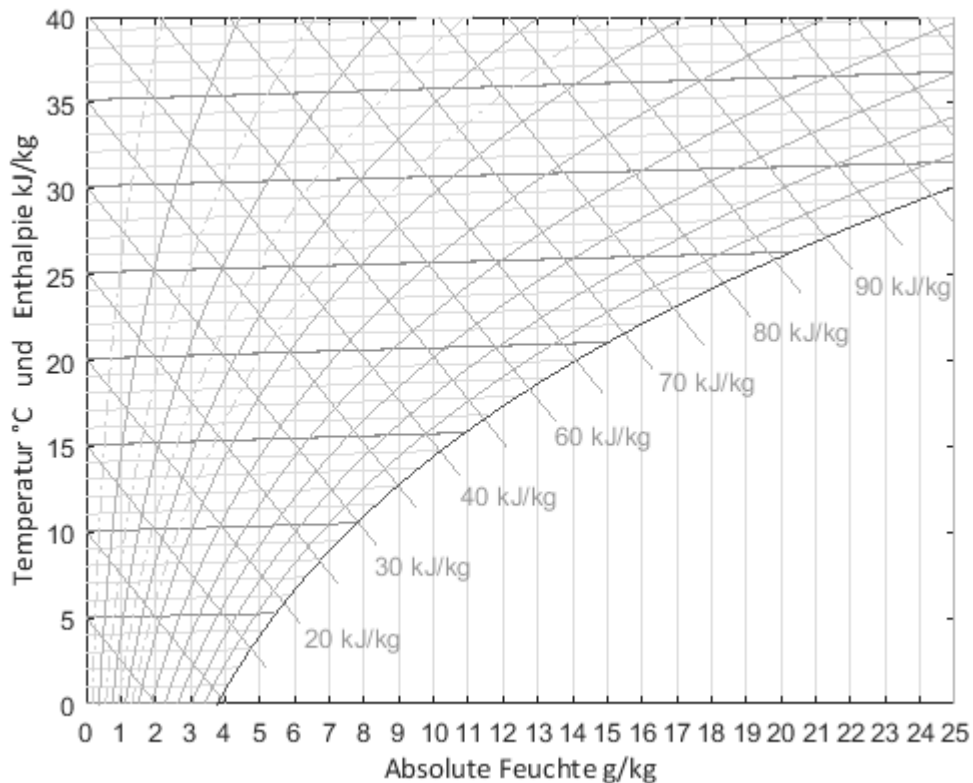


Abbildung 4-1: Darstellung eines Mollier-h,x-Diagramms mit Angabe der Temperatur und Enthalpie (linke vertikale Achse), der absoluten Feuchte (untere horizontale Achse) und den Linien der relativen Feuchte

Die verwendete Messtechnik in der Lüftungstechnik nimmt in der Regel die Messgrößen Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit auf. Anhand dieser Zustandsgrößen und dem Umgebungsdruck können die weiteren Größen bestimmt werden. Messtechnik zur Bestimmung der Taupunkttemperatur oder der absoluten Feuchte wird eher im Labor verwendet.

4.3 Berechnungen von Luft-Zustandsgrößen

Die verschiedenen Zustandsgrößen des h,x-Diagramms – vgl. Abschnitt 4.2 – können auch berechnet werden. Die Gleichungen werden im folgenden Abschnitt dargestellt und u.a. im Arbeitspaket 3, der Modellbildung, benötigt.

Lufttemperatur

Die Lufttemperatur mit dem Formelzeichen ϑ und der Einheit $^{\circ}\text{C}$ befindet sich an der linken vertikalen Achse des h,x-Diagramms und ist eine der Eingangsgrößen für die weiteren Berechnungen. Die horizontalen Linien der konstanten Temperatur - Isothermen genannt - verlaufen mit einer Steigung im Koordinatensystem. Nur die Linie der Temperatur bei 0°C verläuft horizontal. Das verwendete schiefwinklige Koordinatensystem erleichtert das Ablesen im ungesättigten Gebiet der feuchten Luft [Zeller]. Die abfallenden Isenthalpen unterhalb der Sättigungslinie werden nicht dargestellt.

Relative Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchte mit dem Formelzeichen φ , gemessen in %, wird berechnet durch Gleichung 4-1 und stellt das Verhältnis von Partialdruck zu Sättigungsdruck dar [VDI 1997].

$$\varphi = \frac{p_D}{p_S} \quad 4-1$$

Im h,x-Diagramm trennt die Sättigungslinie (Abbildung 4-2 – rot) den Bereich der mit Wasserdampf gesättigten Luft (Nebelgebiet) zum Bereich der ungesättigten Luft. Die blauen Linien stellen den Bereich mit konstanter relativer Feuchte dar.

Sättigungsdruck

Die Wasserdampfkonzentration in der Luft kann solange erhöht werden, bis eine Sättigung erreicht ist. Jeder Temperatur ist ein Sättigungsdruck p_S in Pa zuzuordnen. Wird der Luft trotz des Erreichens des Sättigungsdrucks weiterhin Wasserdampf zugeführt, so führt dies zu einer Kondensation des Dampfes in der Luft [Siemens]. Die Berechnung des Sättigungsdrucks ist mit mehreren Gleichungen möglich. In diesem Projekt wird die Magnus-Formel – siehe Gleichung 4-2 – über Wasser im Temperaturbereich von -50 °C bis 100 °C verwendet.

$$p_S = 611.2 \cdot \exp\left(\frac{17.62 \cdot \vartheta}{243.125 + \vartheta}\right) \quad 4-2$$

Der Sättigungszustand der feuchten Luft wird auch durch die relative Feuchte beschrieben. Sie ist als Verhältnis des Dampfdrucks zum Sättigungsdruck definiert [Baumgarth et al.] – siehe auch Partialdruck.

Absolute Luftfeuchtigkeit

Die absolute Luftfeuchtigkeit x , angegeben in g/kg, wird im Allgemeinen nicht gemessen sondern berechnet. Zur Berechnung der absoluten Luftfeuchtigkeit werden Lufttemperatur, Partialdruck, Umgebungsdruck, Gaskonstante von Wasser und Luft benötigt. Durch Anwendung der Gleichung 4-3 zur Bestimmung der Dichte des Wasserdampfes und Gleichung 4-4, Bestimmung der Dichte der trockenen Luft, kann die absolute Luftfeuchte – Gleichung 4-5 – berechnet werden.

$$\rho_W = \frac{p_D}{R_W \cdot T} \quad 4-3$$

$$\rho_{tL} = \frac{p_{amb} - p_D}{R_L \cdot T} \quad 4-4$$

$$x = \frac{\rho_W}{\rho_{tL}} \quad 4-5$$

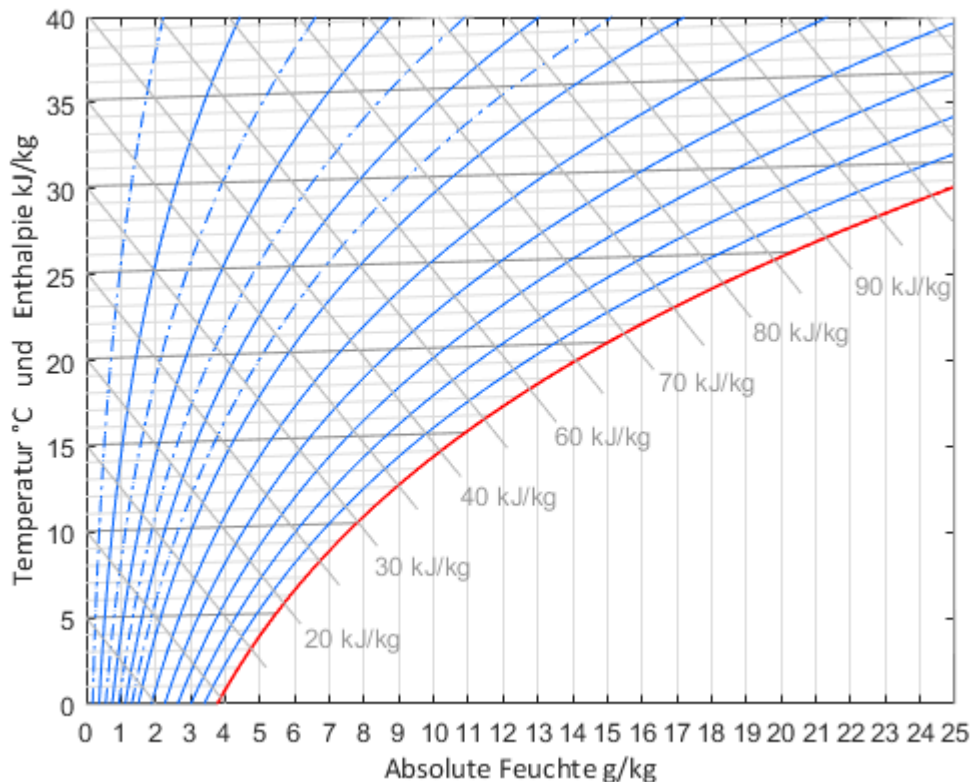


Abbildung 4-2: h,x-Diagramm mit hervorgehobener Darstellung der Linien konstanter Relativer Feuchte – rote Linie entspricht 100 %, blaue volle Linien Einteilung 10 bis 90 %

Partialdruck

Der Wasserdampfdruck ist ein Teil des Luftdrucks - auch Partialdruck p_D in Pa genannt. Er wird bestimmt in Abhängigkeit der relativen Feuchte – Gleichung 4-6 – [Cerbe et al.]. Die relative Feuchte wird als Wert im Bereich 0 bis 100 % angegeben, in Berechnungen jedoch als Wert von 0.0 bis 1.0 verwendet.

$$p_D = \varphi \cdot p_s \quad 4-6$$

Taupunkttemperatur

Um am Luftkühler eine Kondensation des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes zu erhalten, muss die Taupunkttemperatur ϑ_t in °C der Luft unterschritten werden. Ist eine relative Luftfeuchte von $\varphi = 1.0$ erreicht, so wird der Wasserdampf-sättigungsdruck überschritten, und es kommt zur Kondensation des Wasserdampfes in der Luft. Die Taupunkttemperatur wird nach Gleichung 4-7 berechnet [Schweizer-FN]. Die Kondensation vom Wasserdampf findet an Oberflächen statt, daher sind die Lamellen von Luftkühlern oft noch mit Rippen versehen. Je höher die Unterschreitung des Taupunktes, desto höher der Grad der Entfeuchtung [Siemens].

$$\vartheta_t = \varphi^{\frac{1}{8.02}} \cdot (109.8 + \vartheta) - 109.8 \quad 4-7$$

Enthalpie

Die Enthalpie beschreibt den Wärmeinhalt der feuchten Luft und ist ebenfalls auf der linken vertikalen Achse aufgetragen. Sie setzt sich aus der Enthalpie des Wasserdampfes und der Enthalpie der trockenen Luft zusammen. Die Enthalpie hat bei einer Temperatur $\vartheta = 0\text{ °C}$ und einem Wassergehalt von $x = 0\text{ g/kg}$ einen Wärmeinhalt von 0 kJ/kg . Dies entspricht dem Nullpunkt der Enthalpie-Skala. Die Linien der konstanten Enthalpie – Isenthalpen – genannt, verlaufen parallel zueinander (Abbildung 4-3). Die Berechnung der Enthalpie erfolgt durch Gleichung 4-8 [Barlow]. Benötigt werden Lufttemperatur, absolute Luftfeuchte, die Verdampfungsenthalpie von Wasser sowie die spezifische Wärmekapazität von Luft und Wasserdampf. Die Steigung der Isothermen für den ungesättigten Diagrammbereich

$$h_{1+x} = c_{pL} \cdot \vartheta + x \cdot (R_0 + c_{pD} \cdot \vartheta) \quad 4-8$$

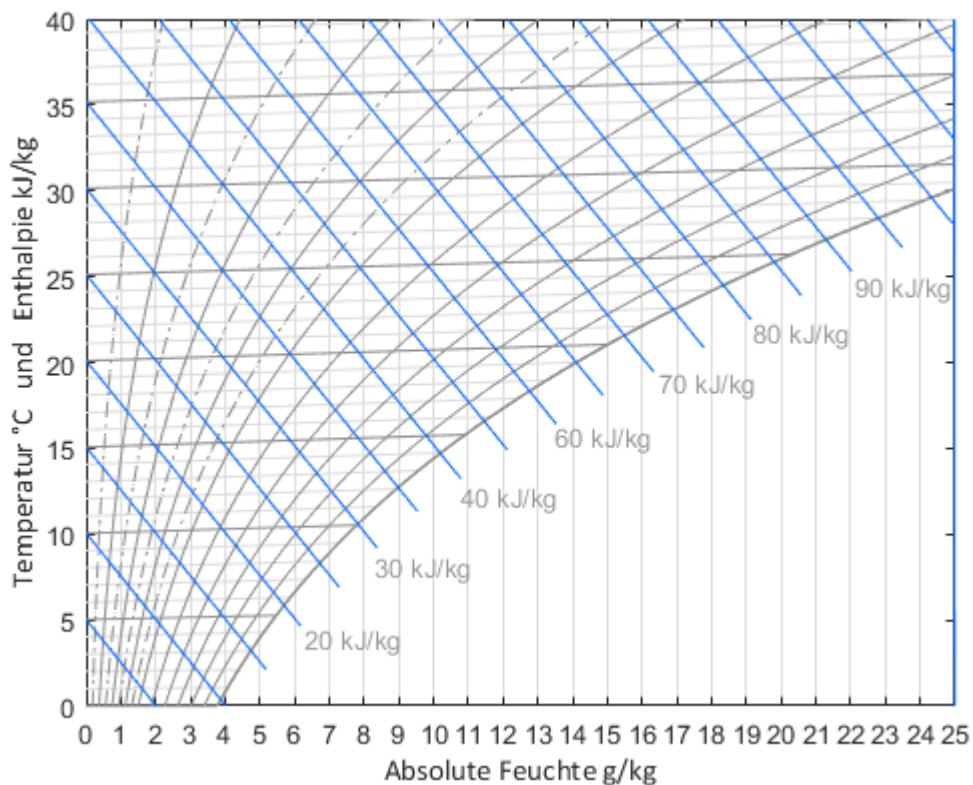


Abbildung 4-3: h,x -Diagramm mit hervorgehobener Darstellung der Linien konstanter Enthalpie (Isenthalpen, blau)

erfolgt nach Gleichung 4-9 [VDI 1997]. Sie haben im positiven Temperaturbereich eine positive Steigung, im negativen Temperaturbereich eine negative Steigung.

$$\frac{\partial h}{\partial x} = c_{pD} \cdot \vartheta \quad 4-9$$

4.4 Hydraulische Schaltungen in der Lüftungstechnik

Erhitzer und Kühler raumluftechnischer Anlagen werden durch zwei mögliche hydraulische Schaltungen versorgt. Eine Möglichkeit ist die Beimischregelung (Abbildung 4-4 - links), bei der die Vorlauftemperatur durch das Beimischen des Rücklaufwassers, bei konstantem Wassermassenstrom über den Wärmeübertrager, verändert wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Mengenregelung (Abbildung 4-4 - rechts). Bei dieser Anschlussart ist die Vorlauftemperatur konstant (Schwankungen aus dem Erzeugerkreis werden dabei nicht berücksichtigt), und der Wassermassenstrom über den Wärmeübertrager ist variabel.

Bei Erhitzern ist ein Effekt der verschiedenen Schaltungen am Wärmeübertrager nicht erkennbar. Die Wahl für die jeweilige Schaltung erfolgt bei Erhitzern auf Basis der Erzeuger-Verbraucher-Zusammenstellung. Werden verschiedene Systemtemperaturen benötigt, wird für den Verbraucher mit der höchsten notwendigen Vorlauftemperatur diese bereitgestellt, für Verbraucher mit geringeren Temperaturanforderung wird die Vorlauftemperatur durch Beimischen verringert.

Bei Luftkühlern zeigt die Wahl der hydraulischen Schaltung Unterschiede auf. Bei der Beimischregelung kann die Vorlauftemperatur so eingestellt werden, dass die Taupunkttemperatur nicht unterschritten wird – vgl. Abschnitt 4.3. Dadurch kann die Luft entweder nur gekühlt oder gekühlt und entfeuchtet werden. Bei der Mengenregelung findet in einem Bereich des Luftkühlers immer eine Entfeuchtung statt, da durch die niedrige Vorlauftemperatur (üblich 6 °C) dort die Taupunkttemperatur der Luft unterschritten wird.

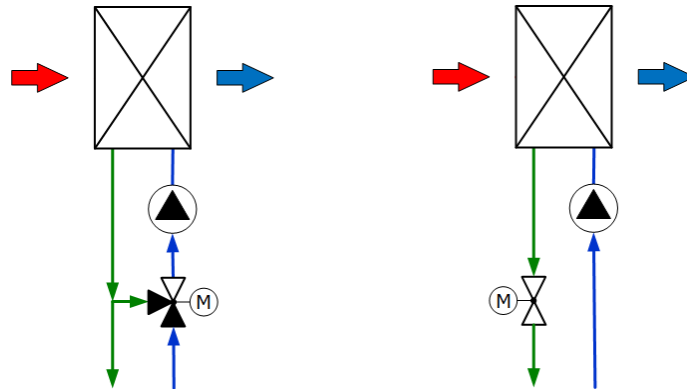


Abbildung 4-4: Darstellung der Beimischregelung (links) und der Mengenregelung (rechts) für die Verwendung bei Luftkühlern

4.5 Luftkühlung

Für die Luftkühlung gibt es zwei Möglichkeiten, die Oberflächenkühlung und die Verdunstungskühlung. Die Luftkühlung durch Verdunstung wird in diesem Bericht nicht betrachtet. Bei der Oberflächenkühlung sind zwei Fälle zu unterscheiden. Die Luftkühlung mit und ohne Unterschreitung der Taupunkttemperatur [Nowotny et al.].

Diese werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

Luftkühlung ohne Entfeuchtung

Wird die Taupunkttemperatur der Luft nicht unterschritten so erfolgt eine Kühlung der Luft ohne die Ausscheidung von Wasser. Nach Gleichung 4-8 gilt für die Enthalpie der einströmenden Luft über den Luftkühler die Gleichung 4-10, für die Berechnung der Enthalpie der ausströmenden Luft wird die Gleichung 4-11 angewendet:

$$h_{1+x} = c_{pL} \cdot \vartheta_E + x_E \cdot (R_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_E) \quad 4-10$$

$$h_{1+x} = c_{pL} \cdot \vartheta_A + x_A \cdot (R_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_A) \quad 4-11$$

Es ergibt sich die Differenz beider Enthalpien nach (Gleichung 4-13) [Rietschel 2]:

$$\Delta h = h_E - h_A \quad 4-12$$

$$\Delta h = (\vartheta_E - \vartheta_A) \cdot (c_{pL} + x \cdot c_{pD}) \quad 4-13$$

Es findet keine Änderung der absoluten Luftfeuchtigkeit statt, weshalb die Zustandsänderung der Luft parallel zur Achse des absoluten Wassergehalts verläuft - siehe Abbildung 4-5 von Punkt A nach Punkt B.

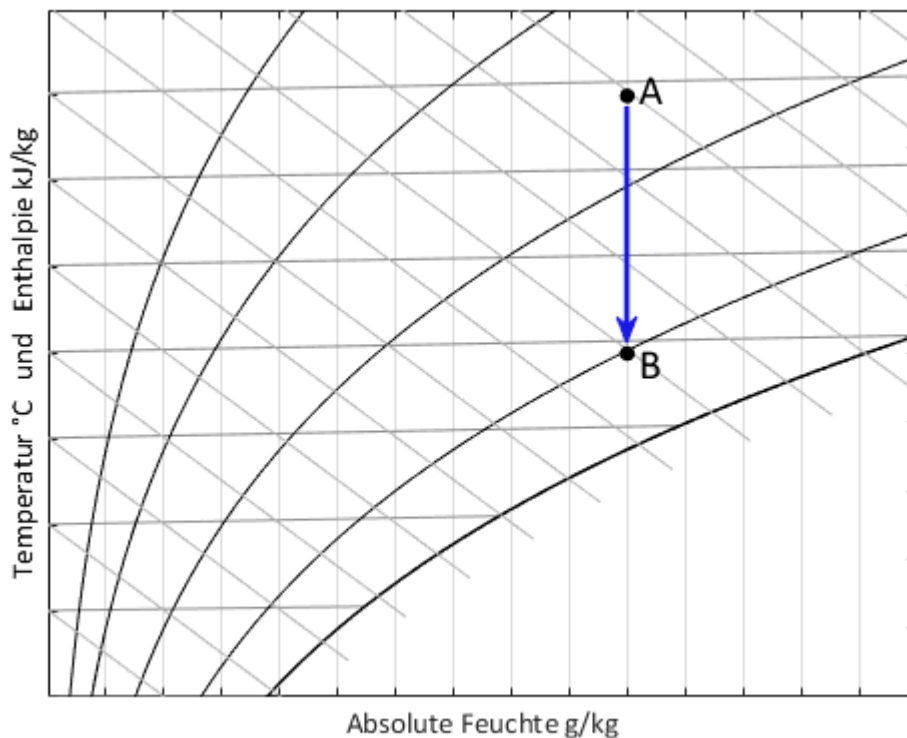


Abbildung 4-5: Verlauf des Luftzustandes im Kühlungsfall ohne Taupunktunterschreitung der Luft

Bei einem idealen Luftkühler würde sich so die Lufttemperatur bis auf die Oberflächentemperatur des Luftkühlers abkühlen. Im realen Prozess wird die Oberflächentemperatur des Luftkühlers nicht erreicht. Eine Ursache ist die nur kurze Verweildauer der Luft im Kühler an den Kühllamellen (ein Wärmeausgleich erfolgt logarithmisch), eine weitere Ursache ist ein „Bypass-Effekt“. Die Luft strömt dabei in mehreren Schichten durch den Luftkühler, wobei nur die Grenzbereiche die Kühloberfläche berühren. Somit wird ein Teil des Luftstromes nicht gekühlt. Die mittlere Oberflächentemperatur des Luftkühlers berechnet sich nach Gleichung 4-14 [Huber et al.].

$$\vartheta_{\text{KÜ}} = \frac{\vartheta_{\text{VL}} + \vartheta_{\text{RL}}}{2} + 1 \dots 2 \text{ K} \quad 4-14$$

Luftkühlung mit Entfeuchtung

Wird die Taupunkttemperatur der Luft unterschritten, so kommt es an kalten Oberflächen zur Kondensation des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes. Um diese Oberfläche zu vergrößern, werden in die Lamellen des Luftkühlers auch Rippen eingestanz. Mit der Kühlung und Entfeuchtung der Luft im Luftkühler sinkt auch die Taupunkttemperatur und die Luft wird entfeuchtet. Der Verlauf der Kühlung und Entfeuchtung ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

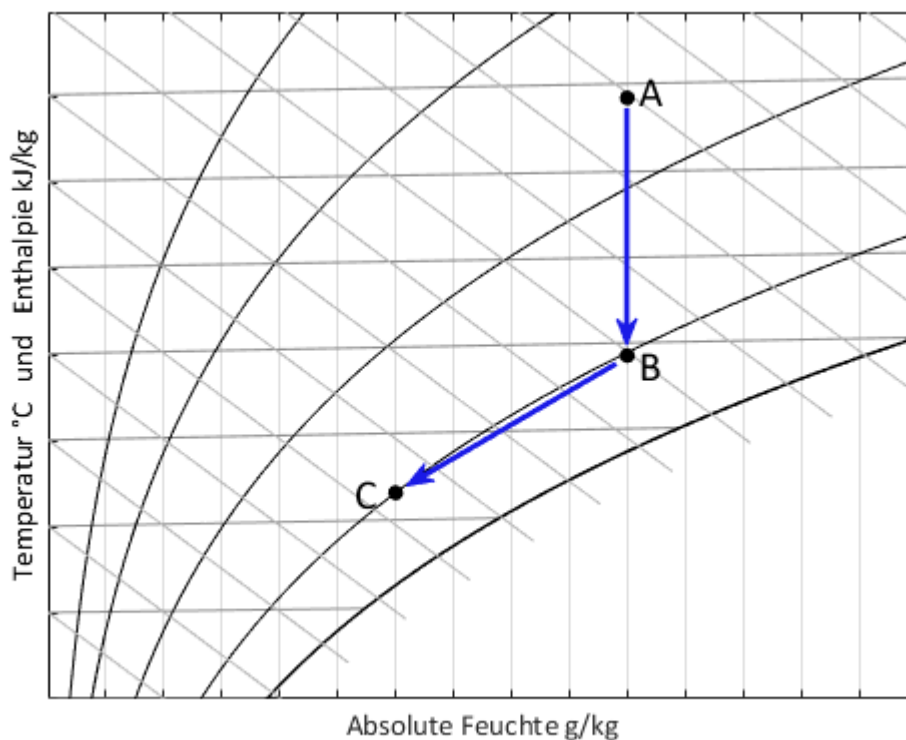


Abbildung 4-6: Verlauf des Luftzustandes im Kühlungs- und Entfeuchtungsfall mit Taupunktunterschreitung der Luft

4.6 Luftmischung

Von Luftmischung wird gesprochen, wenn zwei Luftmassenströme \dot{m} mit unterschiedlichen Luftzuständen Z_1 und Z_2 miteinander vermischt werden. Der Zustand Z_3 nach der Mischung wird mit Gleichung 4-15 berechnet. Die Mischgleichung kann für die Enthalpie (Gleichung 4-16) oder für die Luftfeuchte (Gleichung 4-17) angewendet.

$$Z_3 = \frac{Z_1 \cdot \dot{m}_1 + Z_2 \cdot \dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad 4-15$$

$$h_A = \frac{h_{E,1} \cdot \dot{m}_{E,1} + h_{E,2} \cdot \dot{m}_{E,2}}{\dot{m}_{E,1} + \dot{m}_{E,2}} \quad 4-16$$

$$x_A = \frac{x_{E,1} \cdot \dot{m}_{E,1} + x_{E,2} \cdot \dot{m}_{E,2}}{\dot{m}_{E,1} + \dot{m}_{E,2}} \quad 4-17$$

In Abbildung 4-7 ist ein Beispiel der Luftmischung bei gleichem Massenstromverhältnis dargestellt. Der zu entfeuchtende Luftstrom muss in jedem Fall bis zur Taupunktunterschreitung gebracht werden. Wird der Taupunkt nicht unterschritten, befindet sich der Mischpunkt auf der Strecke A nach B.

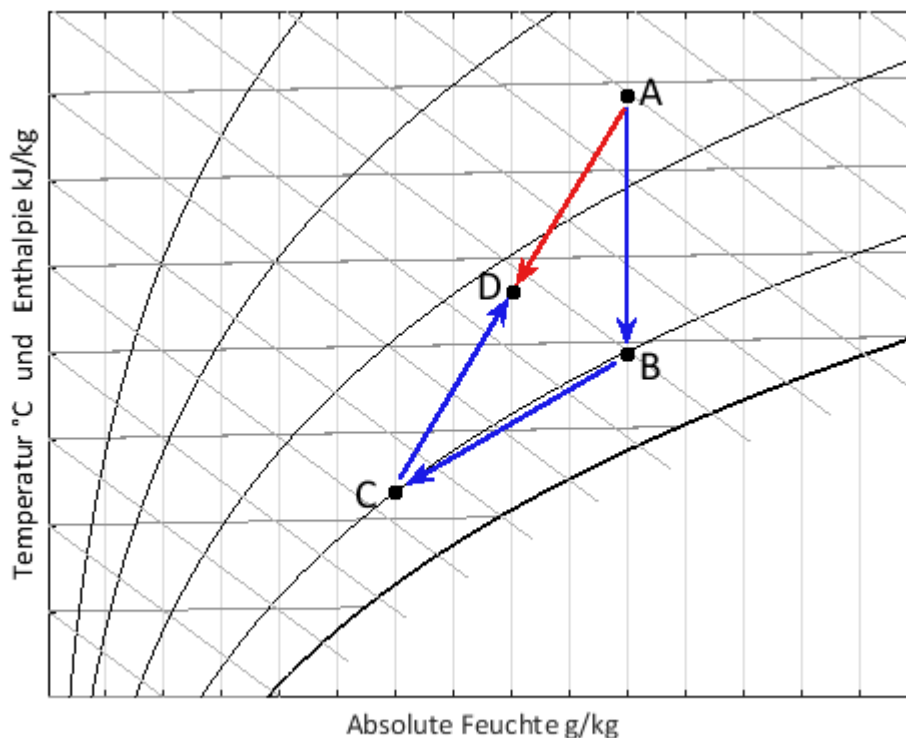


Abbildung 4-7: Darstellung der Mischung zweier Luftströme mit unterschiedlichen Zuständen bei gleichem Massenstrom, Anwendung z.B. bei Luftmischung durch einen Bypass, Luftzustand unbehandelt von A nach D, Luftzustand behandelt von C nach D

4.7 Kälteerzeugung

Der Begriff Kälteerzeugung bedeutet physikalisch betrachtet, einem Reservoir Wärmeenergie zu entziehen. Unter Betrachtung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik (SLT) verläuft ein Wärmestrom immer vom Reservoir höherer Temperatur zum Reservoir geringerer Temperatur. Für die Kälteerzeugung ist damit die Formulierung des SLT von Rudolf Clausius (dt. Physiker 1822 – 1888) von großer Bedeutung. „Wärme kann niemals von selbst aus einem Körper niedriger Temperatur in einen Körper höherer Temperatur übergehen“ [Hoche et al.].

Für die Kühlung der Luft bedeutet es, dass ein Medium benötigt wird, welches eine geringere Temperatur hat als die Luft selbst. Die Herstellung eines unterschiedlichen Temperaturniveaus erfolgt im sogenannten Kreisprozess einer Kältemaschine (Abbildung 4-8). Der Kreisprozess wird im idealen Fall nach Carnot (t,S-Diagramm) beschrieben. Er besteht aus den Prozessen Verdichten, Verflüssigen, Entspannen und Verdampfen [Miller et al.]. Diese Prozesse werden in Abbildung 4-9 dargestellt und nachfolgend beschrieben [Tipler/Mosca].

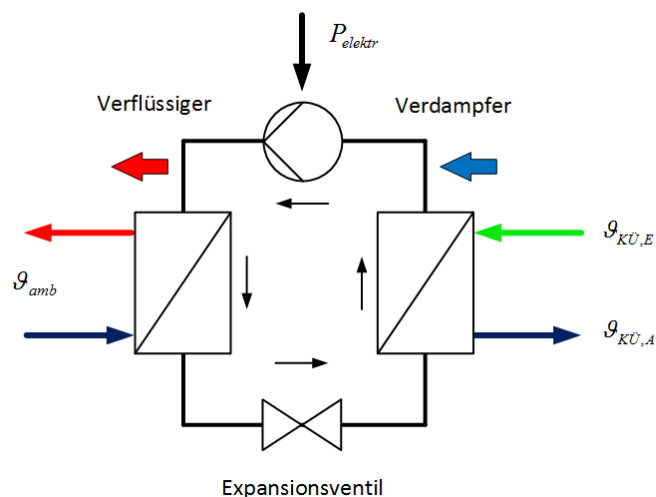


Abbildung 4-8: Prinzip-Darstellung einer Kälteerzeugung

Die erste Phase ist die **Isentrope Kompression** von Punkt 1 nach Punkt 2. In diesem Schritt wird das dampfförmige Kältemittel über einen Kompressor verdichtet. Temperatur und Druck im System erhöhen sich.

Die zweite Phase ist die **Isobare Kondensation**. Über einen Wärmeübertrager (Punkt 2 nach Punkt 3) wird das Kältemittel durch z.B. Umgebungsluft oder ein anderes Kühlmedium abgekühlt, wodurch es zu Kondensation des Kältemittels kommt. Der Druck bleibt dabei hoch.

In der dritten Phase findet die **Isenthalpe Expansion** von Punkt 3 nach Punkt 4 statt. Der Druck des flüssigen Kältemittels wird dadurch gesenkt. Durch diesen Vorgang kühlt das Medium außerdem ab.

Die letzte Phase des Kreisprozesses ist die **Isobare Verdampfung**. Von Punkt 4 nach Punkt 1 wird über einen Wärmeübertrager das Kältemittel verdampft, wobei es Wärme von einem anderen Medium aufnimmt, z.B. dem Kühlwasser der RLT-Anlage. Der Prozess kann direkt – Wärmeübertrager befindet sich im zu kühlenden Luftstrom – oder indirekt – ein Wärmeträgermedium wird benötigt – erfolgen.

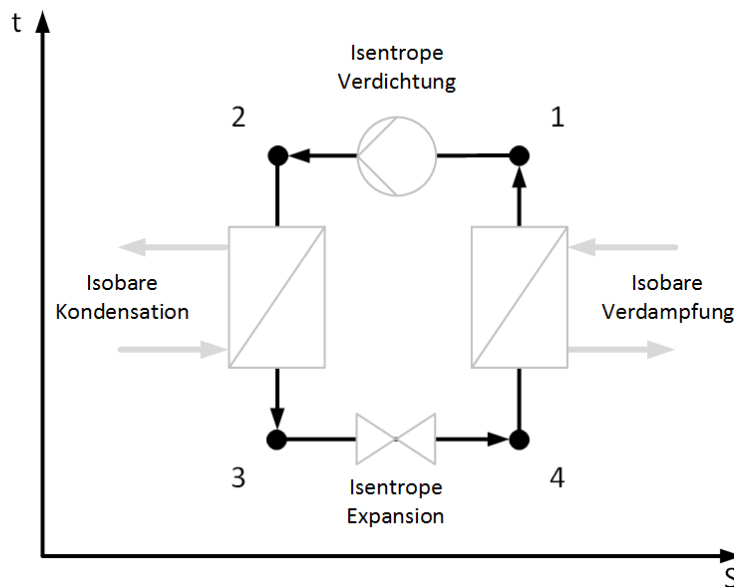


Abbildung 4-9: Darstellung des Carnot-Kreisprozesses im t,S-Diagramm

Die Effektivität der Kältemaschine wird als COP (Coefficient of Performance) bezeichnet. Mit Gleichung 4-18 wird der COP aus dem Verhältnis Kältemitteltemperatur am Verdampfer zu Kältemitteltemperatur des Kondensators (Verflüssiger) minus Kältemitteltemperatur Verdampfer bestimmt.

$$\text{COP}_{\text{KM}} = \frac{T_0}{T_U - T_0} \quad 4-18$$

Die erreichbaren Temperaturniveaus sind unter anderem vom Kältemittel abhängig. Auf eine Einführung zu den Kältemitteln wird jedoch in diesem Projekt nicht eingegangen. Die Zustandsänderungen eines Kältemittels werden in Abbildung 4-10 – einem log-p,h-Diagramm – dargestellt. Aufgezeigt sind ebenfalls die vier Phasen. Wichtig in der Darstellung sind die Punkte 1 und 4. Bei der Isobaren Verdampfung (Punkt 4 nach Punkt 1) wird das Kältemittel überhitzt, damit zum Kompressor nur verdampftes Kältemittel gelangt. Umgekehrt wird das Kältemittel von Punkt 1 nach Punkt 2 unterkühlt, damit es vollständig kondensiert zum Expansionsventil gelangt.

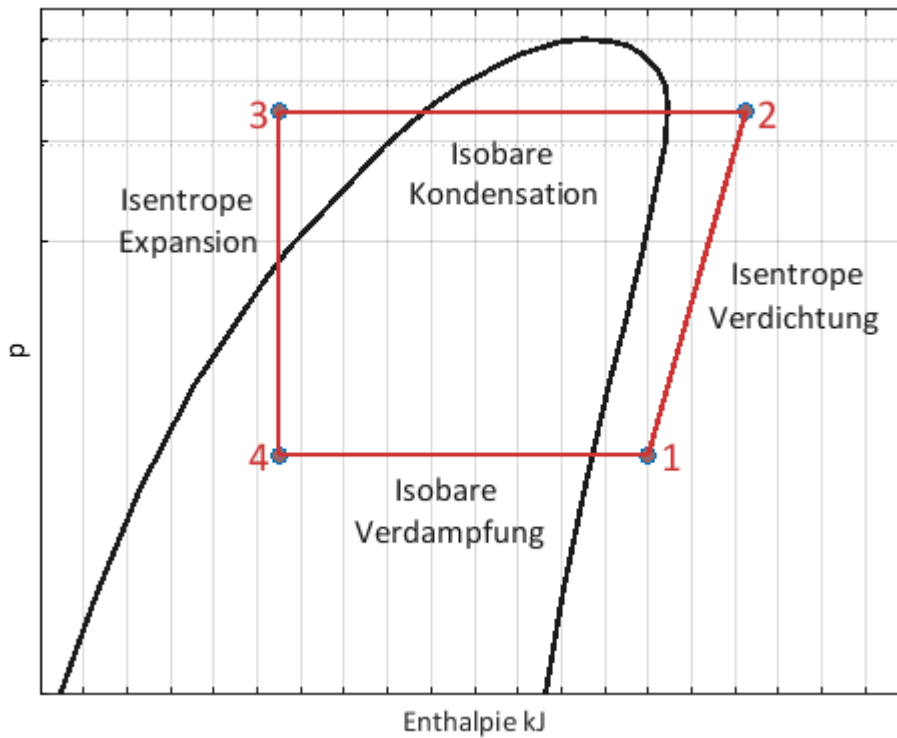


Abbildung 4-10: Darstellung des Kreisprozesses im log-p,h-Diagramm

Durch die Überhitzung des Kältemittels wird ein Ansaugen von Flüssigkeitsteilchen am Kompressor vermieden. Ein unterkühltes Medium am Eintritt des Expansionsventils verringert die Gefahr der Geräuschbildung.

5 Stand des Projektes

5.1 Ist-Stand Arbeitspaket 1

Messtechnische Überprüfung, Auswertung und Umrüstung öffentlicher Anlagen (AP 1)

Die Übersicht der Projektplanung zum AP 1 wird im Abschnitt 3.1 erläutert.

5.1.1 Aufgabenstellung

Messungen am Luftkühler der raumluftechnischen Anlage im Labor G 318 der HTW Berlin haben im Projekt OpDeCoLo Abweichungen zum Verlauf der Zustandsänderung der Luft nach dem Luftkühler gegenüber theoretischen Berechnungen ergeben - vgl. Abschnitt 4.5. Die im OpDeCoLo-Projekt verwendete Anlage ist eine Laboranlage. Um auszuschließen, dass auf Grund verschiedener Umbauten für Versuchsdurchführungen der Anlagezustand von einer „normalen“ Anlage abweicht, werden Messungen der Zustandsänderungen an weiteren RLT-Anlagen durchgeführt. Im folgenden Abschnitt werden die RLT-Anlagen des Arbeitspaketes vorgestellt und durchgeführte Messungen erläutert.

Hinweis: In der Abbildung wird zur besseren Übersicht auf die Darstellung von Jalousieklappen, Sensoren, etc. zunächst verzichtet.

5.1.2 Aktueller Stand

Der aktuelle Stand des Arbeitspaketes 1 wird, unterteilt nach RLT-Anlagen, beschrieben. In der Tabelle 5-1 sind die im Projekt betrachteten Anlagen aufgelistet.

Tabelle 5-1: RLT-Anlagen zur Messung der Luftzustände

RLT-Anlage	Beschreibung
RLT-Anlage Charité Campus Mitte	Bettenhaus, Büro und Lagerräume
RLT-Anlage WH G001/G002	Hörsaalanlage
RLT-Anlage WH G318	Laboranlage
RLT-Anlage WH G326	Laboranlage
RLT-Anlage WH G329	Laboranlage

Der Abschluss des AP 1 verzögert sich auf Grund der ungeeigneten klimatischen Bedingungen.

Mit Ausnahme der RLT-Anlage im Labor G 318 ist der eingehende Luftzustand in die RLT-Anlagen der Außenluftzustand. Dieser Außenluftzustand soll für die Messungen bei 32 °C Lufttemperatur und 40 % relativer Luftfeuchte liegen. Das entspricht einer absoluten Feuchte von rund 12 g/kg. Die Wasserdampfbeladung ist nur in den Sommermonaten zu erwarten. Abbildung 5-1 zeigt die die stündlichen Luftzustände vom 01. Januar bis 01. Juli

2017 auf. Die Werte sind in Tabelle 5-2 nach Höhe und Häufigkeit geordnet zusammengefasst und in Abbildung 5-2 grafisch dargestellt. Die rote Linie zeigt die Grenzfeuchte über der die Messungen möglich sind. Es ist zu erkennen, dass nur an wenigen Tagen des Jahres die entsprechenden Bedingungen vorlagen.

Tabelle 5-2: Zusammenfassung der Häufigkeiten der absoluten Feuchte der Außenluft

Wertebereich der absoluten Feuchte g/kg	Häufigkeit in h
bis 8	3934
> 8 bis 10	522
>10 bis 12	256
>12 bis 14	99

Zusammengefasst sind bis 01. Juli 2017 rund 99 Stunden mit einer absoluten Feuchte von mehr als 12 g/kg vorhanden gewesen. Diese Zeit ist jedoch nicht zusammenhängend, so dass die Ergebnisse der durchgeführten Messungen dadurch beeinflusst werden. Genaue Erläuterungen erfolgen im Abschnitt der jeweiligen Anlage.

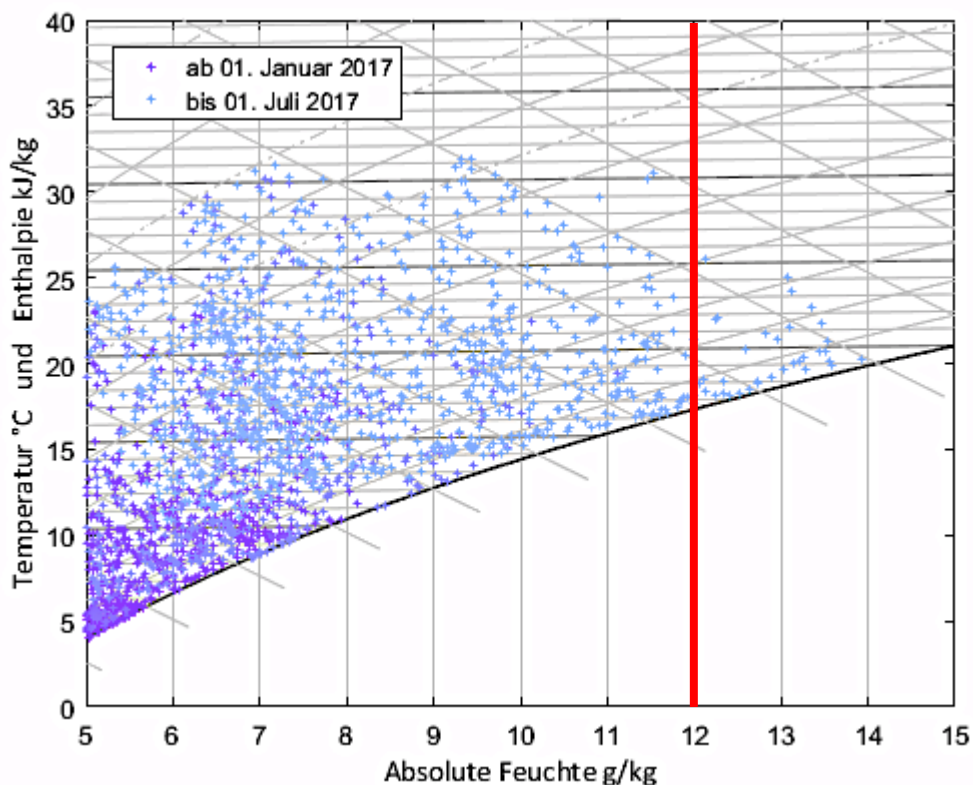


Abbildung 5-1: Darstellung der absoluten Feuchte der Außenluft (stündlichen Messung der Außenluftbedingung durch die Wetterstation der HTW Berlin, 01. Januar 2017 bis 01. Juli 2017)

5.1.2.1 RLT-Anlage im Labor G318

Die RLT-Anlage – Abbildung 5-3 – im Labor G 318 ist eine Vollklimaanlage und gehört zum Typ 2 des Projektes. Die Anlage im Labor kann die eingehende Luft wahlweise von außen (ODA) oder aus dem Aufstellraum (IDA) beziehen. Durch eine Simulationsanlage, eine vorgeschaltete RLT-Anlage mit Luffterhitzer, Luftkühler und Befeuchter, kann die IDA auf einen bestimmten Luftzustand eingestellt und somit Versuche unabhängig von den Außenluftbedingungen durchgeführt werden. Zu Beginn des Projektes OpReeBeK² sind Baumaßnahmen an der Anlage G 318 durchzuführen. Nach der Durchführung der Baumaßnahmen wird der Anlagenzustand (Einstellungen der Regler von Vorerhitzer/Nacherhitzer/Kühler/Befeuchter der RLT- und der Simulations-Anlage) anhand von Messreihen überprüft. Erst nach diesen Überprüfungen wird mit der eigentlichen Versuchsdurchführung begonnen. Die erste Messreihe zur Mengen-Regelung wird mit einer Lufttemperatur vor dem Kühler von rund 32.0 °C und 40.0 % relativer Feuchte durchgeführt. Die Frequenz des Ventilators ist für die Versuchsdurchführung konstant auf 30 Hz eingestellt.

Der Wassermassenstrom wird über das Durchgangsventil von 0 bis 100 % mit einer Schrittweite von 10 % alle 1.5 Stunden erhöht. Der Verlauf des Luftzustandes nach dem Kühler ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Zur Übersicht sind der Temperaturverlauf von Kälte-Vorlauf und Kälte-Rücklauf, sowie der Kälte-Massenstrom in Abbildung 5-5 sowie die Leistungsbilanzen in Abbildung 5-8 dargestellt.

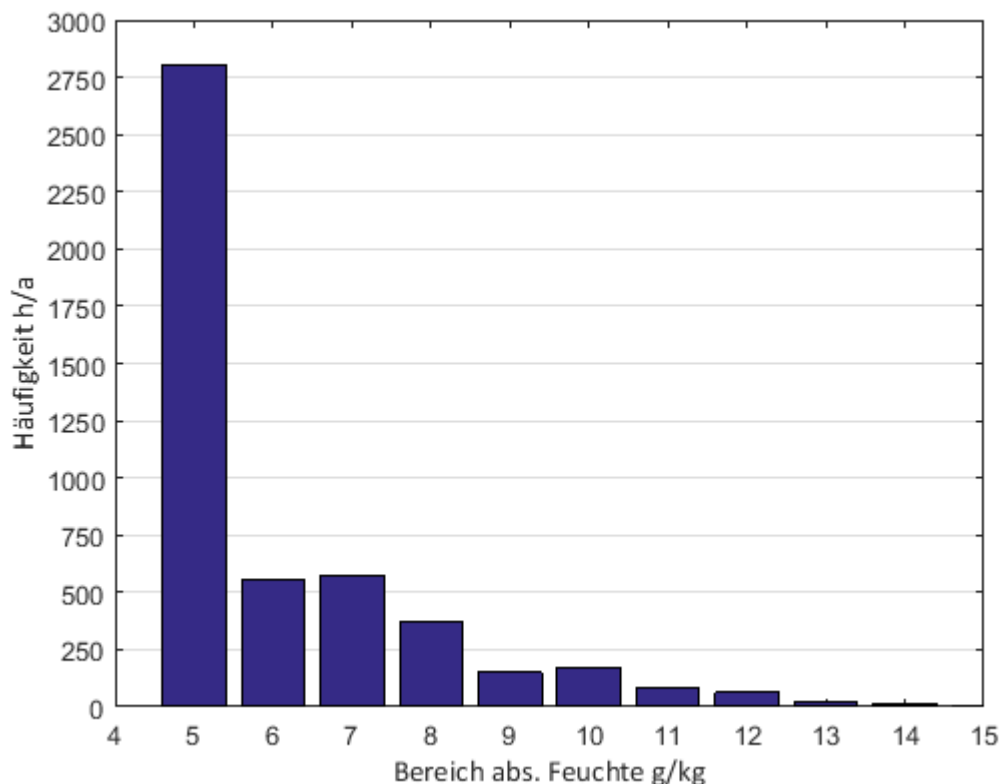


Abbildung 5-2: Darstellung der Häufigkeit absolute Luftfeuchtigkeit für den Zeitraum 01. Januar 2017 bis 01. Juli 2017

Überblick der technischen Daten

In Tabelle 5-3 sind die relevanten technischen Daten der Anlage G 318 zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Zusammenfassung der technischen Daten RLT-Anlage G318

Beschreibung	Wert	Einheit
Luftvolumenstrom, max.	2900	m ³ /h
Luftkühler:		
Leistung	22.1	kW
Auslegungssystemtemperaturen	6/12	°C
Auslegungsmassenstrom	3170	kg/h

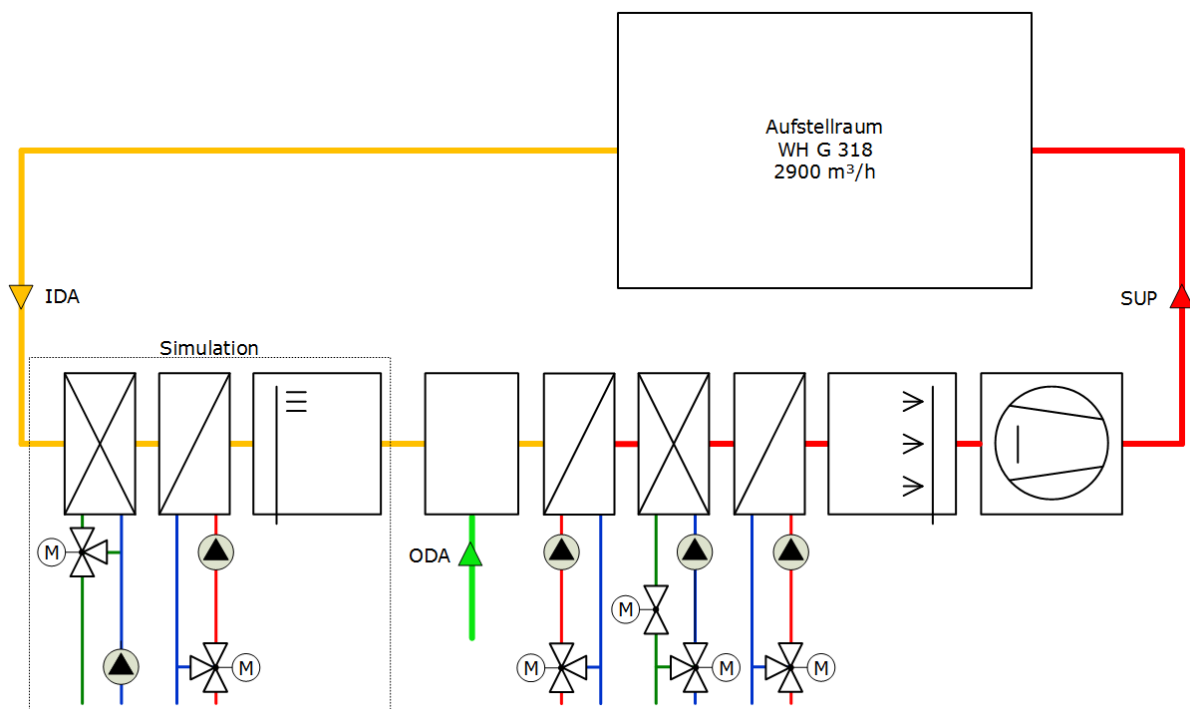


Abbildung 5-3: Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus der Laboranlage des Antragstellers

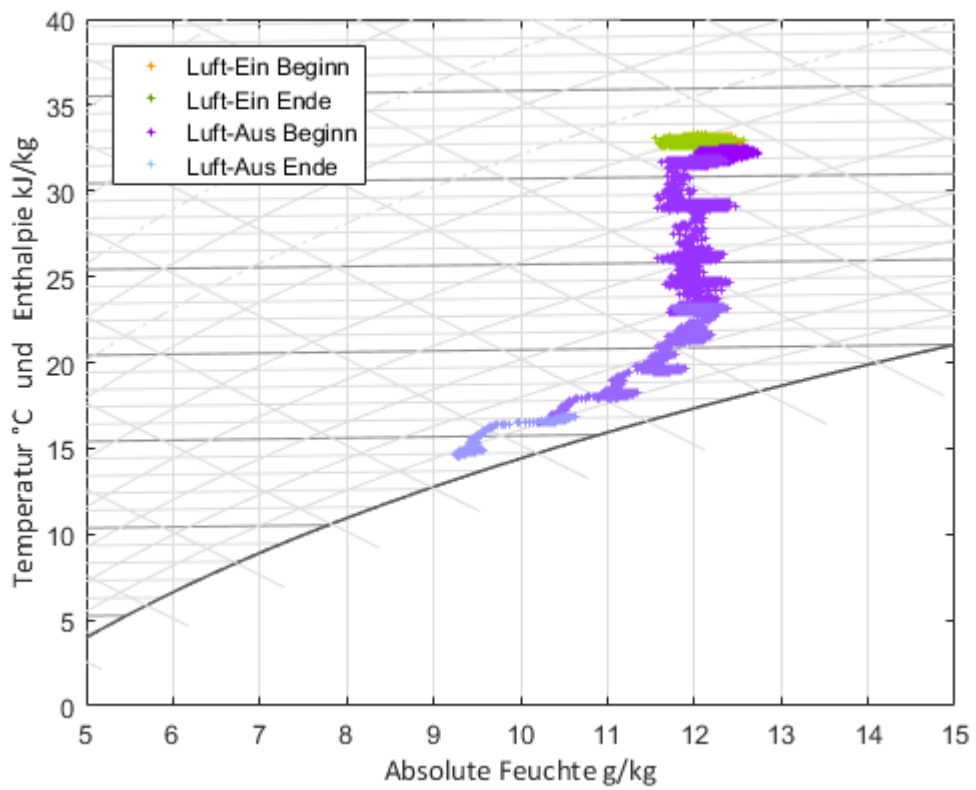


Abbildung 5-4: Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der Versuchsdurchführung – Mengen-Regelung bei einer Leistungseinstellung des Ventilators von 30 Hz – an der Anlage G 318

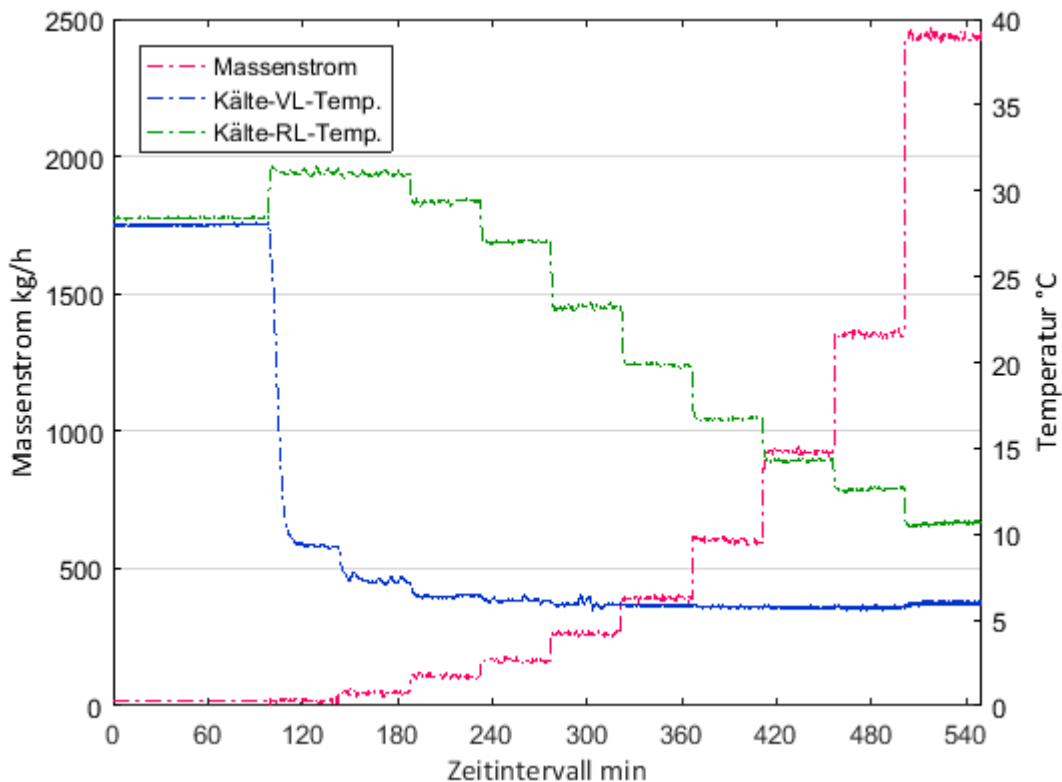


Abbildung 5-5: Ergebnisdarstellung von Temperaturverlauf von Kälte-Vorlauf und Kälte-Rücklauf und Wassermassenstrom der Mengenregelung an der Anlage G 318

Auswertung der Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung der Mengenregelung erfolgt mit einem konstanten Luftvolumenstrom von 1800 m³/h. Der Eingangszustand der Luft liegt bei (32.0 ± 0.1) °C und einer absoluten Feuchte von (12.1 ± 0.5) g/kg (Abbildung 5-4).

Nach dem Öffnen des Durchgangventils (DV), auf 10 % des Stellweges, stellt sich nach kurzer Zeit eine Vorlauftemperatur von rund 9.5 °C ein. Ab einer Öffnung von mindestens 30 % des Stellweges liegt die Vorlauftemperatur bis zum Ende der Versuchsdurchführung bei (5.9 ± 0.1) °C. Der Wassermassenstrom wird bei der Mengenregelung variabel verstellt (Abbildung 5-5).

Bis zur Öffnung des DV von maximal 60 % des Stellweges findet kaum eine Entfeuchtung statt (Änderung des Luftzustandes parallel zu absoluten Feuchte). Daher ist in Abbildung 5-4 zu erkennen, dass die Luft nur gekühlt wird. Die dargestellten Schwankungen in der absoluten Feuchte sind auf die Schwankungen des Eingangszustandes der Luft zurückzuführen. Mit der Umstellung des DV auf 70 % des Stellwegs beginnt eine erkennbare Entfeuchtung, wodurch sich der Luftzustand nach links im Diagramm fortsetzt. Bis zur vollständigen Ventilöffnung und mit nahezu konstanter Vorlauftemperatur des Kaltwassers wird die Sättigungslinie nicht erreicht. Die Versuchsdurchführung erfolgt bei einer Frequenzeinstellung von 30 Hz für den Ventilator. Das entspricht ungefähr der mittleren Einstellung. Daher werden die Messungen bei einer Drehzahl von 20 und 50 Hz für den Ventilator wiederholt. In Abbildung 5-6 ist der Verlauf der Luftzustandsänderung bei einer

Einstellung von 50 Hz abgebildet. Die Versuchsdurchführung bei 20 Hz noch nicht durchgeführt werden. In der Abbildung 5-6 ist zu erkennen, dass auf Grund des größeren Luftvolumenstroms die Luft weniger gekühlt und entfeuchtet werden kann.

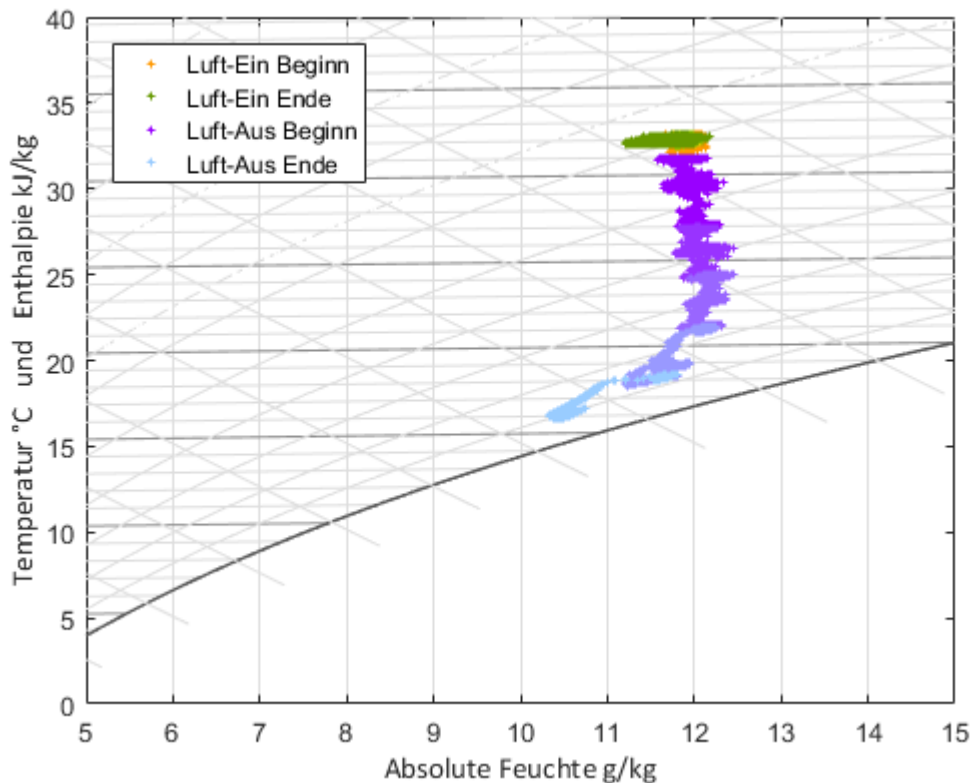


Abbildung 5-6: Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der Versuchsdurchführung – Mengen-Regelung bei einer Leistungseinstellung des Ventilators von 50 Hz – an der Anlage G 318

Der Verlauf der Luftkühlung und -entfeuchtung ist ähnlich zur ersten Versuchsdurchführung, die Sättigungslinie wird nicht erreicht (Abbildung 5-7). Die Ursache begründet sich auf den am Luftkühlern entstehenden Bypass-Effekt – vgl. Abschnitt 4.5.

Bewertung der Leistungsdarstellung

Abbildung 5-8 stellt die Leistungsdarstellung als Kontrollinstrument dar. Die Wärmeaufnahme des Kaltwassers errechnet sich aus Gleichung (5-1).

$$\dot{Q}_W = c_{pW} \cdot \dot{m}_W \cdot (T_{RL} - T_{VL}) \quad (5-1)$$

Der Wärmeaufnahme des Kaltwassers wird die Wärmeabgabe der Luft gegenübergestellt. Die Wärmeabgabe der Luft erfolgt auf Basis der Enthalpiedifferenz (Gleichung 4-12) und der Gleichung (5-2) - bestimmen der Wärmeleistung der Luft.

$$\dot{Q}_L = \dot{V}_L \cdot \rho_L \cdot \Delta h \quad (5-2)$$

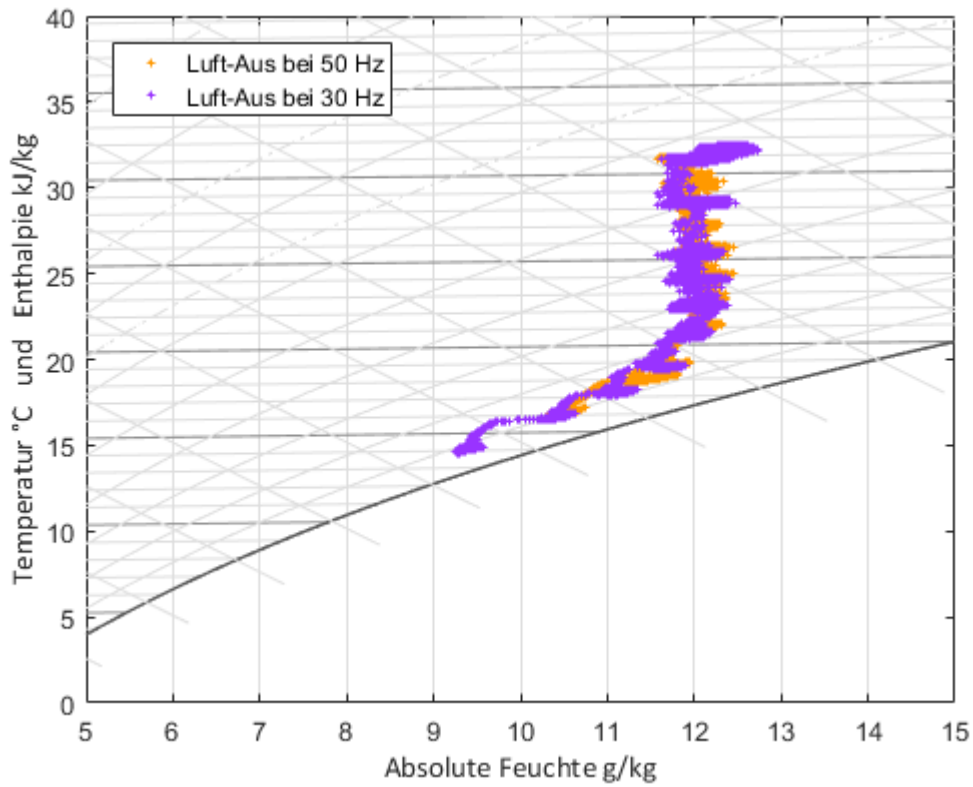


Abbildung 5-7: Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der Versuchsdurchführung – Mengenregelung bei einer Leistungseinstellung des Ventilators von 50 Hz und 30 Hz – an der Anlage G 318

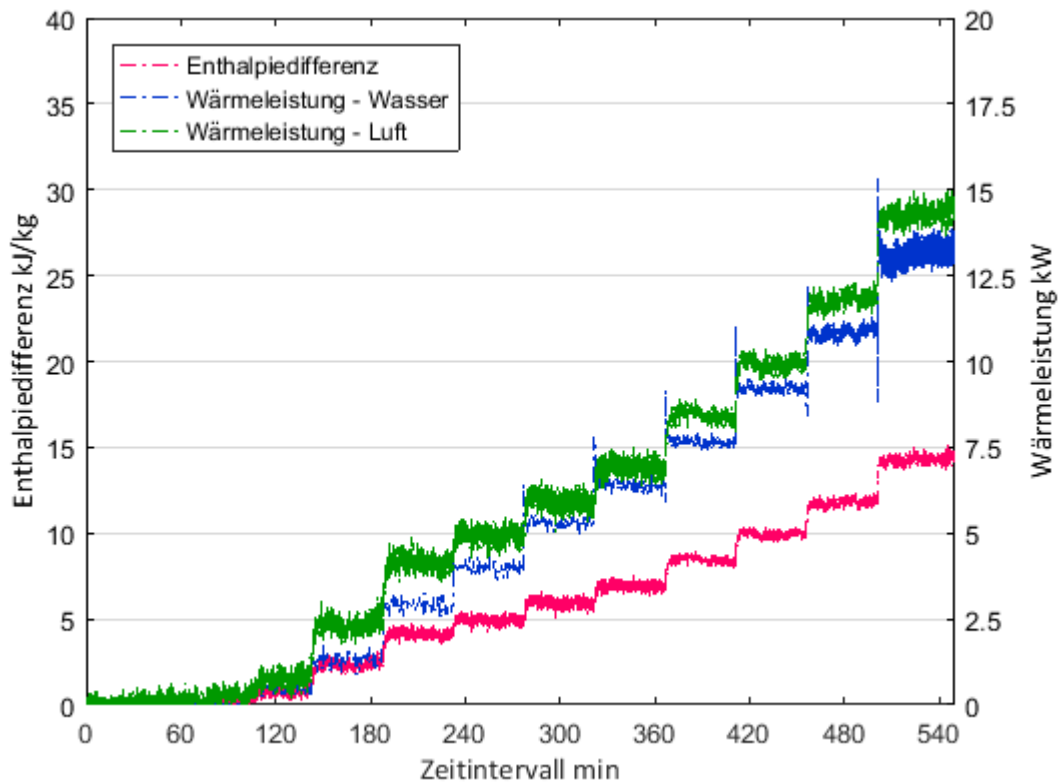


Abbildung 5-8: Ergebnisdarstellung der Leistungsbilanzen und Enthalphiedifferenzen von Eingangs- und Ausgangszustand der Mengenregelung Anlage G 318

Während der Versuchsdurchführung ergibt sich eine Abweichung zwischen der Wärmeabgabe und Wärmeaufnahme. Die Ursache liegt dabei in der unterschiedlichen Genauigkeit der Messgeräte sowie die Bauart und Positionierung dieser. Die verwendeten Sensoren, handelsübliche Messtechnik für RLT-Anlagen, reichen nicht bis in den Hauptstrom. Daher sind geringe Abweichungen bei den Messungen vorhanden.

Zudem erreichen Wärmeübertrager in der realen Anwendungen keine Wirkungsgrade von 100 %. Wird das SLT berücksichtigt, so können Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe nicht deckungsgleich sein.

Vergleich der Mengenregelung – Realer Effekt zur Theorie

In Abbildung 5-9 ist der Verlauf von Lufttemperatur und absoluter Feuchte nach dem Luftkühler dargestellt. Die Beschreibung der Mengenregelung gibt an, dass durch die geringe Vorlauftemperatur sofort ein Teil der Luft entfeuchtet wird. In Abbildung 5-5 ist zu erkennen, dass die Vorlauftemperatur ab ca. 240 Minuten 6 °C beträgt. Auch davor wird die Taupunkttemperatur unterschritten, da die 6 °C aber der übliche Wert in Klimatechnik ist, wird erst ab diesem das Verhalten bewertet. Ab Minute 240 ist jedoch keine deutliche Entfeuchtung festzustellen. Daraus resultieren die Messergebnisse mit einer erkennbaren Entfeuchtung ab der Ventilstellung von mindestens 50 %.

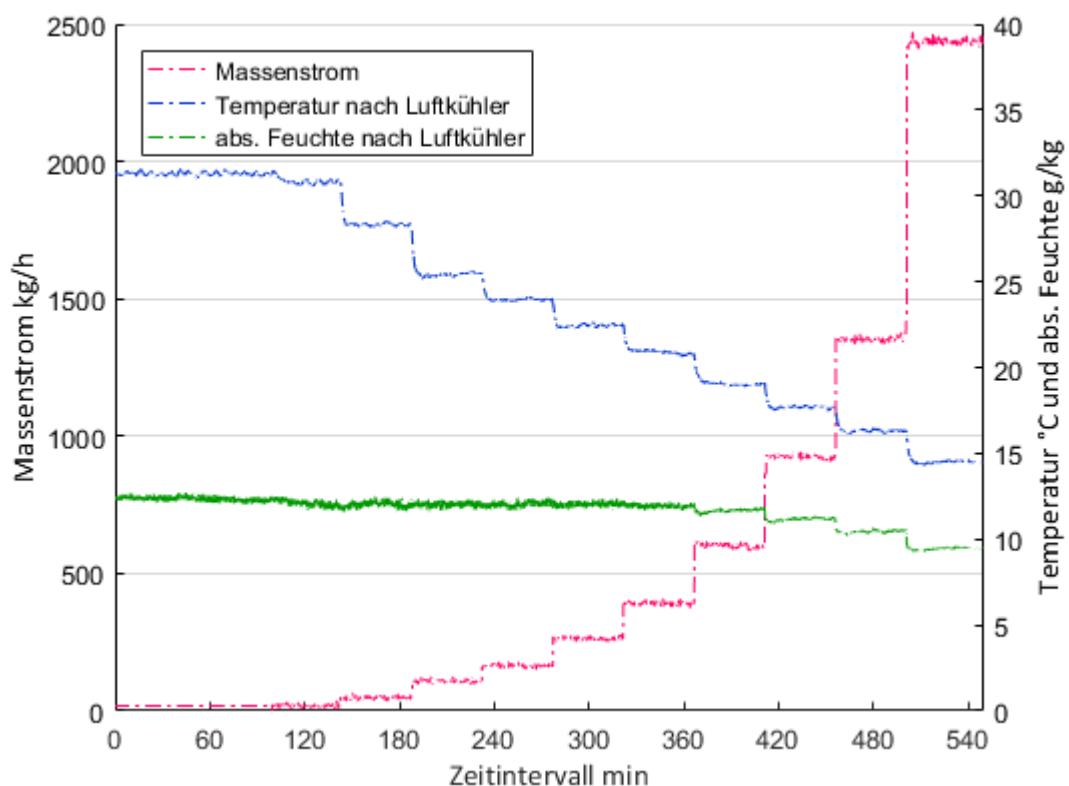


Abbildung 5-9: Ergebnisdarstellung von Temperaturverlauf und Feuchteverlauf (abs. nach dem Luftkühler in Abhängigkeit des Kühlwasser-Massenstromes bei der Mengenregelung an der Anlage G 318

5.1.2.2 Hörsaalanlage Campus Wilhelminenhof

Die RLT-Anlage gehört zum Typ 1 der im Projekt untersuchten Anlagen. Die RLT-Anlage ist eine Teilklimaanlage und versorgt zwei Hörsäle für rund 300 Personen im Gebäude G der HTW Berlin. Die Ansaugung der Außenluft (ODA) für alle RLT-Anlagen im Technikraum K 12 erfolgt zentral. Im Technikraum wird die Luft über das Kanalnetz zu den fünf RLT-Geräten verteilt. Der weitere schematische Anlagen-Aufbau ist in Abbildung 5-10 dargestellt. Im Gegensatz zur RLT-Anlage im Labor kann die eingehende Luft vor dem Luftkühler falls notwendig erwärmt, nicht aber befeuchtet werden. Für vergleichbare Messergebnisse (Verlauf der Kühlung und Entfeuchtung) müssen für die Durchführung einer Messreihe die Außenluftbedingungen vorhanden sein.

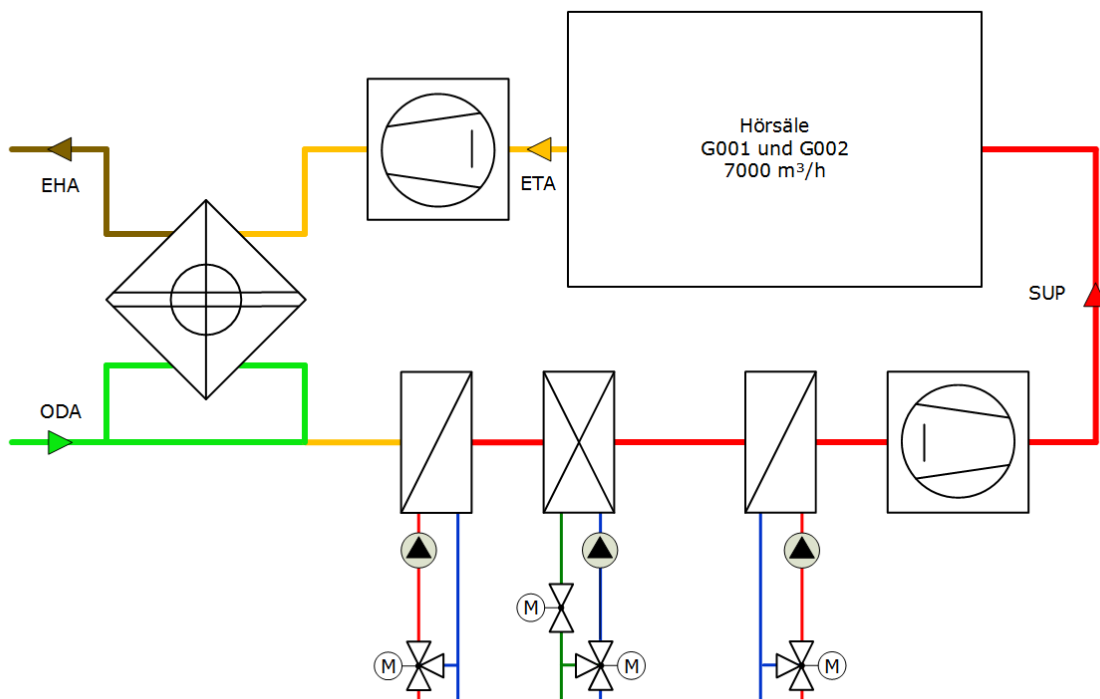


Abbildung 5-10: Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus der Hörsaal-Anlage (K 12) an der HTW Berlin

Für die Versuchsdurchführung wird das DV von 0 bis 100 % mit einer Schrittweite von 10 % geöffnet. Der Luftvolumenstrom ist konstant, der Wassermassenstrom wird dabei variabel eingestellt. Abbildung 5-11 stellt den Verlauf vom Lufteingangs- und Luftausgangszustand dar. Abweichend zur Darstellung der Anlage G 318 sind dem Lufteingangszustand fünf Farben zur besseren Verlaufserkennung zugeordnet. Werte in roter Darstellung bis hin zu Werten grüner Darstellung bilden den Verlauf vom Messbeginn bis zum Messende dar. Die Werte in blauer Darstellung stehen für den Luftausgangszustand.

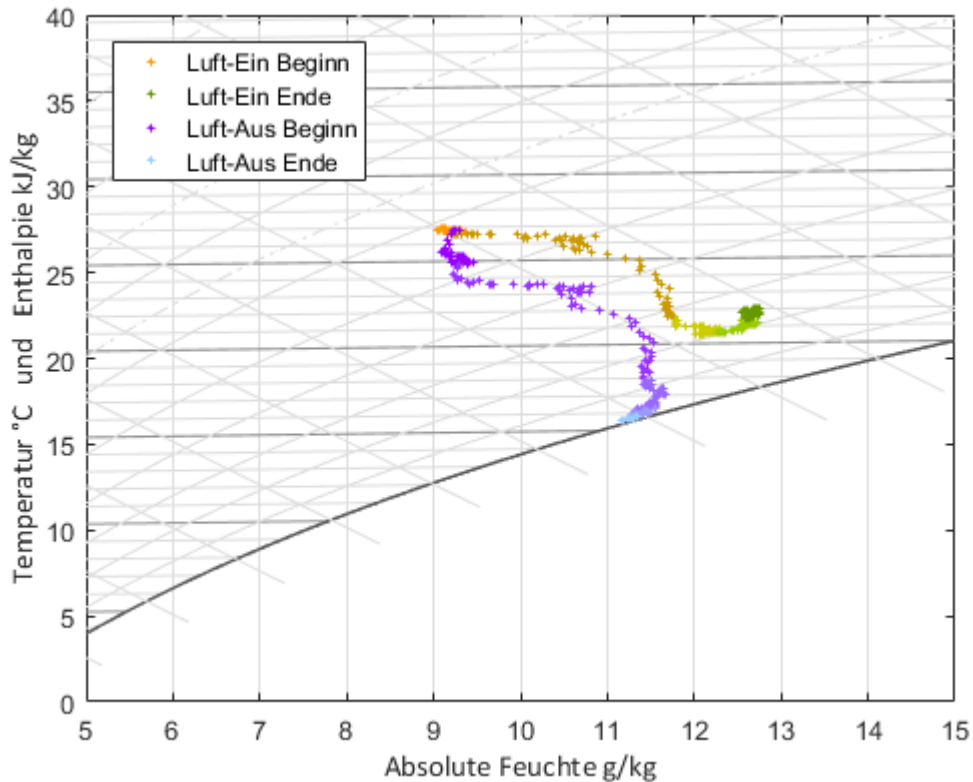


Abbildung 5-11: Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der Versuchsdurchführung – Mengen-Regelung – an der Anlage K 12

Überblick der technischen Daten

In Tabelle 5-4 sind die relevanten technischen Daten der RLT-Anlage K 12 zusammengefasst.

Tabelle 5-4: Zusammenfassung der technischen Daten RLT-Anlage K 12

Beschreibung	Wert	Einheit
Luftvolumenstrom, max.	9000	m ³ /h
Luftkühler:		
Leistung	52.3	kW
Auslegungssystemtemperaturen	6/12	°C
Auslegungsmassenstrom	7500	kg/h

Auswertung der Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung der Mengenregelung erfolgt mit einem konstanten Luftvolumenstrom von 6750 m³/h. Der Eingangszustand der Luft schwankt am Tag der Durchführung sehr stark (Abbildung 5-11, Wertedarstellung in orange nach grün). Die Ursache ist ein Sommergewitter mit deutlichem Anstieg der Luftfeuchtigkeit und Abkühlung der Luft.

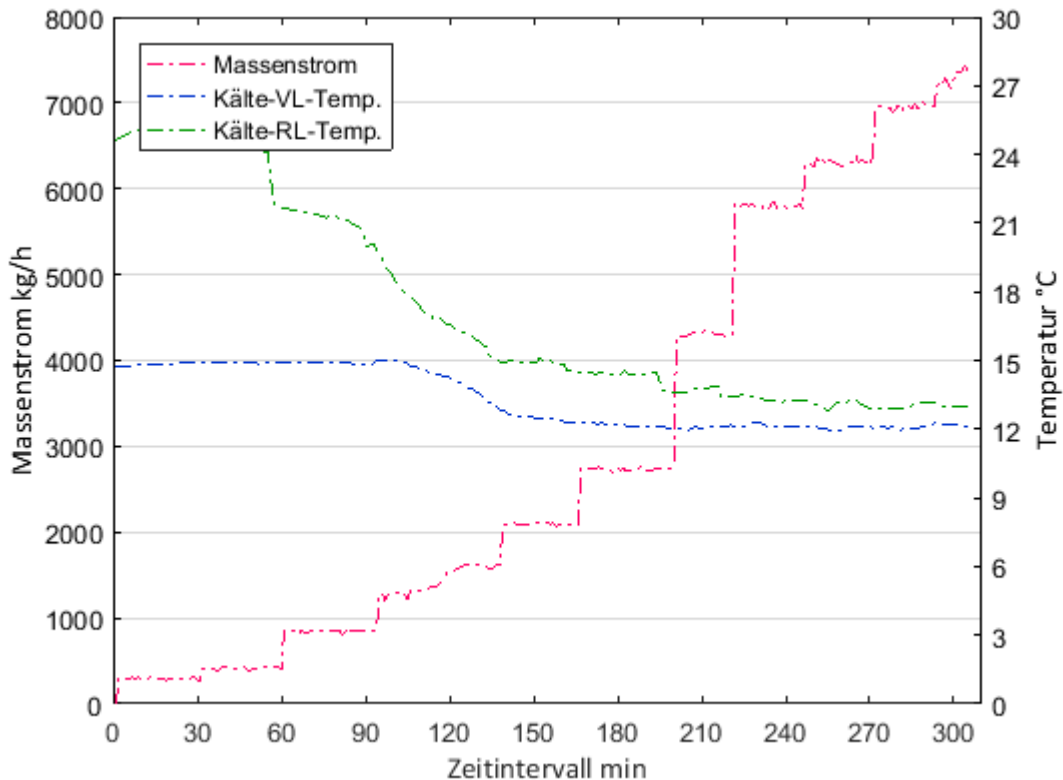


Abbildung 5-12 Ergebnisdarstellung von Temperaturverlauf von Kälte-Vorlauf und Kälte-Rücklauf und Wassermassenstrom der Mengenregelung an der Anlage K 12

Erst ab einer Öffnung von 40 % des Stellweges vom DV sinkt die Vorlauftemperatur des Kaltwassers deutlich unter 15 °C. Ab einer Einstellung von 50 % des DV stellt sich eine relativ konstante Vorlauftemperatur von ca. 12 °C ein und weicht damit um 6 K von der Auslegungstemperatur ab. Auf Grund der hohen Vorlauftemperatur wird die Taupunkttemperatur der eingehenden Luft (Gleichung 4-7) bis zur Mitte der Versuchsdurchführung nicht unterschritten, grafisch dargestellt in Abbildung 5-13. Aus diesem Grund ist zunächst keine Entfeuchtung festzustellen.

Ab Mitte der Versuchsdurchführungen ist im Messwerteverlauf, siehe h,x -Diagramm, ein Kühlungsprozess der Luft erkennbar. Durch den Anstieg der Luftfeuchtigkeit, zurückzuführen auf das Gewitter, auf über 12 g/kg kann trotz hoher Vorlauftemperatur des Kaltwassers eine Entfeuchtung stattfinden. Der Verlauf der Kühlung mit und ohne Entfeuchtung stellt sich ähnlich wie an Anlage G 318 dar, dass zunächst erst eine Kühlung erfolgt und beim Erreichen der Sättigungslinie erst die Entfeuchtung beginnt.

Die Abbildung 5-14 stellt die Enthalpiedifferenz vom Lufteingangszustand zum Luftausgangszustand gegenüber. Daraus kann die Wärmeleistung der Luft zur Wärmeleistung des Wassers bestimmt werden. Es gibt im Endbereich eine Abweichung der Leistungen von rund 6 kW. Diese Abweichung wird in den nächsten Messungen genauer untersucht, und wird zunächst auf Ungenauigkeiten der Messung, wie bisher nicht möglicher Abgleich aller Temperatursensoren und überschlägige Bestimmung des Volumenstromes, zurückgeführt.

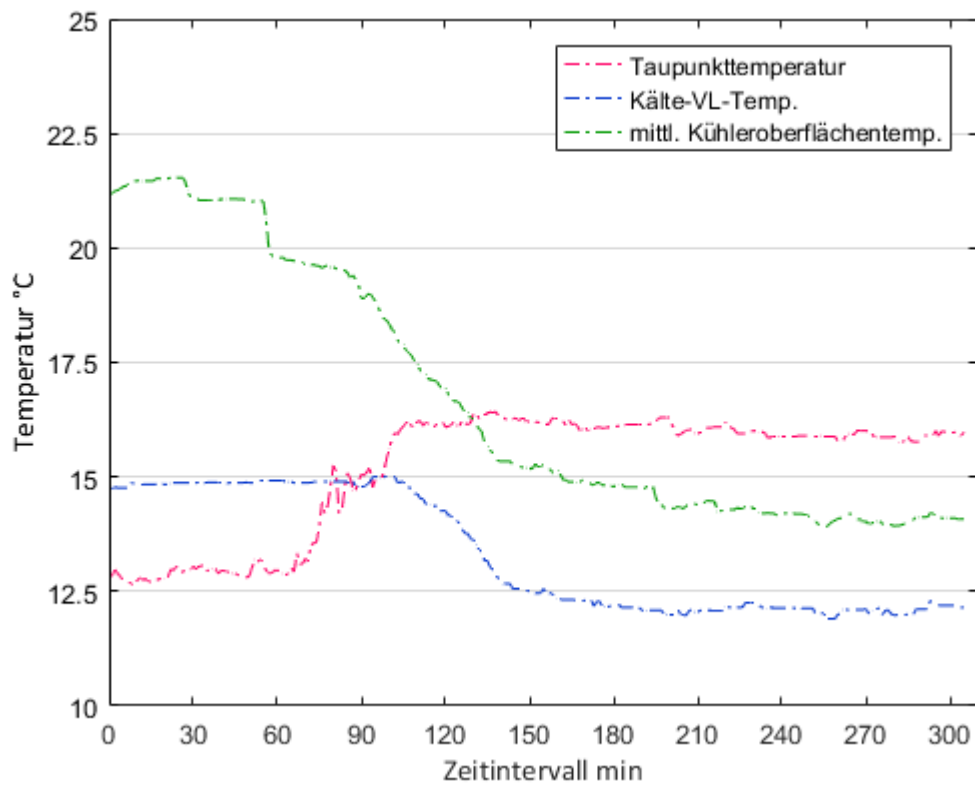


Abbildung 5-13 Darstellung Verlauf der Taupunkttemperatur während der Versuchsdurchführung an der RLT-Anlage K 12

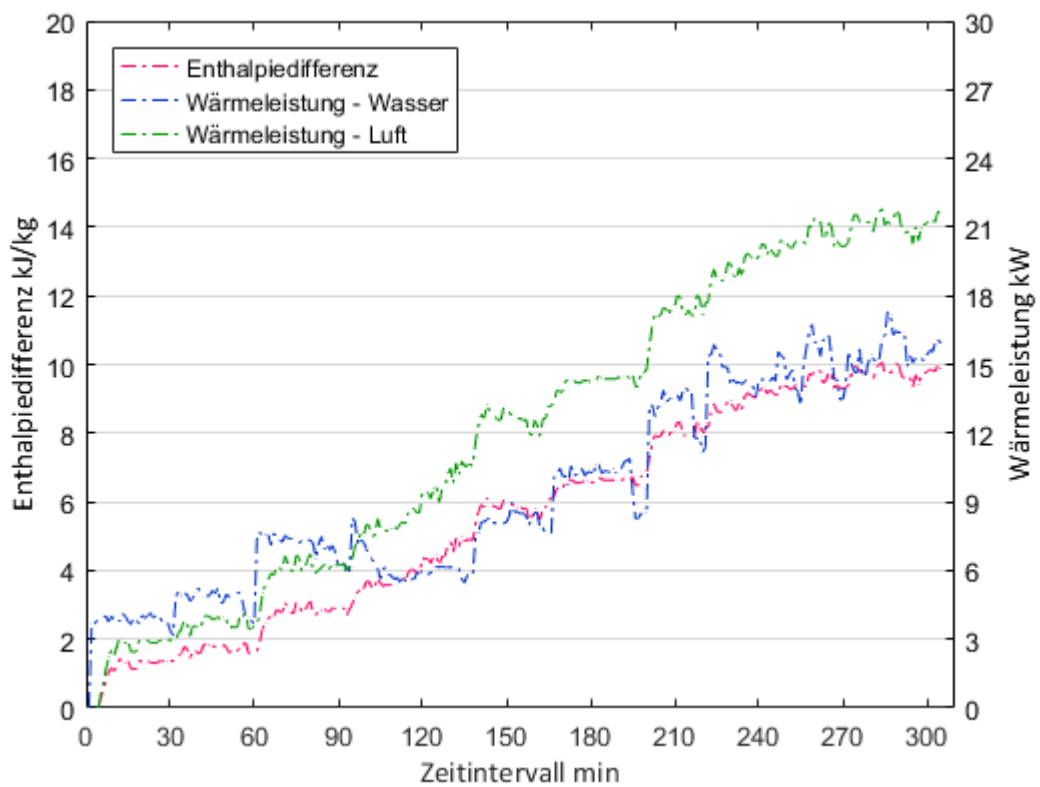


Abbildung 5-14 Ergebnisdarstellung der Leistungsbilanzen und Enthalphiedifferenzen von Eingangs- und Ausgangszustand der Mengenregelung RLT-Anlage K 12

5.1.2.3 RLT-Anlage Campus Charité-Mitte

Die RLT-Anlage der Charité versorgt 2 Zonen. Die Zone 1 übernimmt die Versorgung von Bettenzimmern und kann damit nicht von uns untersucht werden, da der Nutzer dies nicht zulässt. In der Zone 2 werden Büro- und Lagerräumen versorgt.

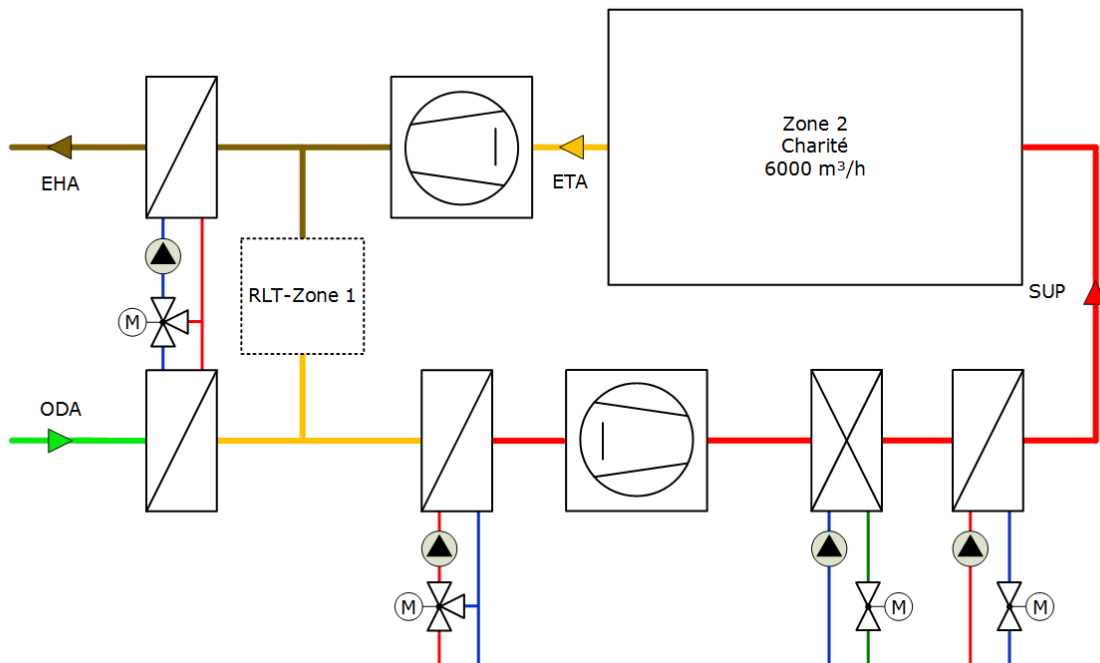


Abbildung 5-15: Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus der Anlage 2 – Dachzentrale Nord – Campus Charité Mitte

Bis zur Erstellung des Berichtes gibt es keine endgültige Entscheidung zur oder gegen die Versuchsdurchführung durch den Nutzer.

Überblick der technischen Daten

In Tabelle 5-5 sind die relevanten technischen Daten der RLT-Anlage der Charité zusammengefasst.

Tabelle 5-5: Zusammenfassung der technischen Daten RLT-Anlage der Charité

Beschreibung	Wert	Einheit
Luftvolumenstrom, max.	6000	m ³ /h
Luftkühler:		
Leistung	55.4	kW
Auslegungssystemtemperaturen	6/12	°C
Auslegungsmassenstrom	7940	kg/h

5.1.2.4 RLT-Anlage im Labor G326

Auf Grund der Verzögerung der Messungen an RLT-Anlagen der Projektpartner wurde zum Ausgleich die RLT-Anlage – Abbildung 5-16 – zur Durchführung von Messungen verwendet. Die Labor-Anlage dient im Regelbetrieb zur Versuchsdurchführung für Studenten. Es handelt sich dabei um eine Teilklimaanlage bestehend aus Luftkühler (Mengen- und Beimischregelung) und einem Ventilator. Der dargestellte Dampfbefeuchter ist mobil und steht nur kurzzeitig für die Messungen zur Verfügung. Die zu behandelnde Luft wird wahlweise über eine Außenluft-Ansaugung (ODA) oder dem Aufstellraum (IDA) entnommen. Die Außenluftbedingungen können nicht gezielt auf einen bestimmten Luftzustand eingestellt werden. Die Luft aus dem Aufstellraum kann zusätzlich befeuchtet und/oder erwärmt werden. Eine genaue Einstellung auf einen Luftzustand ist nicht möglich.

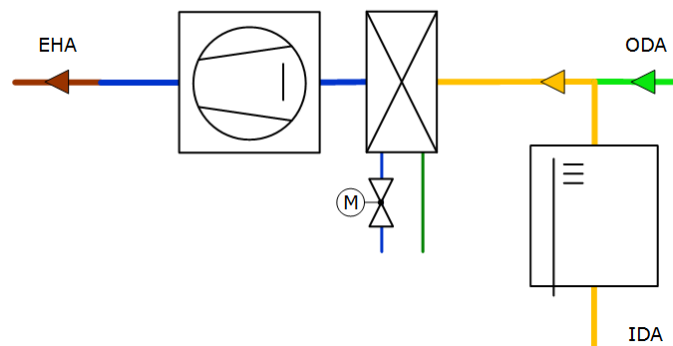


Abbildung 5-16: Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus der Anlage WH G 326 – Kühlanlage im Labor der HTW Berlin

Durch Verstellung eines DWV 0 bis 90 ° wird eine Versuchsdurchführung „Mengenregelung“ durchgeführt.

Überblick der technischen Daten

In Tabelle 5-6 sind die relevanten technischen Daten der RLT-Anlage G 326 zusammengefasst.

Tabelle 5-6: Zusammenfassung der technischen Daten RLT-Anlage G 326

Beschreibung	Wert	Einheit
Luftvolumenstrom, max.	1500	m ³ /h
Luftkühler:		
Leistung	7.3	kW
Auslegungssystemtemperaturen	6/12	°C
Auslegungsmassenstrom	1050	kg/h

Auswertung der Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung der Mengenregelung erfolgt mit einem konstanten Luftvolumenstrom von zunächst 470 m³/h. Die eingehende Luft wird aus einem Raumverbund G 326 – G 327 – G 328 verwendet. Der Eingangszustand der Luft schwankt sehr stark (Abbildung 5-17, Wertedarstellung in orange nach grün). Die Ursache ist die Erhöhung der Luftfeuchtigkeit durch das Verdampfen von Wasser mit Kochtöpfen.

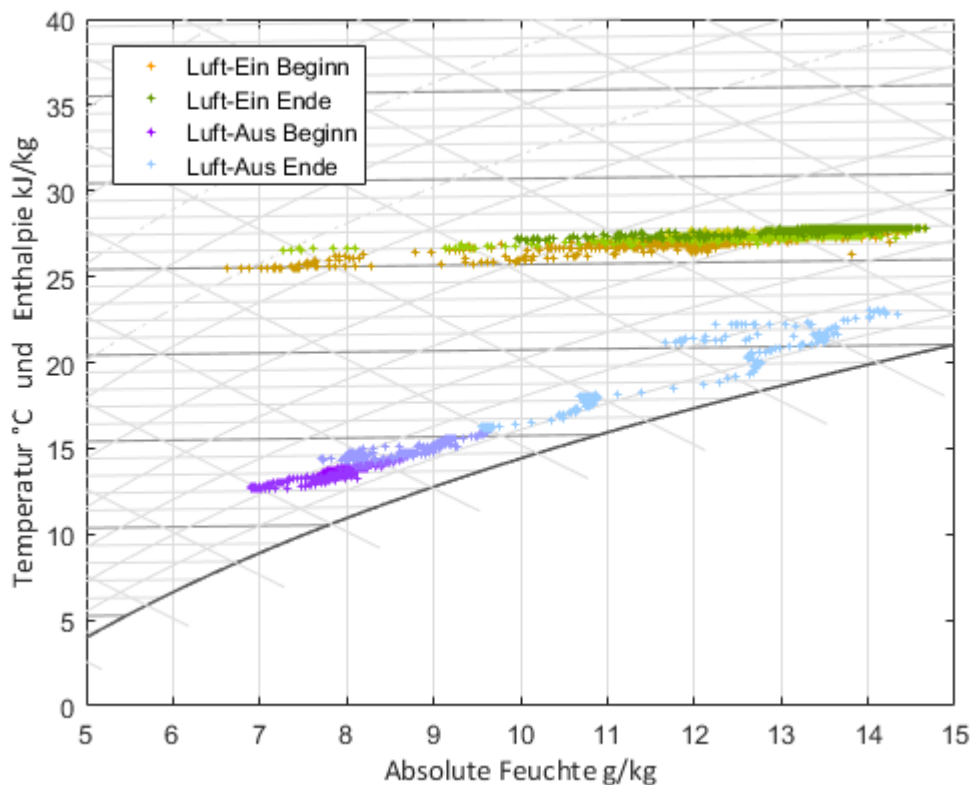


Abbildung 5-17: Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der Versuchsdurchführung – Mengenregelung mit Ventileinstellung von 100 bis 0 %– an der Anlage G 326

Die Reihenfolge der Versuchsdurchführung wird wie folgt gewählt – DWV Schließen und anschließend DWV öffnen. Insgesamt stellt sich heraus, dass sich die gewählte Reihenfolge als ungünstig erweist. Die Trocknung des Luftkühlers führt zu einer großen Unterbrechung der Messungen. Weiterhin kann mittels Kochtöpfen keine gleichmäßige Dampferzeugung erzielt werden.

Für eine weitere Messung wird ein Dampfbefeuchter auf ein mobiles Gestell montiert und kann somit zur Erhöhung der Luftfeuchte verwendet werden. Bei einem Luftvolumenstrom von rund 710 m³/h wird die Versuchsdurchführung mit einer Mengenregelung und der Öffnung des DWV erneut durchgeführt. Die Lufteingangs- und Luftausgangszustände sind in Abbildung 5-19 dargestellt. Der Zustand der eingehenden Luft schwankt weiterhin sehr stark. Trotz der Schwankung zeigt sich der Verlauf des Luftzustandes nach dem Luftkühler ähnlich wie in den Messungen der anderen RLT-Anlagen. Zunächst findet eine Luftkühlung ohne Entfeuchtung statt und mit Annäherung an die Sättigungslinie tritt die Entfeuchtung ein.

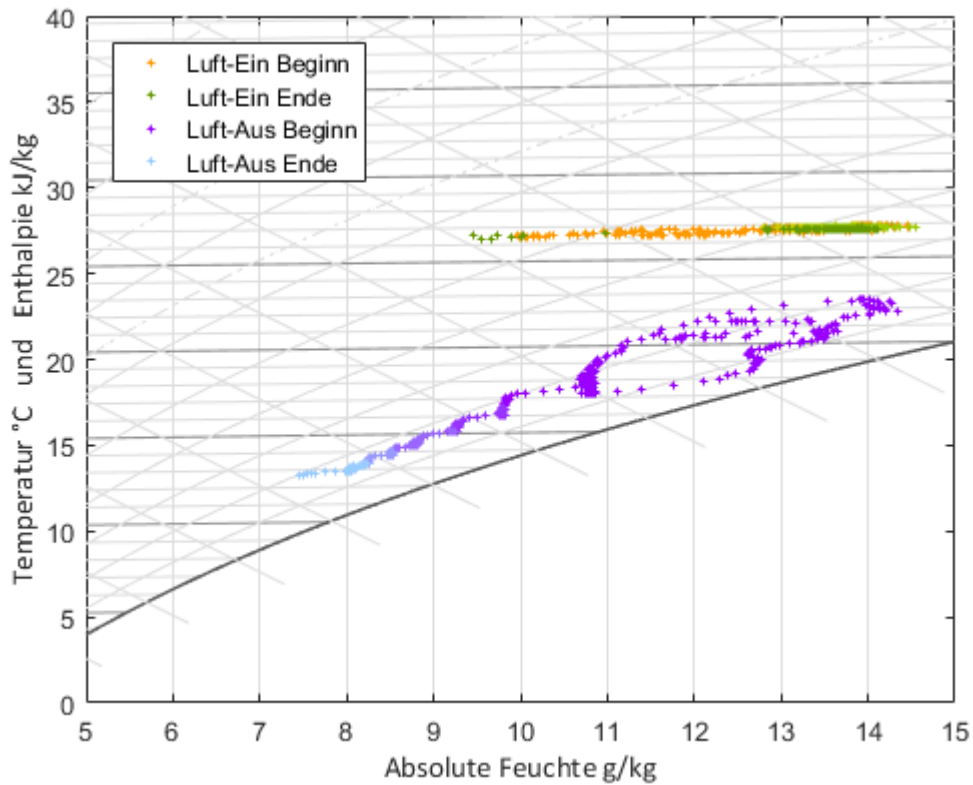


Abbildung 5-18 Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der Versuchsdurchführung – Mengen-Regelung mit Ventileinstellung von 0 bis 100 %– an der Anlage G 326

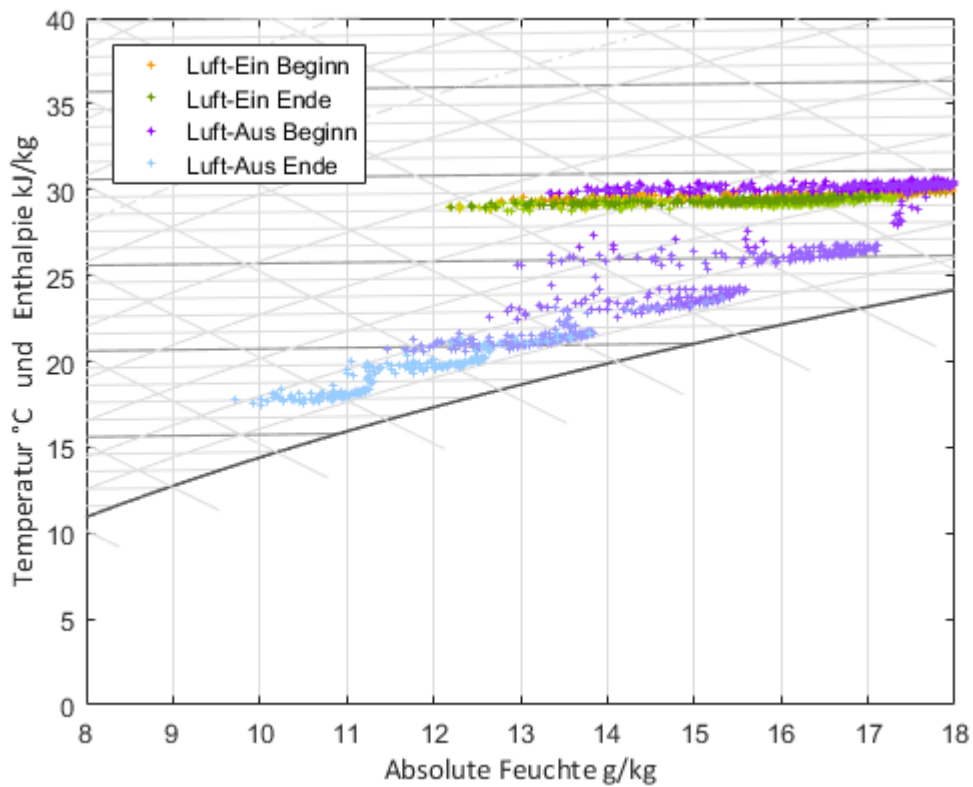


Abbildung 5-19 Ergebnisdarstellung im h,x-Diagramm der dritten Versuchsdurchführung – Mengen-Regelung mit Ventileinstellung von 0 bis 100 %– an der Anlage G 326

5.1.2.5 RLT-Anlage im Raum G329

Im Gebäude G der HTW Berlin wird für ein neues Labor eine Lüftungsanlage installiert. Die Inbetriebnahme wird im September 2017 erfolgen. Die Lüftungsanlage ist eine Vollklimaanlage mit mengengeregeltem Luftkühler (Abbildung 5-20). Sie wird nach der Projektdefinition dem Anlagentyp 1 zugeordnet. Mit dem Betreiber ist bereits abgesprochen, dass nach Inbetriebnahme die Möglichkeit besteht, Messungen im Rahmen des Projektes OpReeBeK² durchzuführen. Die Messungen sind derzeit als Ersatz zur Anlage der Charité geplant und werden Ende des Jahres abgeschlossen sein. Die Übersicht der technischen Daten erfolgt in Tabelle 5-7.

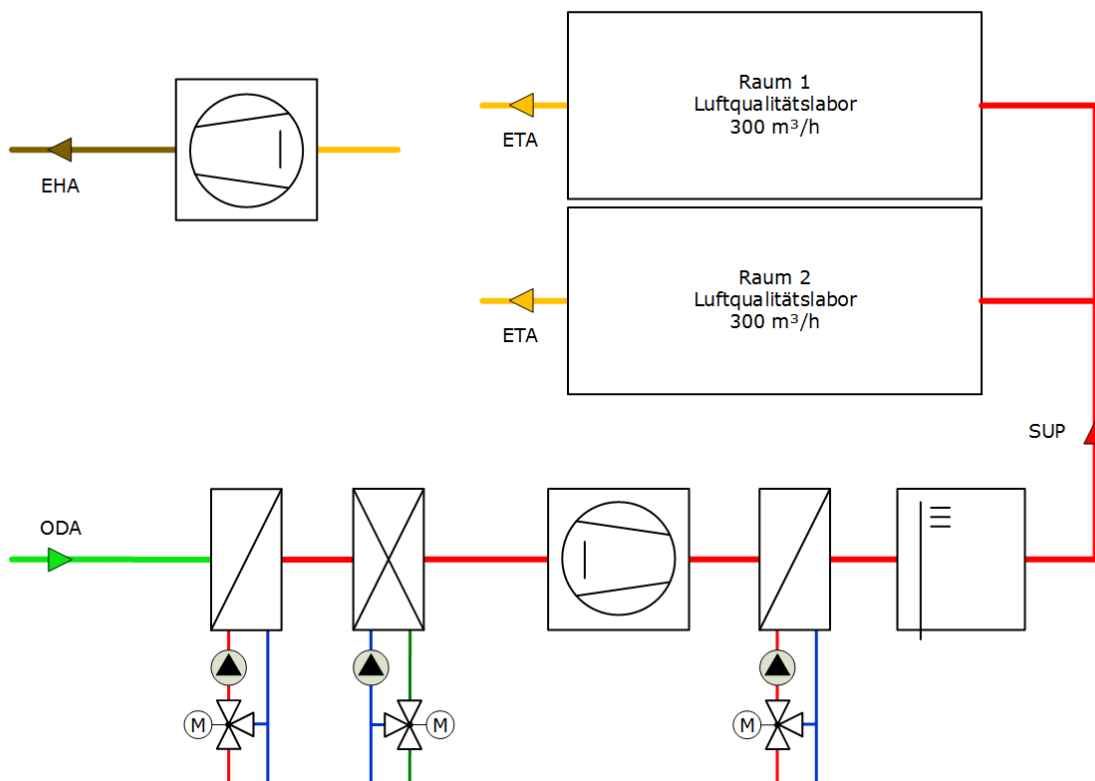


Abbildung 5-20: Schematische Darstellung des Aufbaus der Anlage WH G 329 – Klimaanlage für ein Versuchs-Labor der HTW Berlin

Tabelle 5-7: Zusammenfassung der technischen Daten RLT-Anlage G 329

Beschreibung	Wert	Einheit
Luftvolumenstrom, max.	600	m ³ /h
Luftkühler:		
Leistung	6.8	kW
Auslegungssystemtemperaturen	6/12	°C
Auslegungsmassenstrom	980	kg/h

5.2 Ist-Stand Arbeitspaket 2

Umbau und Aufrüstung der Laboranlage G318 mit einem Luftbypass (AP 2)

Die Übersicht der Projektplanung zum AP 2 wird im Abschnitt 3.2 erläutert.

5.2.1 Aufgabenstellung

Die Erweiterung der Regelungsstrategie beinhaltet zwei Bausteine. Diese werden im Arbeitspaket 2 praktisch erarbeitet und stellen die Grundlage für die Reglerentwicklung im nachfolgenden Arbeitspaket dar. Der erste Baustein ist die Anbindung der RLT-Anlage im Raum G 318 an 3 Räume. Im Vorprojekt haben Dampfbefeuchter und Kaltwassersatz, sowie das geringe Raumvolumen dazu geführt, dass der eingehende Luftzustand in die Anlage jede Störung mitgeführt hat. Dadurch kam es zu regelmäßigen Schwankungen die in Versuchsmessreihen unerwünscht sind. Der zweite Baustein ist die Umsetzung des fortzuführenden Konzeptes nach Ansatz A oder B.

5.2.2 Aktueller Stand

Anbindung der RLT-Anlage an drei Labor-Räume

Zum Ende des Projektes soll ein Mehrgrößen-Regler einen vorgegebenen Luftzustand im Raum herstellen und halten können. Dazu ist es notwendig reale Räume mit realen Störgrößen in die Versuchsdurchführung einzubinden. Deshalb werden drei Laborräume mit einem Raumvolumen von insgesamt ca. 800 m³ an die RLT-Anlage G 318 angeschlossen. Die Vorplanung für den Anschluss ist abgeschlossen. Der Entwurf – Abbildung 5-21 – ist bei der Bauverwaltung der HTW Berlin eingereicht und im Juli 2017 genehmigt worden. Damit erfolgt jetzt im nächsten Schritt die Ausführungsplanung. Die drei Labore werden nach Fertigstellung der Baumaßnahmen mit Zuluft versorgt, die Abluft wird ebenfalls über den Abluftpart der Anlage abgeführt.

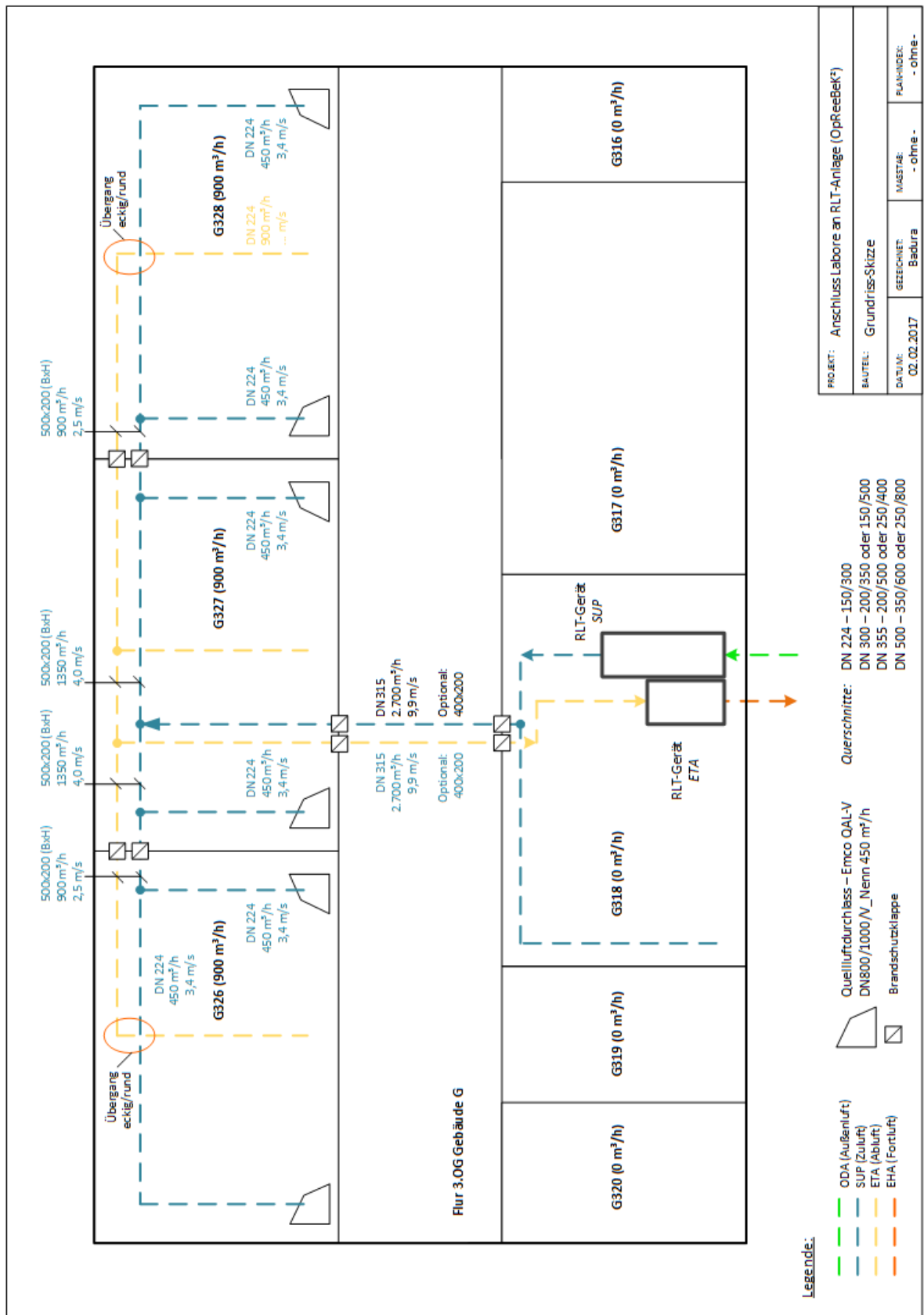


Abbildung 5-21: Vorplanung Anschluss von drei Laborräumen an die RLT-Anlage G 318 zur Weiterentwicklung des Reglers

Umsetzung des Konzeptes nach Ansatz A oder B

Die bisher durchgeführten Untersuchungen an den RLT-Anlagen und Simulationen haben gezeigt, dass die Mengenreglung einen ähnlichen Verlauf bei der Entfeuchtung zeigt, wie die Beimischschaltung. Bei Ventilstellungen unterhalb 50 % des Stellweges kommt es hauptsächlich erst zur Kühlung der Luft. Erst bei Ventilöffnungen größer 50 % ist eine Entfeuchtung deutlich erkennbar. Ein Grund dafür ist der Aufbau des Luftkühlers. Mit jeder hintereinandergeschalteten Rohrreihe im Luftkühler ändert sich die Taupunkttemperatur, die abhängig von Lufttemperatur und Feuchtegrad ist. Dem gegenüber steht die mittlere Temperatur der Kühleroberfläche pro Rohrreihe. Dem Entsprechend sind die Differenzen zwischen den Temperaturen sehr gering und ein deutlicher Effekt bleibt aus. Ein weiterer Grund ist der bereits beschriebene Bypass-Effekt. Das direkte Erreichen eines zuvor definierten Luftendzustandes scheint, über eine kombinierte hydraulische Schaltung, nicht möglich zu sein.

Aus diesem Grund wird der Ansatz B im Projekt OpReeBeK² fortgeführt.

Nach AP 2/MS 5a beginnt die Planung und Auslegung des Luftbypasses im Juli 2017. Diese Planung ist bereits im Juni 2017 abgeschlossen. Wir konnten 4 Studenten dazu begeistern, ihre Semester-Projektarbeit für OpReeBeK² zu verwenden. Notwendige zeitintensive Maßnahmen wie Bauantrag an die Bauverwaltung der HTW stellen sowie erarbeiten der Materialbestellungen sind bereits abgeschlossen. Dadurch sehen wir einen zeitgerechten Baubeginn im August 2017.

Planung und Durchführung Bau des Luftbypasses

Die Bau-Planung für den Luftbypass an der Laboranlage G 318 ist abgeschlossen. Der Ausgangszustand ist der Anlagenaufbau der Laboranlage G318. Abbildung 5-22 zeigt eine Draufsicht des aktuellen Anlagenaufbaus. Die Aufstellung der Abluftanlage direkt neben der Zuluftanlage führt zu einem sehr geringen Platzangebot für den Luftbypass. Aus den erarbeiteten Planungsvarianten 1 und 2 – siehe Abbildung 5-23 und Abbildung 5-24 – wird die Abluftanlage versetzt. Dann wird ein Bypass aus Formteilen mit einer Bypassklappe montiert. Die Planungsvariante 1 sieht dabei nur eine Klappe im Aufbau vor. Erste Berechnungen zeigen, dass sich dadurch ein Leckage-Strom über den Lufterhitzer ergeben wird. Die Funktion dieser Variante wird bereits in Matlab-Simulink modelliert.

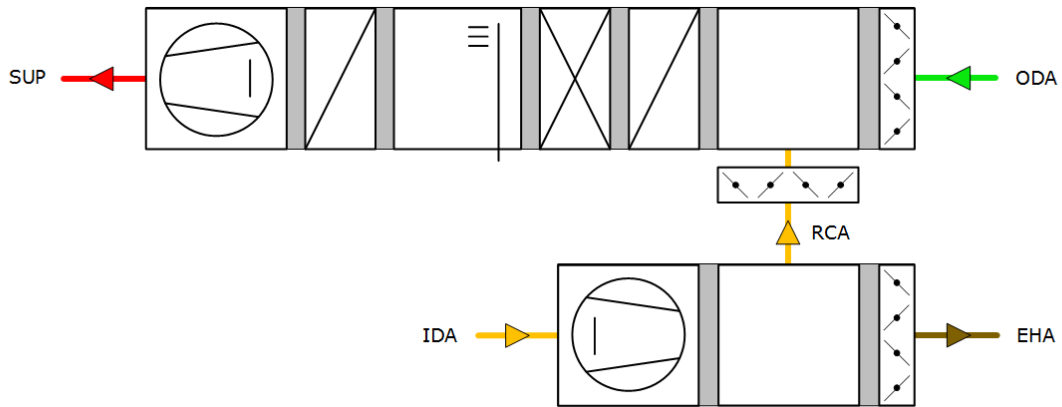


Abbildung 5-22: Draufsicht des aktuellen Anlagenaufbaus der RLT-Anlage ohne Simulationseinheit im Labor G318

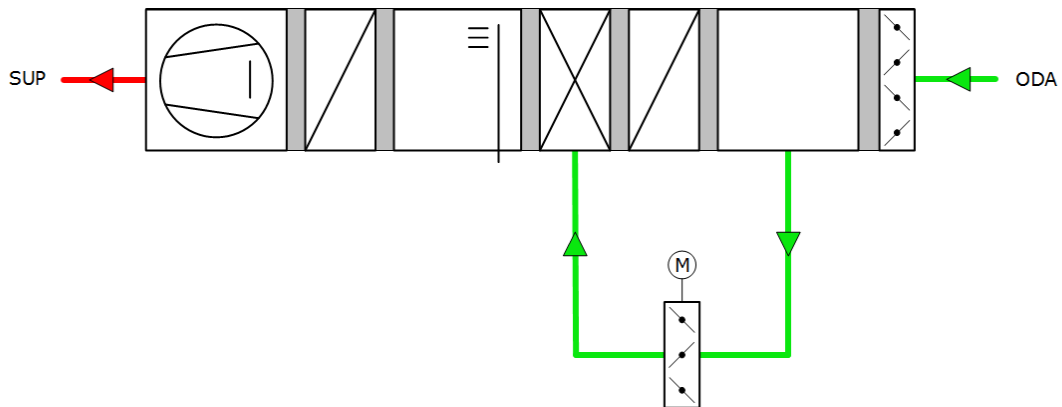


Abbildung 5-23: Planungsvariante 1 für den Bau Luft-Bypass, ebenfalls Vorlage für die Matlab-Simulink-Modellierung

Ergibt sich ein zu großer Leckagestrom über den Wärmeübertrager, kann kurzfristig die Planungsvariante 2 zum Einsatz kommen. Diese sieht eine zweite Klappe vor, die im Pfad des Luftkühlers montiert wird.

Erstellung der Simulation Luftbypass

Parallel zur Bauplanung des Bypasses wird in Matlab-Simulink die Anlage nachgebildet. Dazu wurde ein Modulpaket zur Simulation von RLT-Anlagen im Studiengang und Projekt OpReeBEK² beschafft. Dieses Modulpaket bildet aktuell die Grundlage für die bisher durchgeführten Simulationen. Die Module beinhalten Modelle vieler Bauteile von RLT-Anlagen. Dazu gehören Ventilator, Luftkühler, Wärmeübertrager, Kanäle und Verzweigungen. Alle Komponenten sind zueinander kompatibel und lassen sich zu komplexen Anlagen zusammenschalten. In jeder Komponente wird das strömungstechnische und hygri sche Verhalten berücksichtigt um die Vorgänge in Lüftungssystemen nachzubilden. Die bereits nachgebildeten Anlagenteile und Simulationsergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

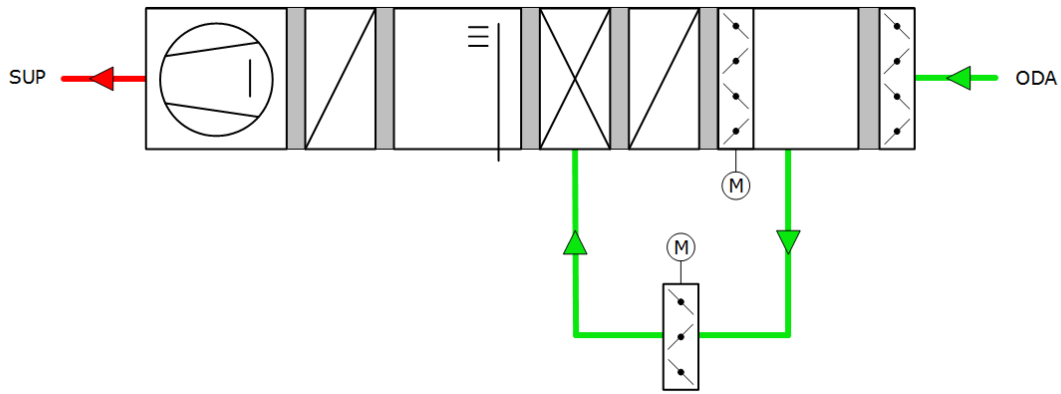


Abbildung 5-24: Planungsvariante 2 für den Bau Luft-Bypass, mit zusätzlicher Klappe im Strömungspfad über den Luftkühler

Abbildung 5-25 zeigt die zu berücksichtigenden RLT-Anlagenteile. Die Modellbildung besteht aus der Luftansaugung, der Luftausströmung, dem Anlagengehäuse und dem Ventilator (Abbildung 5-26). Für die Wärmeübertrager in der RLT-Anlage wurden die bekannten Druckverlustbeiwerte verwendet. Fehlende Werte wurden durch die Verwendung von entsprechenden Zeta-Werten berücksichtigt. Zudem sind in Abbildung 5-26 die für eine Simulation notwendigen Parameter dargestellt.

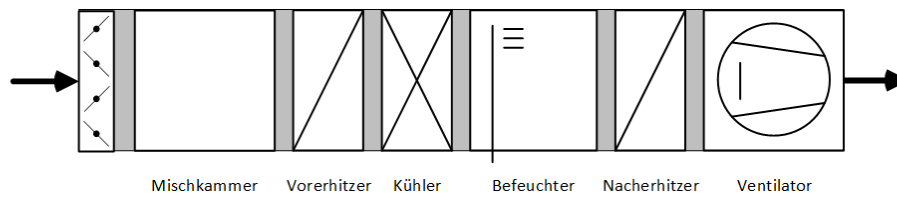
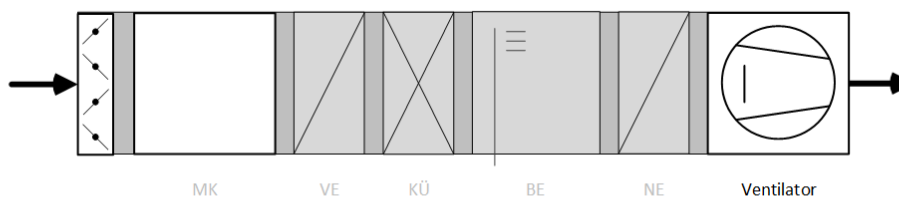


Abbildung 5-25: Ausgangslage der Anlage G 318 (Aufbau gespiegelt dargestellt) zur Modellbildung



Konstante Eingangsparameter	Variable Eingangsparameter	Simulationsergebnisse
Δp_{ODA} $\Delta p_{Gehäuse}$	f	\dot{V}_A
Δp_{VE} $\Delta p_{KÜ}$ Δp_{NE} Δp_{SUP}		

Abbildung 5-26: Erstes Modell der RLT-Anlage G318 mit Luftansaugung, Ventilator und Luftausströmung

Eine von der RLT-Anlage in G 318 bestimmte Kennlinie der Betriebspunkte von Ventilator und Anlage wird durch die schrittweise Erhöhung der Frequenz aufgenommen. Die Werte werden dann in das Matlab-Modell eingelesen und mit der simulierten Betriebskennlinie verglichen. Nach Anpassung von einigen Parametern, wie eingestellten Druckverlusten,

ergibt sich eine gute Annäherung zwischen aufgenommener und simulierter Kennlinie – Abbildung 5-27.

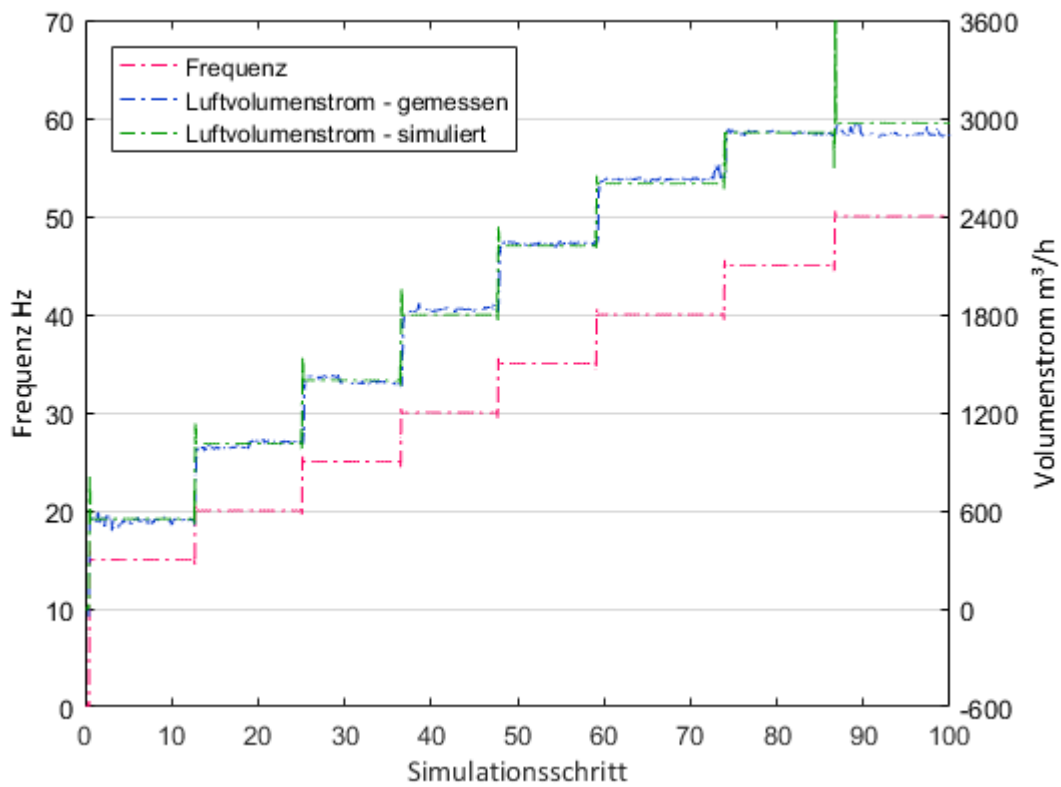


Abbildung 5-27: Vergleich des Simulationsergebnisses Luftvolumenstrom gemessen (blaue Linie) zu Luftvolumenstrom simuliert (grüne Linie)

Als nächster Schritt wird das Modell um einen Luft-Wasser-Wärmeübertrager mit Berücksichtigung der Kondensation von Wasserdampf an Oberflächen in das Modell integriert. Abbildung 5-28 zeigt den verwendeten Anlagenaufbau schematisch und die berücksichtigten Parameter. Die Überprüfung der aufgenommenen zur simulierten Betriebskennlinie für den Luftvolumenstrom zeigt weiterhin eine gute gegenseitige Annäherung. Daraufhin folgt eine Überprüfung zwischen der aufgenommenen Kennlinie des Kühlers von Anlage G318 zur simulierten Kennlinie im Matlab-Simulink-Modell.

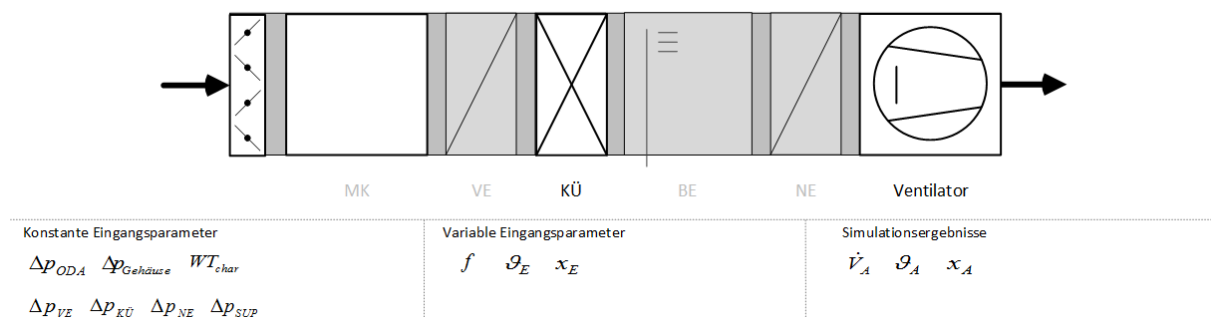


Abbildung 5-28: Erweiterung des Simulationsmodells der Anlage G 318 durch einen WT

Beide Kennlinien liegen dicht beieinander, so dass der Aufbau des Luftbypasses im Modell fortgeführt. Die Validierung des Luftbypass-Modells beschränkt sich auf die Überprüfung des Volumenstroms über den Wärmeübertrager bei geschlossenem Bypass. Die Simulation führt zunächst zur Überprüfung der folgenden Annahmen zum Verhalten am Bypass.

- Nahe des Eingangszustandes wird eine Regelung nicht möglich sein – da das Massenstromverhältnis der Luft nicht ausreichend sein wird.
- Desto geringer der Druckverlust über den Bypass, desto weniger ist eine zweite Klappe im Wärmeübertrager-Pfad notwendig
- Die Verwendung einer großen Klappe wird zu einem kleinen Regelbereich führen, da der Druckverlust gegenüber dem Wärmeübertrager schnell abnimmt

Der Simulation des Wärmeübertrager folgt die erste Parametrierung des Luft-Bypasses auf Basis der Planungsvariante 1. Dabei wird die Nennweite so groß wie möglich ausgelegt. Die Parameter und der Anlagenaufbau werden in Abbildung 5-29 dargestellt.

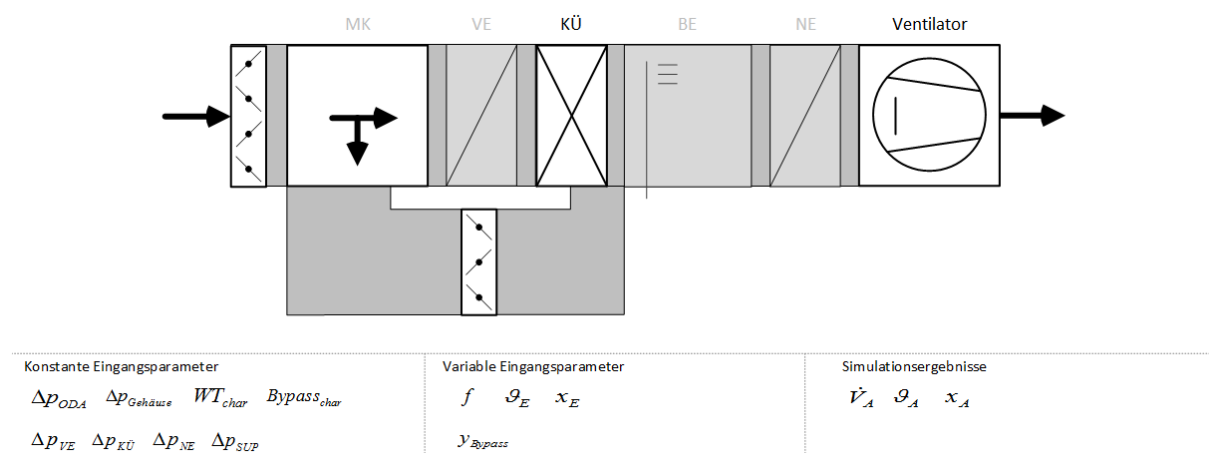


Abbildung 5-29: Erweiterung des Simulationsmodells der Anlage G 318 durch einen Luft-Bypass

Bei konstanter Frequenz zum Ventilator wird die Bypassklappe schrittweise geöffnet. Der Verlauf der Volumenstromaufteilung ist in Abbildung 5-30 dargestellt. Bei 2900 m³/h Eingangsvolumenstrom stellt sich eine Leckage über den Bypass von ca. 50 m³/h ein. Dieser Wert wird für die weiteren Simulationen toleriert. Bei vollständig geöffneter Bypassklappe beträgt der Volumenstrom über den Bypass rund 2350 m³/h. Über den Wärmeübertrager fließt ein Rest von rund 800 m³/h. Damit ergibt sich ein Gesamtvolumenstrom von 3150 m³/h der höher liegt als bei geschlossener Klappe. Das Verhalten erklärt sich zunächst in der Annahme, dass der Gesamtdruckverlust der RLT-Anlage durch den Bypass abnimmt. Zur Kontrolle wird eine weitere Simulation mit geschlossener Bypassklappe und reduziertem Zeta-Wert ersatzweise für den Vor- und Nacherhitzer durchgeführt. Die Reduzierung ergibt eine Minderung des Druckverlustes um 200 Pa über die Wärmeübertrager. Das Ergebnis – Abbildung 5-30 „VS-Reduzierter Druckverlust“ – führt ebenfalls zum Anstieg des Gesamtvolumenstromes auf rund 3150 m³/h. Damit wird die getroffene Annahme bestätigt. Ein Versuch an der realen Anlage ist auf Grund der fest verbauten Wärmetauscher nicht möglich.

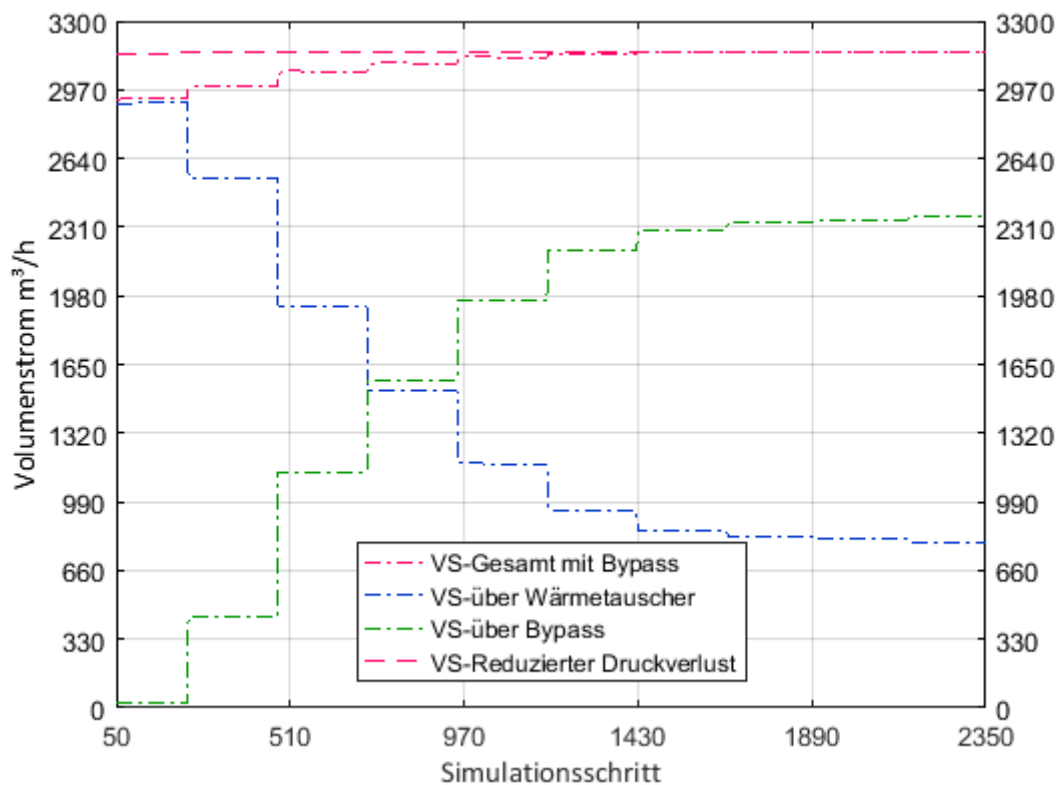


Abbildung 5-30: Darstellung der Simulationsergebnisse zum Verhalten des Volumenstromes bei Öffnung der Bypassklappe, zusätzlich Darstellung des Volumenstromes bei geschlossener Klappe und reduziertem Druckverlust in der RLT-Anlage

Die folgende Simulation stellt eine Kombination aus Mengenregelung und Luftbypass dar. Anhand der Ergebnisse des Modells wird überprüft, ob der Behaglichkeitsbereich im h,x -Diagramm durch diese Kombination erreicht werden kann. Die Kombination ergibt sich aus Anwendung der Mischgleichungen 4-16f mit Simulationswerten (Luftzustände bei steigenden Luftvolumenstrom über den Luftkühler, Änderung der Ventilstellung des Durchgangsventils). Den Ergebnissen in Abbildung 5-31 wird ein maximaler Luftvolumenstrom von 2500 m³/h zugrunde gelegt. Zu erkennen ist, dass mit dem erstellten Modell durchaus ein Abschnitt des Behaglichkeitsbereiches zu erreichen ist.

Effektiv wird der Behaglichkeitsbereich nur bei einem Luftvolumenstrom über den Luftkühler von 600 m³/h bis 1500 m³/h erreicht. Daraus folgt, dass in diesem Bereich die Einstellung des Luftvolumenstroms über die Bypassklappe sehr genau möglich sein muss.

Im Umkehrschluss zeigt sich jedoch bereits das Potential für den Einsatz der Bypassklappe. Ist für die Bereitstellung eines vorgegebenen Luftwechsels zum Beispiel ein Luftvolumenstrom von 2500 m³/h notwendig, so wird bei einer herkömmlichen Anlage der gesamte Luftvolumenstrom gekühlt und entfeuchtet und anschließend nacherhitzt. Die Luftbehandlung von 1250 m³/h könnte dabei auch ausreichend sein.

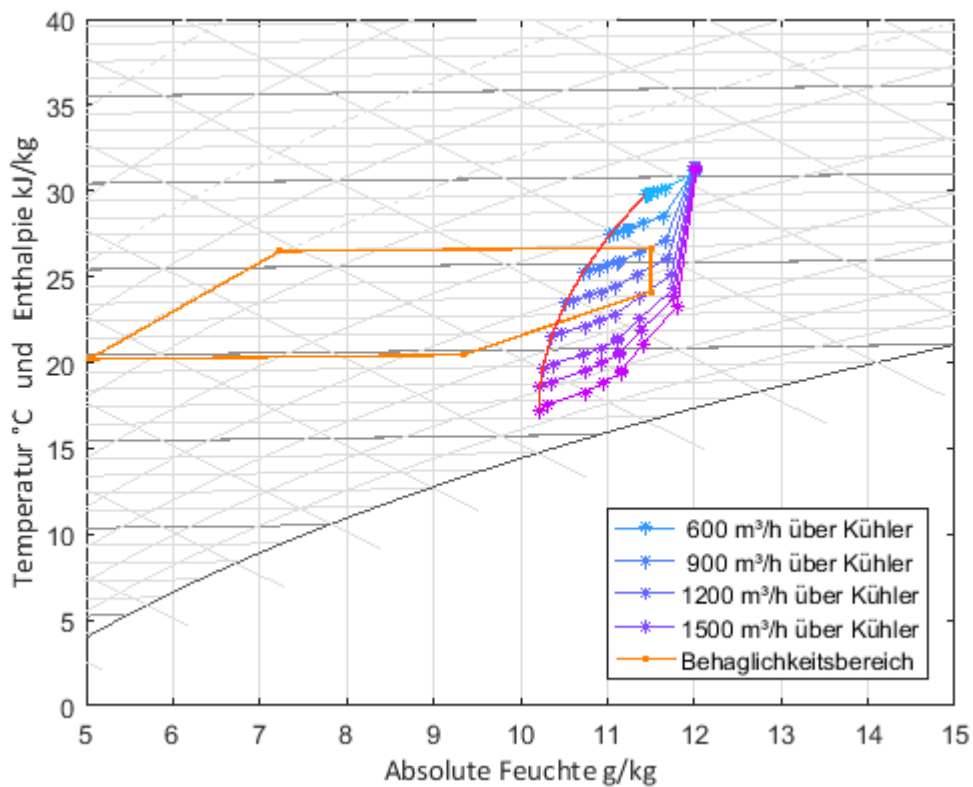


Abbildung 5-31: Darstellung der Berechnungsergebnisse durch Anwendung der Mischgleichungen von Enthalpie und abs. Feuchte für einen Luftstrom über den Luftkühler und einen Luftkühler über den Bypass

Im nächsten Schritt wird anhand des Modells weiterentwickelt um die Kombination aus Luftkühler und Bypassklappe direkt zu simulieren. Parallel dazu wird die Berechnung des Energieeinsatzes erstellt – vgl. Abbildung 2-1 – und die Bypassklappe in der Laboranlage eingebaut. Ergebnisse zu diesen Schritten folgen im Zwischennachweis 2.

5.3 Ist-Stand Arbeitspaket 3

OpDeCoLo: Entwicklung der Regelstruktur (AP 3)

Die Übersicht der Projektplanung zum AP 3 wird im Abschnitt 3.3 erläutert.

5.3.1 Aufgabenstellung

Der Regler soll in diesem Arbeitspaket so erweitert werden, dass Ausgangspunkt und Endpunkt in einem variablen Bereich liegen können. Diese Anforderung wird mit einer gewichteten Kombination aus linearen Optimalreglern realisiert, die im laufenden Betrieb an den aktuellen Arbeitsbereich angepasst werden. Die Grundidee basiert auf dem Ansatz, dass die gesamte Systemdynamik mittels gewichteter Kombinationen von linearen Zustandsraummodellen approximativ beschrieben werden kann. Die aktuelle Gewichtung der Kombination aller linearen Modelle hängt dabei von der aktuellen Temperatur und berechneten absoluten Feuchte ab.

5.3.2 Aktueller Stand

Für die Entwicklung des Reglermodells ist eine Beschreibung der mit Hilfe einer Bilanzgleichung notwendig.

Die Modellbildung beinhaltet auch den von der RLT-Anlage versorgten Raum. Dazu werden in meinem Raummodell folgende Bilanzgrößen berücksichtigt (Tabelle 5-8):

Tabelle 5-8: Kenngrößen des Raummodells für die Entwicklung des Mehrgrößen-Regler

Beschreibung	Symbol	Einheit
Wärmeerzeugung durch Personen im Raum	\dot{Q}_{Pers}	W
Feuchteabgabe durch Personen im Raum	$\dot{m}_{x,\text{Pers}}$	kg/kg
Wärmemenge, zugeführt durch Zuluftvolumenstrom	\dot{Q}_{E}	W
Feuchtemenge, zugeführt durch Zuluftvolumenstrom	x_{E}	kg /kg
Wärmemenge, abgeführt durch Abluftvolumenstrom	\dot{Q}_{A}	W
Feuchtemenge, abgeführt durch Zuluftvolumenstrom	x_{A}	kg /kg
Transmissionswärmeverluste durch Bauteile	\dot{Q}_{Trans}	W

Die Regelung der Feuchte und Temperatur im Raum wird mit diesen Größen beschrieben. Abbildung 5-32 zeigt den schematischen Zusammenhang des Modells, mit den in Tabelle 5-8 beschriebenen Bilanzgrößen, welches in Matlab-Simulink erstellt wird.

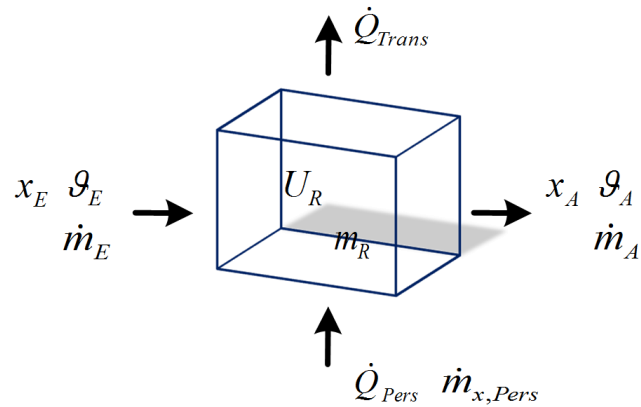


Abbildung 5-32: Darstellung des Raummodells als ein Teil des Mehrgrößen-Reglers

Anders als im Vorgängervorhaben berücksichtigt dieses Modell die Anforderungen im versorgten Raum und beschränkt sich nicht auf die Regelung des Zuluft Zustandes. Der Vorteil des neuen Ansatzes ist, die Berücksichtigung der thermischen Lasten und weiteren Störgrößen im Raum. Das Modell wird erweitert, damit erforderliche Totzeiten und Reaktionszeiten verarbeitet werden.

5.4 Ist-Stand Arbeitspaket 4

DeCoSuLo: Aufrüsten der Laboranlage, Reglerentwicklung (AP 4)

Die Übersicht der Projektplanung zum AP 4 wird im Abschnitt 3.4 erläutert.

5.4.1 Aufgabenstellung

Das Arbeitspaket betrachtet die Bereitstellung des Kaltwassers zur Verwendung am Luftkühler. In Abhängigkeit des Bedarfs muss die Luft entweder gekühlt oder entfeuchtet werden. Für beide Prozesse sind unterschiedliche Temperaturniveaus notwendig – vgl. Abschnitt 4.5. Zur Entfeuchtung der Luft wird bei RLT-Anlagen eine Vorlauftemperatur von 6 °C verwendet. Die Bereitstellung der 6 °C ist mit einem Energieaufwand für den Verdichter verbunden. Die Verdichter – siehe Abbildung 5-33 – sorgt für den Massenstromumsatz des Kältemittels. Wird ein Kaltwassersatz mit variabel einstellbarem Verdichter verwendet, so kann auf zwei Wegen der Energieeinsatz durch Änderung des Temperaturniveaus reduziert werden. Im AP 4 wird dafür zum einen eine Regelstrategie für den Kaltwassersatz entwickelt sowie ein Versuchsaufbau zur Simulation verschiedener Lastprofile für den Kaltwassersatz erstellt.

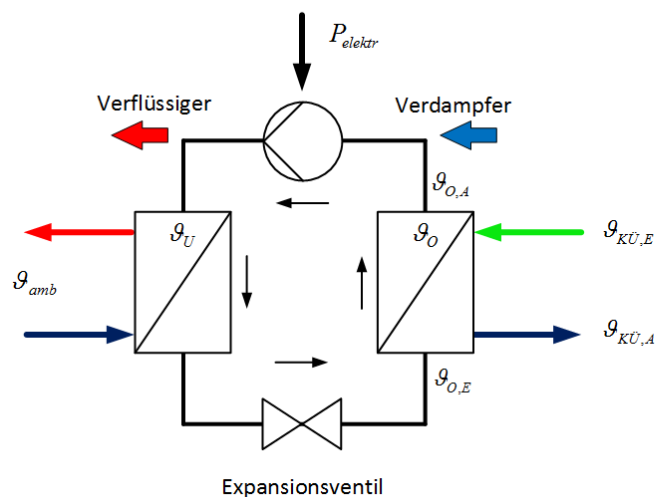


Abbildung 5-33: Darstellung der Anlagenkomponenten zur Kälteerzeugung (Kreisprozess der Kälteerzeugung)

5.4.2 Aktueller Stand

Das AP 4 ist auf Grund der verspäteten Personaleinstellung aktuell im Verzug. Bisher wurde ein Schema für den Versuchsaufbau erstellt. Anhand des Versuchsaufbaus –Abbildung 5-34 – sollen verschiedene Lastprofile zur Wärmeabnahme untersucht werden können. Weiterhin wird am Kaltwassersatz untersucht, in wie weit es möglich ist, auf die Betriebsweise Einfluss zu nehmen. Dazu zählen die folgenden Voraussetzungen:

- Verdichter frequenzgeregelt,
- Zugang zum Verdichter über die Automation
- Expansionsventil elektronisch, nicht über ein Kapillarrohr,
- Herstellerspezifische Grenzen des wählbaren Temperaturniveaus.

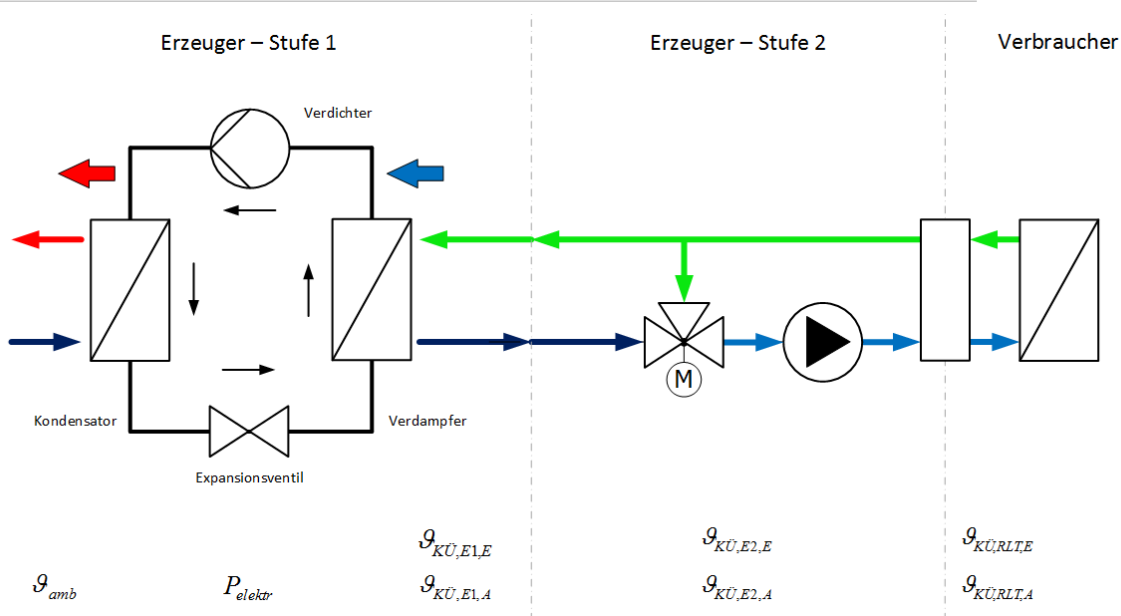


Abbildung 5-34: Darstellung der Erzeugerstufen in der DeCoSuLo-Schaltung – Ausbaustufe 1

Das Konzept zur Verringerung des Energiebedarfs stellt sich wie folgt dar. Sind die Voraussetzungen für eine Regelung gegeben, so wird lastabhängig die Vorlauftemperatur bereitgestellt. In den Übergangsjahreszeiten ist eine Entfeuchtung in der Regel nicht notwendig. Somit kann die Temperatur ϑ_0 – Abbildung 5-33 – angehoben werden. Daraus resultiert nach Gleichung 4-18 eine Erhöhung des COP.

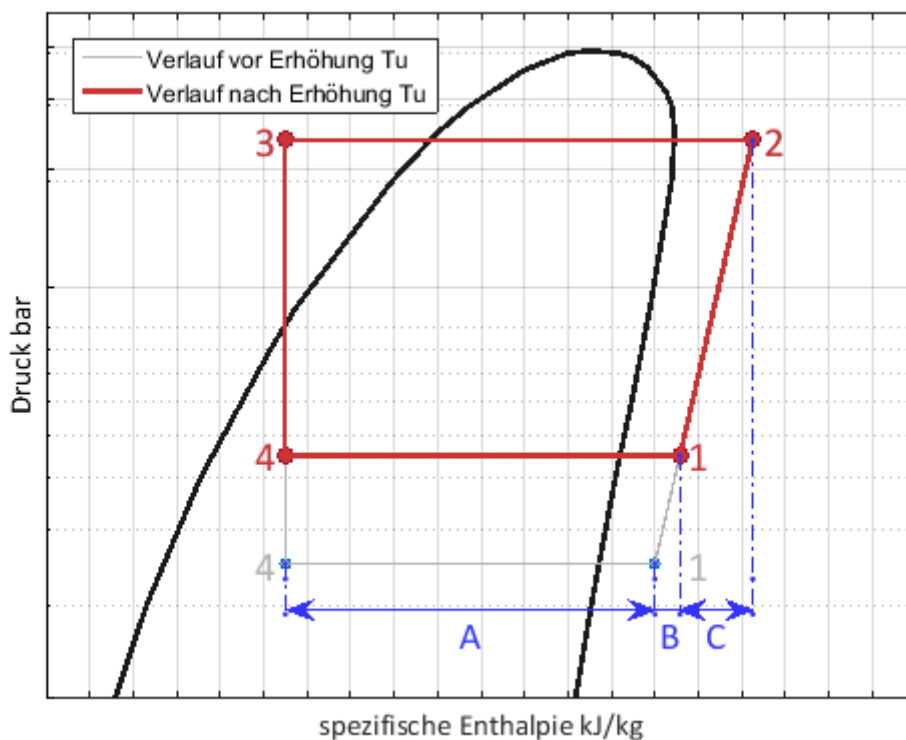


Abbildung 5-35: Darstellung der Veränderung von Enthalphiedifferenzen bei Änderung der Temperaturen am Kaltwassersatz

In Abbildung 5-35 sind die zu erwartenden Effekte im log-p,h-Diagramm für den Fall der Temperaturerhebung dargestellt. Bei einer höheren Temperatur am Verdampfer (Abbildung 5-35 Linie Punkt 4 nach Punkt 1) ergibt sich eine Enthalpiedifferenz (ED). Die ED von zuvor – Bereich A – wird nun um den Bereich B erweitert. Die Energie in dem neuen Bereich entsteht nur auf Basis der Temperaturdifferenzen zwischen den Medien am Verdampfer. Außerdem wird die ED von zuvor Bereich B und C kleiner und beträgt nur noch den Bereich C. Das bedeutet eine Einsparung des Energieaufwandes am Verdichter. Insgesamt wird zunächst ein Gesamt-Modell in Matlab-Simulink, bestehend aus einem Kaltwassersatz und einem Verbrauchernetz erstellt. Darauf folgen die Durchführungen von Simulationen zur Bestimmung der Einsparpotentials und Entwicklung der Regelungsstrategie. Werden positive Effekte festgestellt, wird der Versuchsaufbau entsprechend hergestellt und im Anschluss die Simulationsergebnisse anhand von Messwerten validiert. Unser Ziel ist es, diesen Meilenstein durch Studierende des Studiengang GEIT bearbeiten zu lassen, um möglichst schnell die Bearbeitung abschließen zu können.

5.5 Ist-Stand Arbeitspaket 5

Entwicklung der Software zur Berechnung der Energieeffizienz-Steigerung bei Verwendung des entwickelten Regelungskonzeptes (AP 5)

Die Übersicht der Projektplanung zum AP 5 wird im Abschnitt 3.5 erläutert.

5.5.1 Aufgabenstellung

Die Erstellung einer Prognose zum Einsparpotential des entwickelten Regelungskonzeptes ist in durch Software zu erarbeiten. Schwerpunkte sind dabei die klimatischen Bedingungen des Aufstellortes, sowie die Berücksichtigung der vorhandenen Anlagenzusammenstellung. Außerdem ist das Einsparpotential für den Erzeugerkreislauf bei Verwendung der bedarfsabhängigen Vorlauftemperaturregelung im Kältekreislauf zu implementieren.

5.5.2 Aktueller Stand

Die Bearbeitung des AP 5 verzögert sich aktuell. Der Aufbau der vorhandenen Software, lässt die Übernahme der dynamischen Simulationen nicht zu, so dass der Ansatz aus dem vorangegangenen Projekt nicht weitergeführt werden kann. Daher besteht der neue Ansatz, aus der Erstellung einer Software aus der Matlab-Simulink Umgebung. Dadurch ist es möglich die Ergebnisse aus den Simulationsmodellen, die bereits in den vorangegangenen APs erstellt und angewendet werden, zu übernehmen. Die Entwicklung der Software folgt daher der Modellbildung, und kann mit Einstellung des zweiten wissenschaftlichen Mitarbeiters aktiver bearbeitet werden.

5.6 Ist-Stand Arbeitspaket 6

Messtechnische Untersuchung der Regelung (AP 6)

Die Übersicht der Projektplanung zum AP 6 wird im Abschnitt 3.6 erläutert.

5.6.1 Aufgabenstellung

Im Arbeitspaket 6 werden Versuchsdurchführungen mit Messungen nach den Umbau- und Optimierungsmaßnahmen, für den Luftbypass sowie der angepassten Regelungsstrategie zur Kaltwassererzeugung durchgeführt und bewertet.

5.6.2 Aktueller Stand

Nach Abbildung 3-6 ist wird das AP 6 im aktuellen Projektarbeitszeitraum noch nicht bearbeitet.

5.7 Ist-Stand Arbeitspaket 7 Projektmanagement und Berichte (AP 7)

Die Übersicht der Projektplanung zum AP 7 wird im Abschnitt 3.7 erläutert.

5.7.1 Aufgabenstellung

In dem übergeordneten Arbeitspaket 7 (Auswertung / Öffentlichkeitsarbeit / Berichte) werden die Stände der Arbeitspakete ausgewertet und zu den Arbeitspaketen reflektiert. Es werden derzeit Konferenzen zum Thema gesucht, auf denen die gesammelten Ergebnisse vorgetragen werden können. Weiterhin werden regelmäßig Berichte zu vorliegenden Ergebnissen verfasst.

5.7.2 Aktueller Stand

Projektbeirat

Zur Qualitätssicherung des Projektes wurde ein Projektbeirat zusammengestellt. Die Mitglieder des Beirates stammen aus der Wissenschaft und Wirtschaft mit Berufserfahrung im Bereich der Klimatechnik. Wir freuen uns sehr auf die Unterstützung.

Projekt-Homepage

Das Konzept der Homepage wird erarbeitet. Dabei sollen für den ersten Stand Informationen zum Projekt veröffentlicht werden. Im nächsten Schritt werden Mess- und Simulationsergebnisse präsentiert. Die Internetadresse opreebek.htw-berlin.de ist beim Rechenzentrum der HTW beantragt und erstellt worden.

Begründet auf die aktuelle Personalbesetzung wird die Homepage für die erste Projektphase beim Anbieter wix.com erstellt. Die Verwendung ist nicht kostenfrei, jedoch bietet das Baukastensystem die Erstellung der Grundstruktur und Bereitstellung der gewünschten Informationen in kurzer Zeit. In der zweiten Projektphase ist der Wechsel zur freien Darstellung über Joomla geplant und somit die monatlichen Kosten von ca. 15 EUR zu vermeiden.

Eine E-Mailadresse zum Projekt (opreebeka@htw-berlin.de) ist ebenfalls beantragt, steht zur Berichtsabgabe jedoch noch nicht zur Verfügung.

Öffentlichkeitsarbeit

Bisher wurde noch kein Paper zur Öffentlichkeitsarbeit ausgearbeitet.

Berichte

Am 20. Februar 2017 wurde der Zwischennachweis 01, am 18. August 2017 wurde der Zwischennachweis 02 eingereicht.

6 Zusammenfassung

Die Arbeitspakete des Vorhabens werden in der vorgesehenen Reihenfolge bearbeitet. In einigen Bereichen ist es zu Verzögerungen gekommen, die jedoch im Laufe des Vorhabens aufgeholt werden können. Das Ausscheiden eines Projektmitarbeiters und die dadurch erforderliche Neueinstellung haben zu Verzögerungen geführt. Durch wetterbedingte Einflüsse musste das Messprogramm geändert werden. Planmäßig sollten RLT-Anlagen in der Charité untersucht werden. Dies konnte aus betriebstechnischen Gründen nicht erfolgen. Die vorgesehenen Messungen sind daher an Anlagen der HTW und im Labor vollzogen worden

Die Durchgeführten Messungen sind erfolgreich und stützen die Ergebnisse des Vorgängervorhabens. Messungen zur Mengenregelung von Luftkühlern an Laboranlagen und Hörsaalanlage und an einer Ersatzanlage durchgeführt. Sie zeigen, dass die aufgestellten Modelle die Vorgänge bei Kühlung und Entfeuchtung richtig abbilden. Im weiteren Verlauf des Vorhabens wird daher die „Variante Luftbypass am Kühler“ anlagentechnisch realisiert und regelungsseitig umgesetzt.

Zurzeit wird dieser Umbau an der RLT-Anlage des Labors vorgenommen. Weiterhin wird das Kanalnetz der Anlage erweitert, so dass zusätzliche Räume versorgt werden können. Dies geschieht, um eine realistische Lastsituation zu erreichen. Damit werden die Möglichkeiten und Grenzen des Systems überprüft.

Parallel werden die Arbeiten zur Simulation der Anlage und zum Entwurf des Reglers durchgeführt. Dabei wird auf eine enge Verzahnung geachtet. So lässt sich die Parametrierung des Mehrgrößenreglers anpassen und eine Validierung und Funktionsüberprüfung vornehmen. Die Ergebnisse fließen direkt in die weiteren Arbeiten ein.

Die Entwicklung der Software zur Berechnung der Energieeinsparung und Dimensionierung im Anwendungsfall wird neu konzipiert. Die Lösung des Vorgängervorhabens basierte auf dem Programm „Excel“. Dies hat sich als hinderlich für die weitere Bearbeitung erwiesen. Die Simulationen der Anlagen und Regelungstechnik erfolgen auf der Grundlage von „MatLab“. In der weiteren Bearbeitung soll daher auch die Berechnungs- und Dimensionierungssoftware darauf aufbauen. Es sind damit ein erhöhter Funktionsumfang und genauere Ergebnisse möglich.

Die Software soll daher, nicht wie geplant, durch einen externen Projektpartner weiterentwickelt werden. Die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes soll daher durch die HTW erfolgen, um die positiven Effekte der gleichen Berechnungsbasis ausnutzen zu können.

I Anhang

I.I Glossar

Wärmeübertrager

Der Begriff Wärmeübertrager wird in diesem Bericht verwendet, wohlgleich die Diskussion über die richtige Schreibweise bekannt ist. Mit Wärmeübertrager ist ein Bauteil gemeint, durch das von einem Medium mit höherer Temperatur diese auf ein Medium mit niedriger Temperatur übertragen wird. Auf die Verwendung des Begriffs Wärmetauscher (Übersetzung aus dem engl. Heat Exchanger) wird verzichtet, da aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik hervorgeht, dass ein Wärmestrom nur in eine Richtung geht.

I.II Verwendete Konstanten

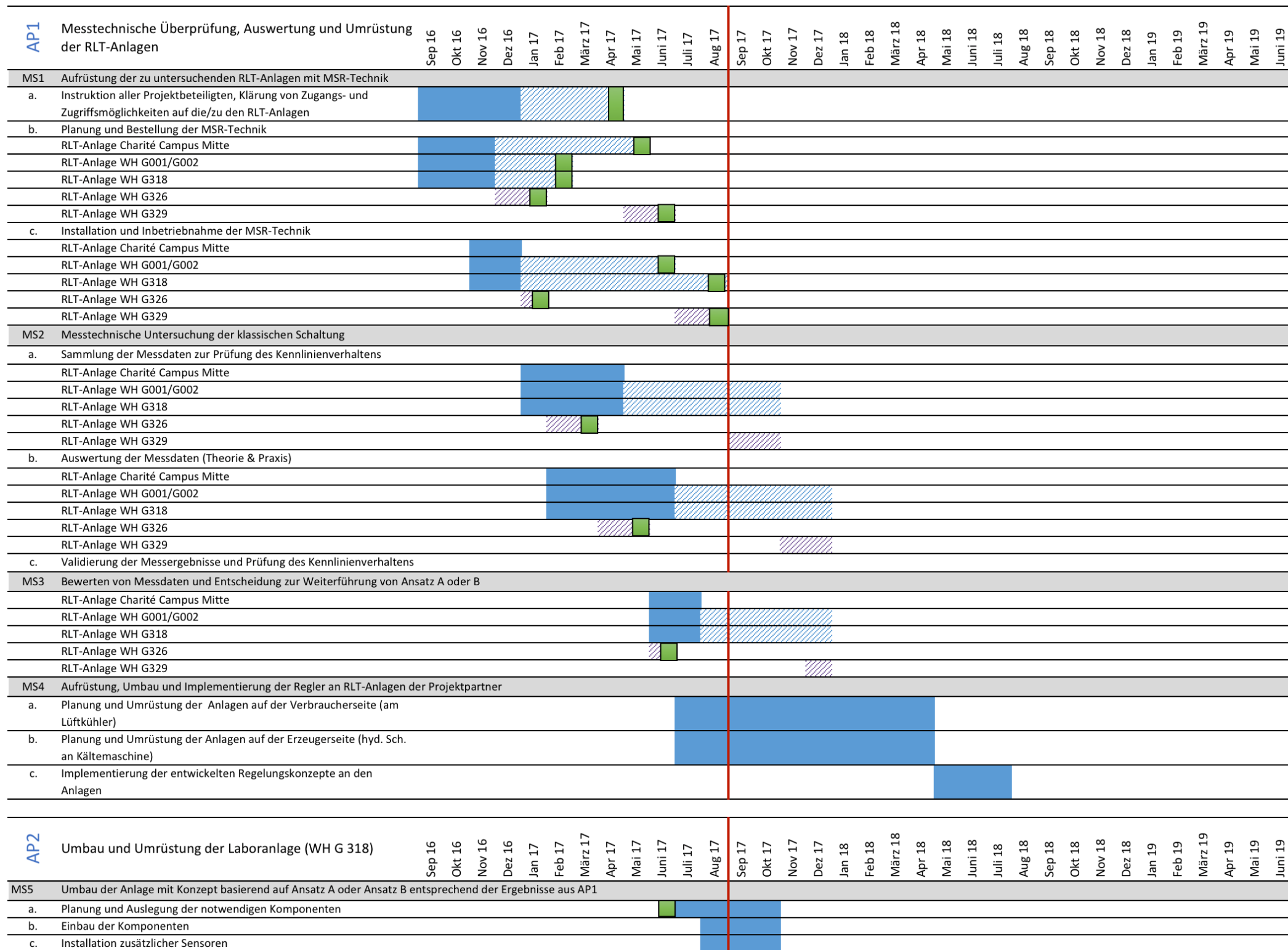
Formelzeichen	Beschreibung	Wert	Einheit
$c_{p,D}$	Spezifische Wärmekapazität – Dampf	1.86	kJ/kgK
$c_{p,L}$	Spezifische Wärmekapazität – Luft	1.005	kJ/kgK
$c_{p,W}$	Spezifische Wärmekapazität – Wasser	4.182	kJ/kgK
C_1	Konstante 1 – Magnus-Formel	17.62	–
C_2	Konstante 2 – Magnus-Formel	243.125	–
p_{amb}	Umgebungsdruck	1013.25	hPa
R_0	Spezifische Verdampfungsenthalpie bei 0 °C	2500.9	kJ/kg
R_L	Gaskonstante – Luft	287.1	J/kgK
R_W	Gaskonstante – Wasserdampf	461.5	J/kgK
T	Addition Temperatur absolut	273.15	K
	Umrechnung kJ in Ws	0.00027778	–

I.III Quellenverzeichnis

- Baumgarth et al. Baumgarth/Hörner/Reeker – Handbuch der Klimatechnik; Band 1: Grundlagen
- Cerbe et al. Cerbe G., Wilhelms G.: Technische Thermodynamik, Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen; 15. Aktualisierte Aufl.; München, Carl Hanser Verlag, 2008
- Goldschmidt et al. Goldschmidt N., Krimmel P., Müller B., Schulte H.; Abschlussbericht OpDeCoLo; Berlin, 2015
- Hoche et al. Hoche D., Küblbeck J., Meyer L., Reichwald R., Schmidt G.-D., Schwarz O.: Duden Physik: Basiswissen Schule; Lothar Meyer Hrsg.; Mannheim, Duden Verlag, 2010
- Barlow Barlow Jörg: Systeme der Gebäudeautomation; 1. Aufl.; Karlsruhe, CCI Dialog GmbH, 2012
- Huber et al. Huber, Ranner: Leitfaden HX-Diagram; http://www.huber-ranner.com/wp-content/uploads/2014/03/56.056_leitfaden_hxdiagramm_de_low.pdf; aufgerufen am 03. Juli 2017
- Miller et al. Miller W., Patzel O., Bäck H.J., Wagner H.: Anlagenmechanik für Sanitär, Heizungs- und Klimatechnik; 1. Aufl.; Braunschweig, Westermann, 2012
- Mollier <http://molliardiagramm.com/de>; aufgerufen am 03. Juli 2017
- Nowotny et al. Nowotny S., Feustel H. E.: Lüftungs- und klimatechnische Gebäudeausrüstung; Wiesbaden, Bauverlag GmbH, 1996
- Rietschel 1 Rietschel: Raumklimatechnik; Band 1: Grundlagen; 16. Aufl.; Horst Esdorn Hrsg.; Berlin, Springer Verlag, 2008
- Rietschel 2 Rietschel: Raumklimatechnik; Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik; 16., völlig überarbeitete und erweiterte Aufl.; Klaus Fitzner Hrsg.; Berlin, Springer Verlag, 2008
- Schweizer-FN <http://www.schweizer-fn.de>; Berechnung von Größen feuchter Luft; aufgerufen am 04. April 2017
- Siemens Das h,x-Diagramm – Aufbau und Anwendung; <https://w1.siemens.ch/buildingtechnologies/ch/de/service/know-how/Documents,x/Das%20h,x-Diagramm%20Aufbau%20und%20Anwendung.pdf>; aufgerufen am 27. Juni 2017
- Tipler/Mosca Tipler P.A., Mosca G.: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure; 6.Aufl.; Heidelberg, Spektrum-Verlag, 2009

-
- VDI 1997 VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemie-Ingenieurwesen: VDI-Wärmeatlas; 8 Aufl.; Berlin, Springer Verlag, 1997
- Zeller Zeller Consulting Suisse: AHH-Software(Mollier HX Diagramm); http://www.zcs.ch/fileadmin/media/pdf/software-produkte/produkte/de/AHH_Software_German.pdf, aufgerufen am 03. Juli 2017

II Anhang



		Sep 16	Okt 16	Nov 16	Dez 16	Jan 17	Feb 17	März 17	Apr 17	Mai 17	Juni 17	Juli 17	Aug 17	Sep 17	Okt 17	Nov 17	Dez 17	Jan 18	Feb 18	März 18	Apr 18	Mai 18	Juni 18	Juli 18	Aug 18	Sep 18	Okt 18	Nov 18	Dez 18	Jan 19	Feb 19	März 19	Apr 19	Mai 19	Juni 19					
AP3	OpDeCoLo: Entwicklung der Regelstruktur																																							
MS6	Anpassung des vorhandenen Modells der hydraulischen Schaltung																																							
a.	Technischer Zusammenhang, warum die OpDeCoLo-Fläche bei einigen Wärmeübertragern existiert bzw. nicht existiert																																							
b.	Programmierung des Reglers mit dem Ziel den Arbeitsbereich zu erweitern																																							
c.	Maßnahmen zur Verbesserung des Regelverhaltens																																							
MS7	Modellvalidierung mit der umgebauten Anlage																																							
	Erstellung des Modells in Matlab																																							
MS8	Anpassung der Regelstruktur																																							
	Anpassung der Regelstruktur für den Arbeitsbereich basierend auf die Messergebnisse von AP1																																							
MS9	Entwicklung der Regelparameter																																							
	Entwicklung der spezifischen Regelparameter																																							
MS10	Validierung der Regelung																																							
	Validierung der entwickelten Regelung																																							
MS11	Anpassung des vorhandenen Modells der Schaltung mit Luftbypass																																							
a.	Erstellung einer Regelstrategie für das Konzept mit Luftbypass																																							
AP4	DeCoSuLo: Aufrüsten der Laboranlage, Reglerentwicklung																																							
MS16	Optimierung und Erweiterung der Laboranlage des Antragstellers																																							
MS17	Entwicklung einer Regelung für die lastbedingte Vorlauftemperatur mit Hilfe von MatLab Simulink																																							
a.	Modellbildung des DeCoSuLo-Konzeptes (Wasserspeicher, Ventil)																																							
b.	Modellierung und Simulation des Systems																																							
c.	Validierung des erstellten Modells																																							
AP5	Entwicklung der Software																																							
MS20	Weiterentwicklung der vorhandenen Software																																							
MS21	Erweiterung des vorhandenen Programms zur Berechnung des Energieaufwandes für den Erzeugerkreislauf																																							
a.	Ergänzung des "User Interface" zur Bedienung des Programms																																							
b.	Erstellung der weiteren Programm-Module für die einzelnen Komponenten																																							
c.	Entwicklung der grafischen Oberfläche zur Visualisierung der Daten und Ergebnisse																																							
MS22	Überführung der entwickelten Regelstrategien in das Rechnerprogramm																																							
MS23	Erweiterung des Atlas mit neuen Informationen zur Darstellung der Einsparpotentiale des Konzeptes für verschiedene Klimaregionen																																							
AP6	Messtechnische Untersuchungen der Regelung																																							
MS24	Messungen der neuen Regeltechnologie																																							
a.	Testen bzw. Auswerten des neuen Konzeptes an der Laboranlage																																							
b.	Feststellen des tatsächlichen Einsparpotentials der neuen Konzept-Schaltung im Teillastbetrieb																																							
MS25	Messungen der DeCoSuLo-Technologie																																							
a.	Testen bzw. Auswerten des neuen Regelungsstrategie an der Laboranlage																																							
b.	Feststellen des tatsächlichen Einsparpotentials der neuen DeCoSuLo-Schaltung im Teillastbetrieb																																							
AP7	Projektmanagement / Berichte																																							
	Projektmanagement, Berichte, Veröffentlichungen																																							