

Masterarbeit

Aufbau einer experimentellen Umgebung und Messungen zur Bewertung verschiedener Abtaumethoden bei Luftkühlern

Set-up of an experimental environment and measurements for evaluating different defrosting
methods for air coolers

Aachen, 24. Juni 2016

Tobias Czarnecki

Matrikelnummer: 297221

betreut von:

Dipl.-Ing. Henning Freitag

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

Die Arbeit wurde vorgelegt am:

E.ON Energy Research Center | ERC

Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate | EBC

Mathieustraße 10, 52074 Aachen

Kurzfassung

Eine Vereisung des Verdampfers in einem Kältekreislauf führt zu einer Minderung des übertragenen Wärmestroms sowie des Anlagenwirkungsgrads. Der vereiste Wärmeübertrager muss daher von Zeit zu Zeit abgetaut werden. Dafür werden in der Praxis sowohl elektrische als auch Heißgas-Abtaumethoden eingesetzt.

Zur genaueren Untersuchung dieser Strategien wird ein experimenteller Aufbau eines Kältekreislaufes mit austauschbarem Luftkühler modifiziert. Im Kältekreislauf installierte Temperatur- und Drucksensoren sowie eine elektrische Leistungsmessung erlauben die energetische Bilanzierung aller einzelnen Komponenten des Kältekreises.

Ein bereits vorhandener Wägebau für die Messung der Massenänderung des Luftkühlers wird optimiert. Ein Konzept für einen mobilen Aufbau zur Untersuchung verschiedener Prüflinge wird erstellt und ein Kalibrierungsverfahren für den optimierten Wägebau entwickelt. Ziel ist die Messung der zeitlich veränderlichen Eis- bzw. Tauwassermenge im Luftkühler im Normal- bzw. Abtaubetrieb sowie die Veränderung des 2D-Schwerpunktes des Luftkühlers. Das Auslesen der Messdaten erfolgt automatisiert.

Für den Kältekreislauf wird softwareseitig ein Steuerungskonzept entworfen und mittels einer speicherprogrammierbaren Steuerung der Fa. Beckhoff umgesetzt. Die SPS ermöglicht einen vollautomatisierten Betrieb des Kältekreislaufs nach Nutzervorgabe sowie das Auslesen aller Sensoren und die Darstellung der Messwerte. Ein softwareseitiger Anlagenschutz inklusive Funktionstest wird in der SPS vorgesehen. Bei Bedarf erfolgt eine Anpassung der Regelparameter.

Nach der Inbetriebnahme des gesamten Systems wird ein Luftkühler in einer Klimakammer unter verschiedenen Randbedingungen vermessen. Neben der Auswertung der Messergebnisse erfolgen eine Bewertung der Messungen hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit sowie eine Abschätzung der Messfehler.

??? Diese Kurzzusammenfassung hat 232 Wörter

Abstract

Er hörte leise Schritte hinter sich. Das bedeutete nichts Gutes. Wer würde ihm schon folgen, spät in der Nacht und dazu noch in dieser engen Gasse mitten im übel beleumundeten Hafenviertel? Gerade jetzt, wo er das Ding seines Lebens gedreht hatte und mit der Beute verschwinden wollte! Hatte einer seiner zahllosen Kollegen dieselbe Idee gehabt, ihn beobachtet und abgewartet, um ihn nun um die Früchte seiner Arbeit zu erleichtern? Oder gehörten die Schritte hinter ihm zu einem der unzähligen Gesetzeshüter dieser Stadt, und die stählerne Acht um seine Handgelenke würde gleich zuschnappen? Er konnte die Aufforderung stehen zu bleiben schon hören. Gehetzt sah er sich um. Plötzlich erblickte er den schmalen Durchgang. Blitzartig drehte er sich nach rechts und verschwand zwischen den beiden Gebäuden.

Beinahe wäre er dabei über den umgestürzten Mülleimer gefallen, der mitten im Weg lag. Er versuchte, sich in der Dunkelheit seinen Weg zu ertasten und erstarrte: Anscheinend gab es keinen anderen Ausweg aus diesem kleinen Hof als den Durchgang, durch den er gekommen war. Die Schritte wurden lauter und lauter, er sah eine dunkle Gestalt um die Ecke biegen. Fieberhaft irrten seine Augen durch die nächtliche Dunkelheit und suchten einen Ausweg. War jetzt wirklich alles vorbei, waren alle Mühe und alle Vorbereitungen umsonst? Er presste sich ganz eng an die Wand hinter ihm und hoffte, der Verfolger würde ihn übersehen, als plötzlich neben ihm mit kaum wahrnehmbarem Quietschen eine Tür im nächtlichen Wind hin und her schwang. Könnte dieses der flehentlich herbeigesehnte Ausweg aus seinem Dilemma sein?

Langsam bewegte er sich auf die offene Tür zu, immer dicht an die Mauer gepresst. Würde diese Tür seine Rettung werden? Er hörte leise Schritte hinter sich. Das bedeutete nichts Gutes. Wer würde ihm schon folgen, spät in der Nacht und dazu noch in dieser engen Gasse mitten im übel beleumundeten Hafenviertel? Gerade jetzt, wo er das Ding seines Lebens gedreht hatte und mit der Beute verschwinden wollte! Hatte einer seiner zahllosen Kollegen dieselbe Idee gehabt, ihn beobachtet und abgewartet, um ihn nun um die Früchte seiner Arbeit zu erleichtern? Oder gehörten die Schritte hinter ihm zu einem der unzähligen Gesetzeshüter dieser Stadt, und die stählerne Acht um seine Handgelenke würde gleich zuschnappen? Er konnte die Aufforderung stehen zu bleiben schon hören. Gehetzt sah er sich um. Plötzlich erblickte er den schmalen Durchgang. Blitzartig drehte er sich nach rechts und verschwand zwischen den beiden Gebäuden. Beinahe wäre er dabei über den umgestürzten Mülleimer gefallen, der mitten im Weg lag. Er versuchte, sich in der Dunkelheit seinen Weg zu ertasten und erstarrte: Anscheinend gab es keinen anderen Ausweg aus diesem kleinen Hof als den Durchgang, durch den er gekommen war. Die Schritte wurden lauter und lauter, er sah eine dunkle Gestalt um die Ecke biegen. Fieberhaft irrten seine Augen durch die nächtliche Dunkelheit

und suchten einen Ausweg. War jetzt wirklich alles vorbei, waren alle Mühe und alle Vorbereitungen umsonst? Er presste sich ganz eng an die Wand hinter ihm und hoffte, der Verfolger würde ihn übersehen, als plötzlich neben ihm

Dieser Abstract hat 500 Wörter

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	vi
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	x
Vorwort	xi
1 Einführung	1
2 Motivation und Ziele	3
3 Grundlagen	6
3.1 Thermodynamik	6
3.1.1 Kaltdampf-Kälteprozess	6
3.1.2 Feuchte Luft	9
3.1.3 Reif- und Eisbildung	12
3.2 Kältetechnik	16
3.2.1 Komponenten eines Kaltdampfprozesses	17
3.2.2 Abtaumethoden	19
3.3 Federn	24
4 Stand der Technik	27
5 Versuchsaufbau	28
5.1 Kältetechnischer Aufbau	28
5.2 Wägesystem	34
5.2.1 Messtechnik	34
5.2.2 Konstruktion	35
5.3 Elektrischer Aufbau	38
5.3.1 Modbus RTU	42
5.4 Informationstechnischer Aufbau	45
5.4.1 Status Maschine	45
5.4.2 Modbus RTU	45

5.4.3	Grafical User Interface - GUI	45
5.4.4	Anlagenschutz	45
6	Inbetriebnahme	47
6.1	Kälteanlage	47
6.2	Kalibrierung: Wägesystem	47
	Literaturverzeichnis	48
A	Wichtiger Anhang 1	52
A.1	Die Versalien	52
B	Ähnlich wichtiger Anhang	53

Nomenklatur

Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_E	spezifische Wärmekapazität von Eis	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_F	spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasser	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_{pL}	spezifische Wärmekapazität von Luft	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_{pD}	spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
E	Elastizitätsmodul	N/mm^2
E	Energie	J
g	Schwerebeschleunigung	m/s^2
h	spezifische Enthalpie	kJ/kg
h_K	spezifische Kondensationsenthalpie	kJ/kg
h_S	spezifische Schmelzenthalpie	kJ/kg
h_V	spezifische Schmelzenthalpie	kJ/kg
H	Enthalpie	J
\dot{H}	Enthalpiestrom	J/s
I	Stromstärke	A
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
n	Anzahl	-
p	Druck	Pa
p_D	Dampfdruck	Pa
p_L	Luftdruck	Pa
P	Leistung	W
Q	Wärmemenge	J
\dot{Q}	Wärmestrom	W
R	spezifische Gaskonstante	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit
S	Entropie	J/K
\dot{S}	Entropiestrom	W/K
T	Temperatur	K
t	Zeit	s
U	elektrische Spannung	V
V	Volumen	m ³
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
w	spezifische Leistung	W/kg
X	Wassergehalt	kg/kg
Y	Wasserbeladung der Luft	g/kg

griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
η_C	Carnot-Wirkungsgrad	—
φ	relative Feuchte	%
ρ	Massendichte	kg/m ³
ϑ	Temperatur	°C
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K
ψ	Sättigungsgrad	%

Indizes und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
0	Referenzzustand (<i>ambient dead state</i>)
A	Außen/Umgebung
aus	Ausgang

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Indizes und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
CV	Kontrollvolumen (<i>control volume</i>)
el	elektrisch
EV	Expansionsventil
ein	Eingang
KA	Kälteanlage
KK	Klimakammer
KN	kinetisch
KP	Kompressor
LabVIEW	Programmiersprache und Entwicklungsumgebung für die Messdatenerfassung der Firma National Instruments
L	Luft
m	Mittelwert
Modbus	ein offenes Kommunikationsprotokoll basierend auf einer Master-/Slave-Architektur
MySQL	Datenbank-Verwaltungssoftware
PT	Drucksensor
R	Rücklauf
R 134a	Handelsname von 1,1,1,2-Tetrafluorethan. Eingesetztes Kältemittel
rev	Strömungsumkehrung (<i>reverse</i>)
RTU	entfernte Terminaleinheit (<i>Remote Terminal-Unit</i>). Betriebsart für die Datenübertragung für die Modbus-Kommunikation
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TT	Temperatur-Sensor
TwinCat	Automatisierungssoftware der Fa. Beckhoff
Δt	Zeitschritt der Länge Δt
t	technisch
Visual Studio	Integrierte Entwicklungsumgebung für verschiedene Hochsprachen der Fa. Microsoft. Entwicklungsumgebung für TwinCat
VD	Verdampfer
VF	Verflüssiger

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufteilung der sich in Deutschland in Betrieb befindenden Kältemaschinen je nach Einsatzgebiet und Energieverbrauch im Jahre 2009. [M.Stöckner, 2012]	1
2.1	Projektumgebung für den EBC Abtauprüfstand [Freitag, 2015]	3
2.2	Aufgabenpakete im Projektzyklus.[Freitag, 2015] Rot umrahmte Arbeitspakete werden in dieser Masterarbeit behandelt und durchgeführt.	4
3.1	In p,h-Diagramm von einem reinen Fluid [Baehr, 2013]	7
3.2	Kreisprozess im ln p,h-Diagramm [Baehr, 2013]	8
3.3	h^* , X- Diagramm für feuchte Luft bei einem Gesamtdruck $p = 100$ kPa [Baehr, 2013] .	10
3.4	Kristallwachstum auf einer ebenen Oberfläche [Schydlo, 2010]	13
3.5	Schematischer Reifdichte- und Reifdickeverläufe beim Vereisungsvorgang eines Tropfen Wassers [Schydlo, 2010]	15
3.6	Wärmeleitfähigkeit des Reifs aufgetragen über die mittlere Reifdichte [Schydlo, 2010]	15
3.7	Einfacher Kältekreislauf [Baehr, 2013]	18
3.8	Heißgas-Abtauung [K. Kosowski, 2009]	20
3.9	Links: Kühlbetrieb. Rechts:Heißgas-Abtauung [K. Kosowski, 2009]	21
3.10	Blattfeder und Feder-Kennlinien [Wittel u. a., 2011]	24
3.11	Federrate und -wirkungsgrad	25
5.1	Kälteanlage(KA)-Fließbild	30
5.2	Mögliche Magnetventil-Schaltungen	31
5.3	Wärmeströme in der Klimakammer [Nürnberg, 2015]	33
5.4	Federkonstruktion nach dem Prinzip des einseitig eingespannten Balkens	36
5.5	Federarbeit aufgeteilt auf Verdampfergewicht, Waagenvorspannung und Eismenge . .	38
5.6	SPS-CPU und E-Busklemme der Fa. Beckhoff	40
5.7	Zwei-Kabel-Topologie eines MODBUS RTU- Feldbusses [MODBUS.ORG, 2002]	42
5.8	Zwei Modbus-Felddbusse mit angeschlossenen Sensoren, Busklemmen und Spannungspeisung	44
5.9	Status-Maschine	46
A.1	Waage vom Typ <i>PCD 10K0.1</i> der Fa. KERN UND SOHN GMBH	52

Tabellenverzeichnis

3.1	Vor- und Nachteile der verschiedenen Abtaumethoden [Breidenbach, 2014], [Institute of Refrigeration, 2000], [H.-J. Yin et al., 2012], [Huang u. a., 2009]	23
5.1	Leistungsdaten Kälteanlage	29
5.2	Sensordaten-Übersicht	32
5.3	Systemparamter der Klimakammer [Nürnberg, 2015]	34
5.4	Waagendaten	35
5.5	Feder-Daten	36
5.6	Busklemmen-Übersicht	41

Vorwort

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi (Tabelle 5.2). Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Nam liber tempor cum soluta nobis eleifend option congue nihil imperdiet doming id quod mazim placerat facer possim assum. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Nam liber tempor cum soluta nobis eleifend option congue nihil imperdiet doming id quod mazim placerat facer possim assum.

1 Einführung

Der technologische Prozess einer Kältemaschine ermöglicht es einer Wärmequelle Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau zu entziehen und diese an eine Wärmesenke auf einem höheren Temperaturniveau wieder abzugeben. Um diesen thermodynamischen Prozess zu ermöglichen muss dem Kältekreislauf, nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, Energie hinzugefügt werden.

Der Einsatzbereich der Kältemaschinen ist äußerst vielseitig. Sie reicht vom häuslichen Kühlschrank bis hin zur industriellen Großkältemaschinen. Für Privatpersonen als auch ganze Industrienationen ist die Kältetechnik unverzichtbar geworden und trägt wesentlich zu der Verbesserung menschlicher Lebensbedingungen bei.

Im Jahre 2009 waren alleine in Deutschland 129 Millionen Kältemaschinen in Gebrauch. 70% Prozent dieser Kältemaschinen wurden elektrisch angetrieben. Folglich ist die wichtigste Technologie zur Erzeugung von Kälte die Kompressionskälteanlage. Der Energieverbrauch für den Betrieb dieser Anzahl an Kältemaschine beliefen sich 2009 nach Schätzungen von Preuß auf ca. 72 Mrd. kWh . Dies entspricht ca. 15 % des nationalen Elektroenergiebedarfs. Die Aufteilung der Kältemaschinen auf ihre Einsatzbereich ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

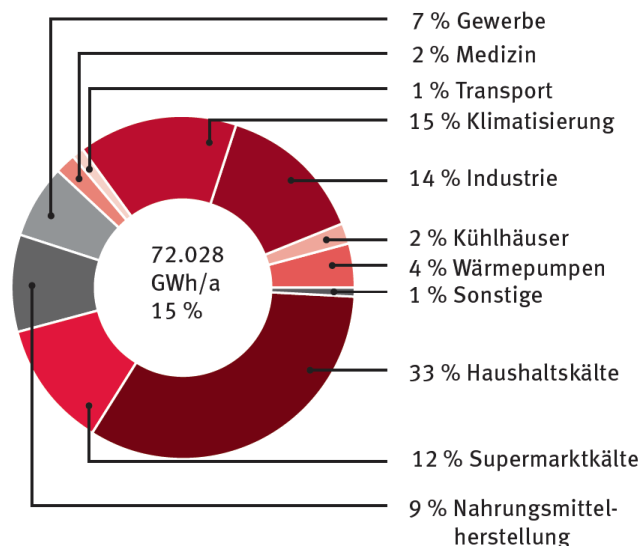


Abbildung 1.1: Aufteilung der sich in Deutschland in Betrieb befindenden Kältemaschinen je nach Einsatzgebiet und Energieverbrauch im Jahre 2009. [M.Stöckner, 2012]

Die steigende Nachfrage und Bedarf nach Kälteleistung und damit steigender Verbrauch von Energie zieht eine steigende Klimabelastung mit sich. Auf der einen Seite entsteht eine steigende CO₂ Belastung für die Bereitstellung der Antriebsenergie der Kältemaschinen. Auf der anderen Seite stellt die Belastung der Umwelt durch gegenwärtige und zukünftige ungewollte direkte Kältemittelemissionen mit teils hohen CO₂-äquivalenten Emissionen eine Herausforderung dar.

Im Bezug auf Kältemaschinen werden in der Literatur eine Vielzahl an Möglichkeiten und Potential-einschätzungen zur Senkung des Energieverbrauches und Umweltbelastung genannt. Von der Verwendung von natürlichen Kältemittel, Wärmerückgewinnung vom Verflüssiger, sowie von Downsizing des Kompressors ist die Rede. Laut [EnergieAgentur.NRW, 2010] entfallen bei der elektrischen Leistungsaufnahme einer Kälteanlage:

- ▷ ca.88 % auf den Verdichter
- ▷ ca. 7 % auf den Verflüssiger
- ▷ ca. 5 % auf den Verdampfer.

Folglich ist der Kompressor der größte Energieverbaucher in einer Kälteanlage. Um eine effiziente Kälteanlage zu betreiben, sollte die zu verrichtende Arbeit vom Verdichter so niedrig wie möglich gehalten werden.

In dieser Arbeit sollen verschiedene Abtaumethoden für einen vereisten Luftkühler näher untersucht werden, da diese im direkten Zusammenhang mit der Leistungsaufnahme des Verdichters stehen. Vereiste Luftkühler führen zu einem Leistungsabfall sowie zu einem erhöhten Stromverbrauch durch den Kompressor. Dadurch muss der Luftkühler zu bestimmten Zeiten abgetaut werden, um das Eis von dem Wärmeübertrager zu entfernen und die ursprüngliche Kälteleistung wieder zur Verfügung stellen zu können.

2 Motivation und Ziele

In diesem Kapitel wird die Motivation und die gesetzten Ziele der vorliegenden Arbeit aufgezeigt.

Am *Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate* (EBC) wird in Kooperation mit dem *Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung* (WSA) verschiedene Abtaumethoden für vereiste Luftkühler erforscht. Der Auftraggeber und Kooperationspartner für die Forschungsarbeiten ist der *Forschungsrat Kältetechnik e.V.* Die komplette Projektumgebung ist in der Abbildung 2.1 dargestellt



Abbildung 2.1: Projektumgebung für den EBC Abtauprüfstand [Freitag, 2015]

Die Motivation zu diesem Forschungsprojekt rührt aus dem simplen Phänomen, dass bei der Unterschreitung des Taupunktes der zu kühlenden, vorbei strömenden Luft zunächst eine Bereifung des Luftkühlers stattfindet. Die Bereifung führt bei einer Verdampfungstemperatur kleiner als 0 °C und somit Unterschreitung des Gefrierpunktes zu einer Vereisung. Die Bereifung führt durch Querschnittsverengungen im Wärmeübertrager des Luftkühlers zu einer erhöhten Strömungsgeschwindigkeit. Diese führt zunächst zu einem erhöhten Wärmeübergang und somit zu einer höheren übertragenden Leistung vom Luftkühler auf die Luft. [Schydlo, 2010]

Eine spätere Bereifung der Lamellen führt zu einem sinkenden Wärmeübergang zwischen der Lamelle und der Luft, da sich das gefrorene Eis aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit wie ein Isolator verhält. Um den eintretenden Leistungsabfall zu kompensieren, wird die Regelung der Kälteanlage die Verdampfungstemperatur verringern. Eine geringere Verdampfungstemperatur bedeutet einen geringeren Betriebsdruck, den der Kompressor bereitstellen muss. Eine höhere Druckdifferenz führt zu einem erhöhten Stromverbrauch und gleichzeitig sinkt der Wirkungsgrad der gesamten Kälteanlage. Aus dieser Kausalkette sollte eine Kälteanlage im Falle einer Vereisung abgetaut werden, um danach wieder seine Nennleistung zur Verfügung stellen zu können.

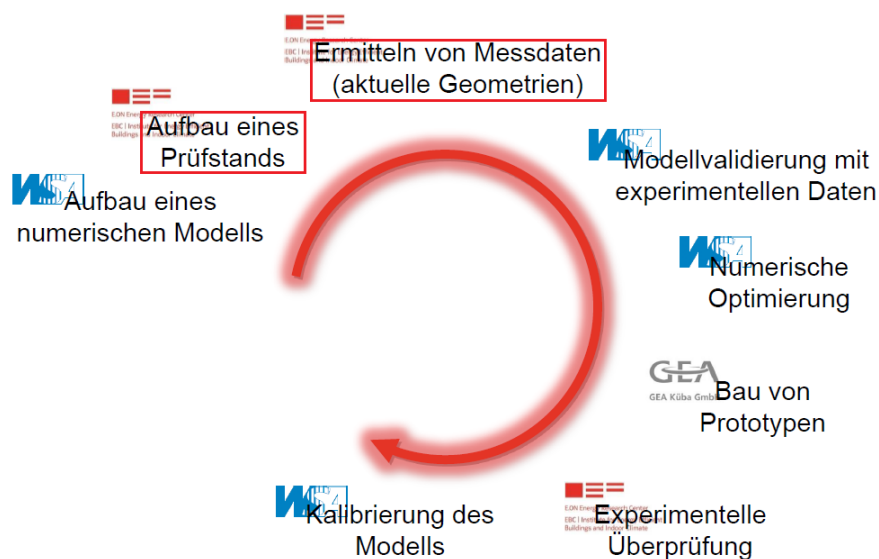


Abbildung 2.2: Aufgabenpakete im Projektzyklus.[Freitag, 2015] Rot umrahmte Arbeitspakete werden in dieser Masterarbeit behandelt und durchgeführt.

Die Ziele dieses Forschungsvorhabens sind sowohl experimentelle als auch numerische Erkenntnisgewinne im Hinblick auf Reifbildungsvorgänge als auch verschiedener Abtaumethoden bei Luftkühlern in einem Kältekreislauf. Diese Erkenntnisse sollen in eine spätere Datenbasis fließen, die zur energieeffizienten Auslegung von Luftkühlerkomponenten dienen wird.

Das WSA übernimmt hierbei die Entwicklung eines numerischen Simulationsmodelles. Das EBC ist verantwortlich für den Aufbau eines Abtauprüfstand zur Validierung der Simulationsergebnisse. Hierzu wurde bereits in einer vorhergegangenen Masterarbeit von Helmlinger eine Kälteanlage geplant und in Betrieb genommen. Der Luftkühler ist hierbei in einer Klimakammer platziert, in der unterschiedlichste Raumbedingungen eingestellt werden können. Die Luftkühler können getauscht werden, um verschiedene Wärmetauscher-Varianten testen zu können.

Diese Masterarbeit umfasst, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, die Arbeitspakete *Aufbau* (bzw. *Opti-*

mierung) eines Prüfstandes und Ermitteln von Messdaten.

Das Arbeitspaket *Aufbau (bzw. Optimierung) eines Prüfstandes* unterteilt sich in

- ▷ Optimierung des Kältekreislaufes: Umsetzung der Verbesserungsvorschläge aus der Masterarbeit von HELMLINGER
- ▷ Entwicklung und Bau eines Wägesystems zur Messung und Bestimmung des 2D-Schwerpunktes der Eismenge im Luftkühler
- ▷ Entwicklung und Implementierung einer Speicher-Programmierbaren-Steuerung (SPS) zur Steuerung, Regelung des Kältekreislaufes und Auswertung des Wägesystems in Echtzeit.
- ▷ Auslegung der Regelparameter für verwendete PID-Regler

Am Ende der Masterarbeit und nach erfolgreichen Abschließen des ersten Arbeitspaketes wird das zweite Arbeitspaket *Ermitteln von Messdaten* durchgeführt. Das setzt sich aus folgenden Punkten zusammen:

- ▷ Durchführung von Reifbildungsversuchen
- ▷ Durchführung von Abtauversuchen mittels verschiedener Abtaumethoden
- ▷ Ermittlung der Reproduzierbarkeit der durchgeführten Versuche.

3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen für diese Arbeit erläutert. Zuerst wird in Abschnitt ?? die thermodynamischen Grundlagen vorgestellt, um dann in Abschnitt 3.2 näher auf die kältetechnischen Grundlagen einzugehen.

3.1 Thermodynamik

In diesem Kapitel wird in Abschnitt 3.1.1 die Thermodynamik des Kaltdampf-Kälteprozess näher beschrieben, um danach die Thermodynamik der feuchten Luft in Abschnitt 3.1.2 und die Entstehung von Eiskristallen in Abschnitt 3.1.3 zu erklären. Zum Schluss des Kapitels werfen wir einen Blick auf die Morphologie von Eiskristallen und ihre physikalischen Eigenschaften.

3.1.1 Kaltdampf-Kälteprozess

Ein Verdampfer hat die Aufgabe einer Umgebung Energie in Form von Wärme zu entziehen. Hierfür wird in einem Wärmeübertrager flüssiges Kältemittel verdampft. Das verdampfende Kältemittel kühlt zunächst den Wärmeübertrager, danach wird über die Wärmeübertrager-Lamellen der vorbeiströmende Luft Wärme entzogen. Der Kaltdampf-Kälteprozess ist ein linksläufiger *Clausius-Rankine-Kreisprozess*. Die Zustandspunkte des verwendeten Kältemittels im $\ln p, h$ Diagramm sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

Das halb-logarithmische Diagramm ist ein vielgebrauchtes und hilfreiches Mittel in der Kältetechnik-Branche.¹ Im Diagramm 3.1 ist der Druck logarithmisch auf der y-Achse und die spezifische Enthalpie h auf der x-Achse eingetragen. Die Siedelinie ist durch $x = 0$ und die Taulinie durch $x = 1$. Zwischen $0 \leq x \leq 1$ befindet sich das Nassdampfgebiet. Es liegt ein Gemisch aus gasförmigen und flüssigem Kältemittel vor. Der Anteil des Gases im Nassdampfgebiet wird durch x ausgedrückt, $1 - x$ den Anteil der Flüssigkeit.

In dem Diagramm 3.2 sind alle Zustandspunkte bei einem Durchlauf des Kältekreislaufes abgebildet. Innerhalb des Nassdampfgebietes verläuft in einem idealen Kältekreislauf, eine Zustandsänderung *isotherm* und *isobar* ab. Wärmezufuhr oder -abfuhr führt nicht zu einer Erhöhung der Temperatur,

¹Das Zustandsdiagramm wurde vom deutschen Ingenieur Richard Mollier (1863-1935) im Jahre 1924 erstmalig vorgestellt.

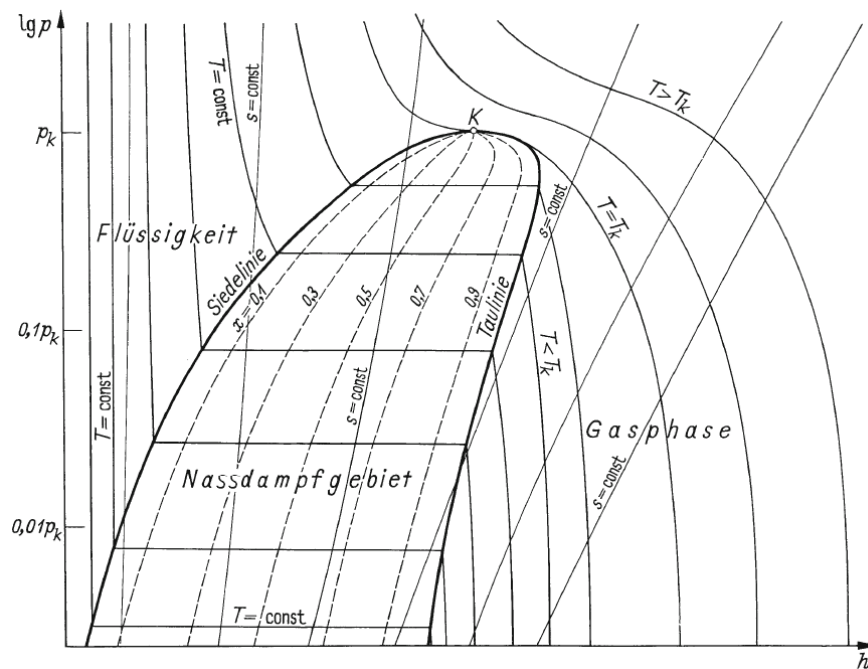


Abbildung 3.1: ln p,h-Diagramm von einem reinen Fluid [Baehr, 2013]

sondern zu einer Veränderung vom Gas- bzw. Flüssigkeitsanteil. Es wird von einer *latenten*, also nicht fühlbaren, Wärmeänderung geredet. Um einen Tropfen flüssigen Wasser, dessen Zustand sich auf der Siedelinie befindet, in einen gasförmigen Zustand, sprich $x = 1$ zu überführen, muss ihm die spezifische Verdampfungsenthalpie Δh zugeführt werden. Verläuft die Zustandsänderung entgegengesetzt kondensiert der Tropfen und gibt die Verdampfungsenthalpie Δh an seine Umgebung ab. Außerhalb des Nassdampfgebietes führt eine Wärmezufuhr oder -abfuhr zu einer Veränderung der Temperatur. Die Wärmeänderung ist *sensibel*.

In einem Kaltdampfprozess, sprich ohne Verluste durch Reibung, finden folgende vier Teilprozesse statt:

- 1 \rightarrow 2 Kompression des dampfförmigen Kältemittels unter der Zuführung von elektrischer Leistung P_{KM}
- 2 \rightarrow 3 Abkühlung, Kondensation und Unterkühlung des Kältemittels unter der Abgabe der Wärmeenergie \dot{Q} über den Verflüssiger an die Umgebung
- 3 \rightarrow 4 Entspannung des flüssigen Kältemittels durch das Drosselventil; teilweise setzt die Verdampfung des Fluids ein
- 4 \rightarrow 1 Verdampfung des noch flüssigen Kältemittels auf niedrigem Druckniveau unter der Aufnahme des Wärmestromes \dot{Q}_0 aus dem Kühlraum

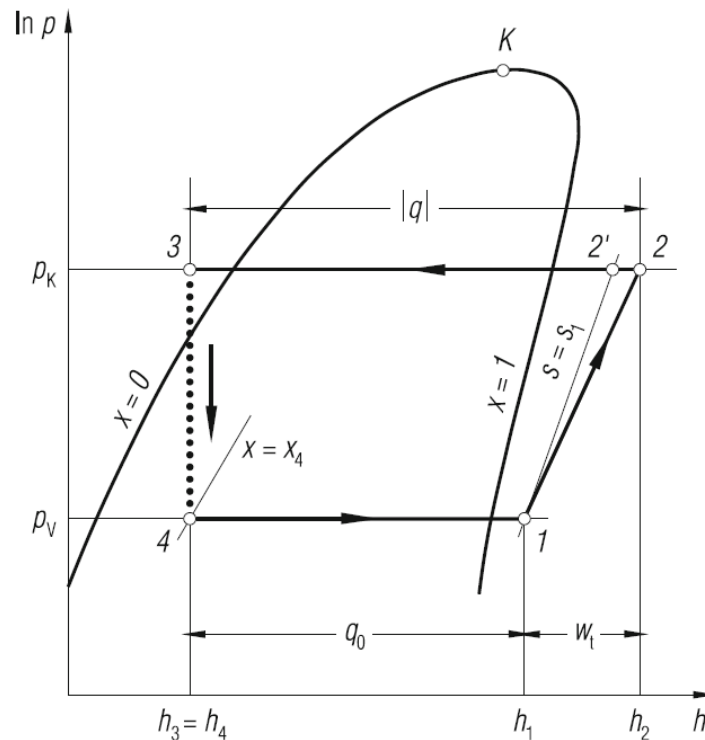


Abbildung 3.2: Kreisprozess im $\ln p, h$ -Diagramm [Baehr, 2013]

Der Prozess findet auf zwei Druckniveaus statt: dem Verdampfungsdruck p_V und dem Kondensationsdruck p_K . Die Verflüssigung des Kältemittels findet auf hohem Druckniveau und die Verdampfung auf niedrigem Druck statt. Die höchste Temperatur wird nach der Kompression am Zustandspunkt 2 erreicht; er befindet sich im Überhitzen- und Hochdruckbereich. Die niedrigste Temperatur ist kurz nach dem Drosselventil und vor dem Verdampfer am Punkt 4, auf niedrigem Druckniveau.

Nach dem Anwenden des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik, die Erhaltung der Energie in einem System, auf den Kältekreislauf folgt die Gleichung :

$$|\dot{Q}| = \dot{Q}_0 + P_{KM}. \quad (3.1)$$

Die elektrische Antriebsleistung der Kältemaschine ist die aufgenommene elektrische Leistung durch den Kompressor zwischen den Zustandspunkten 1 und 2. Sie ergibt sich zu:

$$P_{KM} = \dot{m} w_t = \dot{m} (h_2 - h_1) = \frac{\dot{m}}{\eta_{sV}} (h_2' - h_1). \quad (3.2)$$

Hierbei ist η_{sV} der isentrope Wirkungsgrad des Kompressors. Der isentrope Wirkungsgrad setzt den

realen Kältekreislauf in ein Verhältnis zum idealen Kältekreislauf. Die Überhitzung des Gases am Austritt des Kompressors ist höher als die Überhitzung nach einer isentropen Verdichtung. Daraus folgt eine höhere Energieaufnahme durch den Kompressor und ein höherer Wärmestrom \dot{Q} , der über den Verflüssiger an die Umgebung abgegeben werden muss. Der isentrope Wirkungsgrad ist definiert über

$$\eta_{sV} := \frac{h_{2'} - h_1}{h_2 - h_1}. \quad (3.3)$$

Der Wärmestrom \dot{Q} wird über den Verflüssiger zwischen den Zuständen 2 und 3 abgeführt. Die Formel von \dot{Q} lautet:

$$\dot{Q} = \dot{m} q_0 = \dot{m} (h_3 - h_2) < 0. \quad (3.4)$$

Der Wärmestrom \dot{Q} ist immer kleiner als Null; er wird dem Kreislauf folglich entzogen.

Über ein Drosselorgan wird das Kältemittel vom hohen Druckniveau auf das niedrigere Druckniveau entspannt. Der Teilprozess findet zwischen den Zustandspunkten 3 und 4 statt und wird als *isenthalp* angenommen.

Die Kälteleistung \dot{Q}_0 , sprich den aus dem Kühlraum zu entnehmender Wärmestrom, ergibt sich aus dem Kältemittel-Massenstrom \dot{m} und den spezifischen Enthalpien der Zustände 4 und 1 :

$$\dot{Q}_0 = \dot{m} q_0 = \dot{m} (h_1 - h_4). \quad (3.5)$$

Die Bewertung einer Kälteanlage erfolgt durch die Leistungszahl ϵ_{KM} :

$$\epsilon_{KM} := \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{Antriebsleistung}} = \frac{\dot{Q}_0}{P_{KM}}. \quad (3.6)$$

Ziel bei der Auslegung und dem Betrieb einer Kältemaschine ist eine möglichst große Leistungszahl zu erlangen. Damit ϵ_{KM} groß wird, muss die Kälteleistung \dot{Q}_0 groß werden und die aufgewandte Verdichterleistung P_{KM} klein werden.

3.1.2 Feuchte Luft

Bei dem Kühlprozess durch einen Verdampfer kommt es zwischen dem Wärmeübertrager und der feuchten Luft verschiedenen thermodynamischen Phänomenen. Die auftretenden Phänomene lassen sich in folgende Gruppen einordnen:

- ▷ Abkühlung der feuchten Luft
- ▷ Wassertropfenbildung auf Lamellenoberfläche
- ▷ Kristallbildung auf Lamellenoberfläche. (siehe Abschnitt 3.1.3)

In diesem Abschnitt wird zunächst die Thermodynamik der feuchten Luft thematisiert.

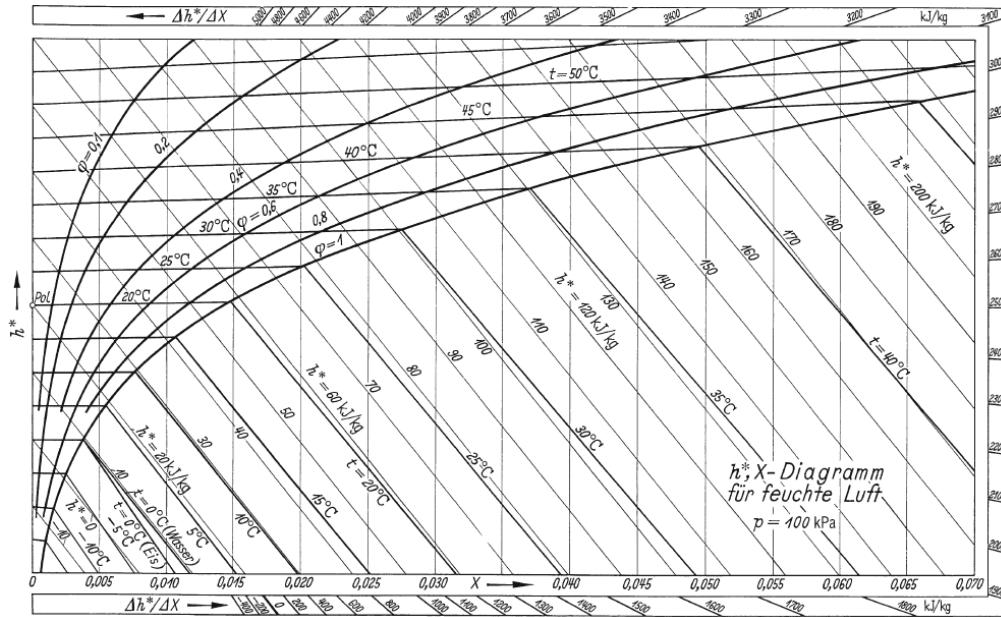


Abbildung 3.3: h^* , X -Diagramm für feuchte Luft bei einem Gesamtdruck $p = 100$ kPa [Baehr, 2013]

Bei dem Wärmeentzug durch den Verdampfer wird zunächst die noch nicht gesättigte feuchte Luft abgekühlt. Luft besitzt die Eigenschaft eine bestimmte Menge Wasser aufnehmen zu können. Warme Luft kann mehr Wasser aufnehmen als kalte Luft. Das Verhältnis von der aufgenommenen Masse Wasser zur Masse Luft ist definiert als Beladung:

$$X = \frac{m_W}{m_L}. \quad (3.7)$$

In dieser Formel bezieht sich m_W auf gasförmige, flüssige oder feste Form von Wasser und m_L auf die Masse der trockenen Luft. X kann werden zwischen 0 für trockene Luft und ∞ für reines Wasser annehmen. In der Regel bleibt X jedoch kleiner als 0,1.

Die absolute Feuchte ist definiert als das Verhältnis von Masse des Wasserdampfers m_W zum eingenommen Volumen V der feuchten Luft. Die Formel lautet:

$$\varrho := \frac{m_W}{V} = \frac{p_w}{R_W T}. \quad (3.8)$$

Die relative Feuchte φ ist das Verhältnis der absoluten Feuchte im Verhältnis zur Maximalwert oder Sättigungswert der absoluten Feuchte:

$$\varphi := \frac{\varrho}{\varrho_W^s}. \quad (3.9)$$

Wird nun in die Gleichung 3.7 die relative Feuchte aus Gleichung 3.9 eingesetzt, ergibt sich eine weitere Formel für die Beladung X .

$$X = \frac{m_W}{m_L} = 0,622 \frac{p_W^s}{p/\varphi - p_W^s}. \quad (3.10)$$

Hierbei ist p_W^s der Partialdruck des Sättigungspunktes. Betrachtet man nur die Wasserdampfbeladung der Luft, so lässt sich feststellen, dass die maximale Menge an aufzunehmenden Wasser einen Grenzwert hat. Dieser Grenzwert wird Sättigungswert der Wasserdampfbeladung genannt und ist eine Funktion abhängig von der Temperatur und dem Druck. Sie berechnet sich nach dem Gesetz von Dalton zu :

$$X_s(T, p) = 0,622 \frac{p_W^s}{p - p_W^s}. \quad (3.11)$$

Bei der Abkühlung von feuchter Luft kann der Fall eintreten, dass $X > X_s$ ist. Sprich die Beladung der trockenen Luft ist größer als das alles im Wasserdampf aufgenommen werden kann. Der erste Tropfen Kondensat bildet sich und Wasser fällt aus. Es ergibt sich eine Kondensationsmenge von:

$$\Delta X m_L = (X - X_s) m_L. \quad (3.12)$$

Die Wassermenge $X_s m_L$ ist gasförmig von der trockenen Luft gespeichert. Die Kondensationsmenge $\Delta X m_L$ setzt sich nun an Keimpunkten in der Umgebung ab oder wird als Nebel aus der Gasphase ausgeschieden. Keimzellen für Wassertropfen können zum Beispiel Verunreinigungen oder raue Oberflächen sein. Das höchste treibende Potential für eine solche Keimzelle hat der kälteste Punkt im System. In unserem Anwendungsfall ist das der Wärmeübertrager des Verdampfer. Da der Verdampfer zur Bereitstellung der Kälteleistung und einer funktionierenden Wärmeübertragung stets eine Temperaturdifferenz zwischen dem Kältemittel und der vorbei strömenden Luft bereitstellt, bilden sich hier die ersten Tropfen. Je nach ursprünglicher Beladung der Luft bilden sich die Tropfen eher am Anfang oder Ende des Wärmeübertrager. War die feuchte Luft schon vor dem Eintritt in den Wärmeübertrager bereits stark gesättigt, bilden sich Tropfen am Eingang der Lamellen. [Danfoss GmbH, 2006]

Die feuchte Luft überträgt beim Durchströmen des Luftkühlers durch die Kondensation auf der Lamellenoberfläche Wärme an dieselbige. Der übertragene Wärmestrom ausgehend von der Luft ist formelmäßig gegeben mit:

$$\dot{Q} = \dot{m}_L(c_{pL}\Delta T + h_v\Delta X) \quad (3.13)$$

An der Formel 3.13 lässt sich erkennen, dass die Kondensation von Wasser auf dem Wärmeübertrager zunächst einen positiven Effekt auf die Luftkühlung hat. Es wird mehr Wärme von der Luft auf das Kältemittel übertragen. Bei der Kondensation wird neben der sensiblen Wärme zusätzlich latente Wärme abgegeben. Der latente Teil der Wärme, die Verdampfungsenthalpie h_v , ist durch den zweiten Term in der Formel gegeben.

Gefriert das Kondensat zusätzlich erhöht sich der Term der latenten Wärme um die Schmelzenthalpie h_s . Die Formel für den übertragenden Wärmestrom lautet in diesem Falle:

$$\dot{Q} = \dot{m}_L(c_{pL}\Delta T + (h_v + h_s)\Delta X) \quad (3.14)$$

[Grote u. Feldhusen, 2014] [Baehr, 2013]

3.1.3 Reif- und Eisbildung

Liegt die Oberflächentemperatur auf dem Wärmeübertrager des Verdampfers nicht nur unter dem Taupunkt der feuchten Luft sondern auch unter dem Gefrierpunkt, kann es zum Gefrieren der kondensierten Tropfen und/oder zur Desublimation von Wasserpartikel auf der Oberfläche kommen. Dieser Abschnitt soll einen Überblick über diese zwei thermodynamischen Phänomene geben. Da in dieser Arbeit nicht der Reifbildungsprozess im Hauptfokus steht, sondern der technische Aspekt der Abtauung, wird der Eisbildungsprozess hier nur kurz erläutert.

In der Literatur gibt es zahlreiche Quellen, die sich mit der Reif- bzw. Eisbildung auseinander setzen. Die Quellen beschreiben den Kristallbildungsprozess sowohl aus der rein theoretisch Sicht als auch simulationsrelevanten und technischen Überlegungen und Untersuchungen. Der scheinbar triviale Prozess von der Bildung eines Eiskristalles auf einer Oberfläche und sein weiteres Wachstumsverhalten ist sehr komplex und Gegenstand zahlreicher aktueller und schon abgeschlossener Forschungsprojekten.

Neben den theoretischen Grundlagen wird in der Arbeit von SCHYDLO ein Simulationsmodell für den Reifbildungs- und Abtauprozess auf einem Rohr entwickelt. Zudem sind bisherigen Arbeiten zu der Thematik in [Schydlo, 2010] aufgelistet und zusammengefasst. Praktische Untersuchungen

sowie Versuchsaufbauten zum Thema der Vereisung von Luftkühler werden in HILFIKER und K. KO-SOWSKI beschrieben. In den Arbeiten wurden die Vereisungs- und innovative Abtauungsprozesse von einer CO₂-Wärmepumpe, die zur Heizung von Passivhäuser eingesetzt wird, untersucht.

Es gibt zahlreiche Einflussgrößen die auf den Prozess und die Form des Eiskristalls und späteren Reif einwirken. Die wichtigsten Einflussgrößen sind die Luftgeschwindigkeit, die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Oberflächentemperatur und die Zeit. Um eine den Reif charakterisieren zu können, werden folgende Größen zur Hilfe genommen die Reifdicke, die Reifdichte, die Porösität und die Wärmeleitfähigkeit.

In der Arbeit von HAYASHI aus dem Jahre 1977 wird der Eiskristallwachstum in drei Phasen unterteilt:

1. Eindimensionales Kristallwachstum
2. Reifschichtwachstumsphase
3. Vergletscherung.

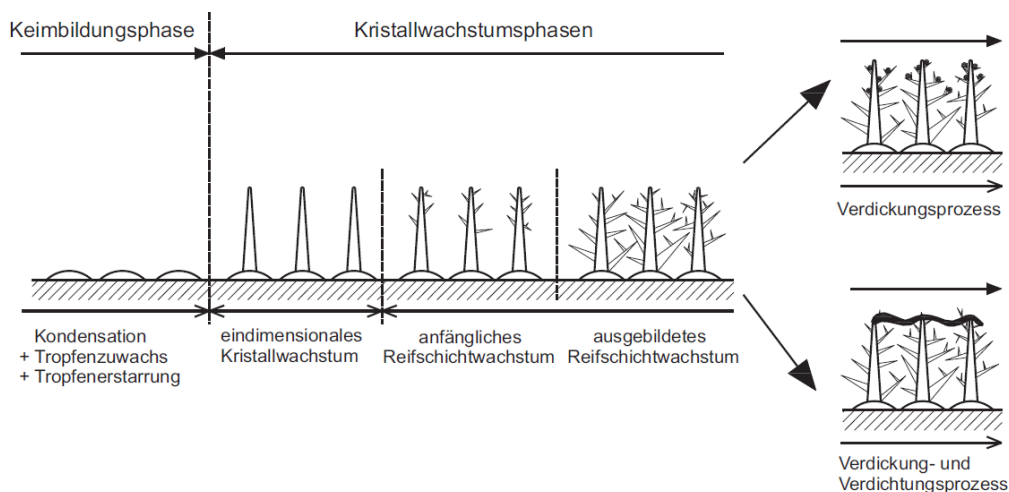


Abbildung 3.4: Kristallwachstum auf einer ebenen Oberfläche [Schydlo, 2010]

In Abbildung 3.4 sind die drei Kristallwachstums-Phasen nach HAYASHI sowie die vorhergehende Keimbildungsphase, , eingeführt in [Hilfiker, 2004], dargestellt.

Keimbildungsphase

In der Keimbildungsphase bilden sich zunächst Wassertropfen auf der Lamellenoberfläche, die trotz Temperaturen kleiner als der Gefrierpunkt nicht erstarren, sondern wachsen zu größeren Tropfen an. Je kleiner die Unterkühlung desto größer werden die Tropfen bevor sie erstarren und in die erste Kristallwachstumsphase übergehen.

Eindimensionales Kristallwachstum

Die erste Phase ist gekennzeichnet durch Kristallwachstum senkrecht zur Oberfläche und mit einheitlicher Wachstumsgeschwindigkeit. Dies führt zu einer erhöhten Rauigkeit aufgrund der sich stetig vermehrenden Kristalle.

Reifschichtwachstumsphase

In der zweiten Phase beginnt das dreidimensionale Wachstum. Die Kristalle fangen an sich miteinander zu verästelnd. Ein poröses Kristallgitter entsteht. Aufgrund des Wärmeleitwiderstandes, der mit der Reifdicke steigt, erhöht sich die Oberflächentemperatur der Reifschicht. Desweiteren kommt es zu einem Massenstrom innerhalb der Reifschicht, ausgelöst durch Diffusion. Die Diffusion rührt aus den Konzentrationsunterschiede zwischen der Lamelle und der Reifoberfläche. Der Wassermassenstrom läuft in das poröse Kristallgitter und gefriert dort in Nähe der Lamelle. Die Dichte der Reifschicht steigt und mit ihr der Wärmewiderstand. Dies führt zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur der Reifschicht und schließlich zur Überschreitung des Gefrierpunktes von Eis. Die Spitzen des Kristalle schmelzen und es bildet sich Kondensat. Die dritte Wachstumsphase beginnt.

Vergletscherung

Das flüssige Wasser läuft aufgrund der Kapillarwirkung der Kristalle in die Zwischenräume des Kristallgitters und gefriert dort wieder. Die Kristallgitter werden dichter und kompakter. Dies führt zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit der Reifschicht. Es wird von einer Vergletscherung gesprochen. Die Oberflächentemperatur der Reifschicht sinkt erneut und fällt erneut unter den Gefrierpunkt. Nun kann die feuchte Luft erneut an der Oberfläche des Reifs desublimieren. Der Prozess wiederholt sich solange bis das Eis so kompakt ist, dass kein weiteres Kondensat mehr in die Reifschicht eindringen kann.

Physikalische Eigenschaften von Eiskristallen

Im vorangegangem Abschnitt 3.1.3 wurden die einzelnen Bildungsphasen von Eiskristallen beschrieben. In diesem Abschnitt wird auf die Eigenschaften von Eiskristallen eingegangen und wie sie sich während eines Vereisungsvorganges eines Luftkühlers verändern.

Gefriert ein Tropfen Wasser und wird zum Eiskristall, so verändern sich die physikalischen Eigenschaften des Tropfens. In der Arbeit von SCHYDLO verdeutlichen zunächst zwei Diagramme, abgebildet in 3.5, wie sich die Reifdicke und die Reifdichte während eines Vereisungsvorgang verändern.

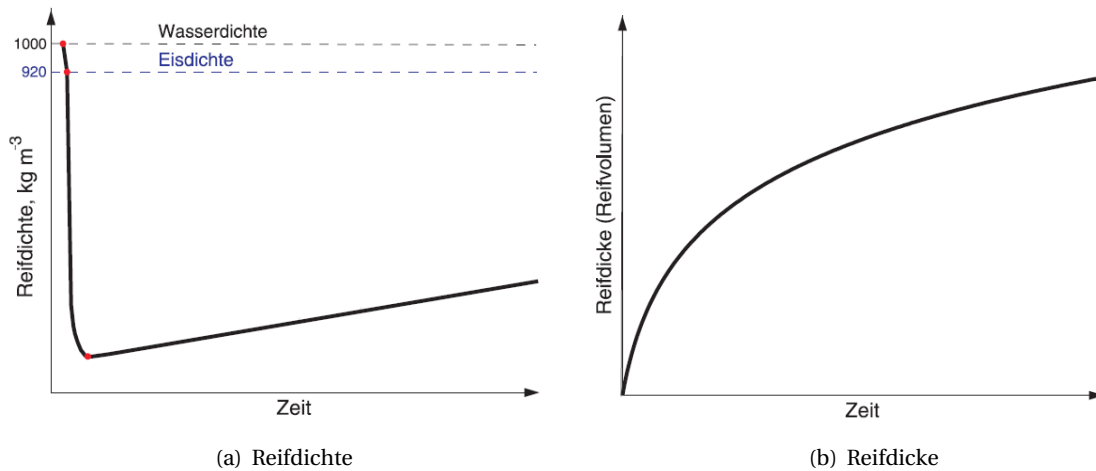


Abbildung 3.5: Schematischer Reifdichte- und Reifdickeverläufe beim Vereisungsvorgang eines Tropfen Wassers [Schydlo, 2010]

Da Diagramm 3.5(a) zeigt den Dichteverlauf aufgetragen über die Vereisungszeit. Die Dichte eines Tropfens fällt beim Gefrieren von 1000 kg/m³ auf 920 kg/m³ sinkt. Danach tritt das in Abschnitt 3.1.3 beschriebene eindimensionale Wachstum ein, sodass die Reifdichte bis auf ein Minimum fällt. Danach tritt die dreidimensionale Wachstumsphase und dann die Vergletscherungsphase ein. Die Dichte steigt jetzt langsam aber kontinuierlich wieder an.

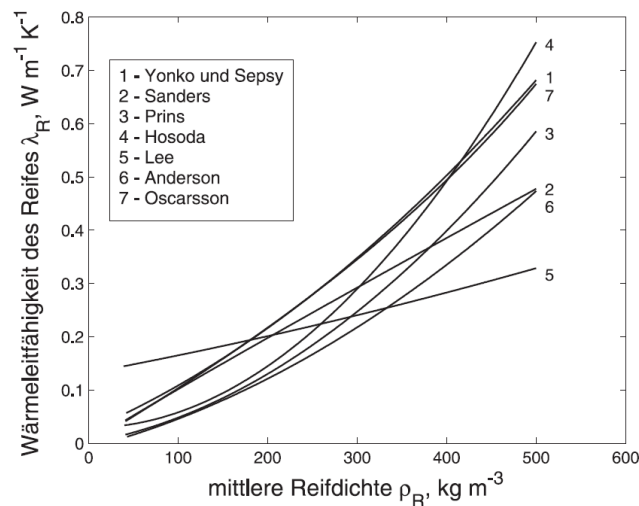


Abbildung 3.6: Wärmeleitfähigkeit des Reifs aufgetragen über die mittlere Reifdichte [Schydlo, 2010]

Im 3.5(b) ist der Reifdickenverlauf aufgetragen. Aus diesem lässt sich entnehmen, dass kurz nach Beginn die zeitliche Änderung der Reifdicke maximal ist. Das heißt, dass der Massenstrom an Kon-

densat, das sich an der Lamelle absondert und dann gefriert, am Anfang am größten ist. Die tritt in der Phase des eindimensionalen Wachstums auf. Beim dreidimensionalen Wachstum und späteren Vergletscherung flacht die Kurve ab und strebt gegen einen Sättigungswert.

Mit der Reifdicke verändert sich wiederum die Wärmeleitfähigkeit des Reifes, abgebildet in 3.6. In dem Diagramm sind mehrere Berechnungsmodelle aufgetragen, die die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der mittleren Reifdicke abbilden. Alle Modelle sagen einen Anstieg von λ mit steigender Reifdicke voraus. Dies hängt mit der Verdichtung des Eises während der Vergletscherungsphase zusammen. Die führt dazu, dass Reif mit einer geringen Dichte gleichzeitig als sehr guter Isolator fungiert. [?] [K. Kosowski, 2009]

3.2 Kältetechnik

Die Kältetechnik wird in verschiedensten Einsatzgebieten eingesetzt, um Kälte zu erzeugen bzw. einem definierten Raum Energie in Form von Wärme zu entziehen.

Das Konservieren von Lebensmittel ist der ursprüngliche Hauptzwecke der Kältetechnik und ist auch heute noch aktuell. Bereits 3000 Jahre v. Chr. nutzten die Ägypter und Mesopotamier Natureis, um ihre Nahrungsmittel länger haltbar zu machen.[Danfoss GmbH, 2006]

Im Jahre 1834 meldete der US-Amerikaner Jacob Perkins sein Patent zum Thema Kältetechnik in England an. Das Patent beschreibt eine Kaltdampfmaschine in einem geschlossenen Kreislauf mit dem feuergefährlichen Äthyläther als Kältemittel.[Siemens Schweiz AG, 2007]

Carl von Linde baute nach konstruktiven Verbesserungen der Kaltdampfmaschine und Verwendung von Ammoniak als Kältemittel im Jahre 1876 die erste praxistaugliche Kälteanlage. Die ersten Anlagen wurden durch die Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg gebaut und an Brauereien sowie später auch an die Schifffahrt vertrieben.

Mit steigender Bedeutung von Elektrizität als Energieträger nach dem 1. Weltkrieg nahm auch die Entwicklung und der Bedarf an Kälteanlagen zu. Im Jahre 1920 startet die Firma *General Electric* mit der Serienherstellung von Haushaltskühlschränken mit Hermetik-Verdichtern.

Das vielseitige Gebiet der Kältetechnik umfasst alle Technologien, die zur Bereitstellung von Kälteenergie dienen. Sie unterscheiden sich in der benötigten zuzuführenden Energien, Einsatzbereich und eingesetzten Kältemitteln. Zu den wichtigsten und heute meist verwendeten Technologien gehören folgende Technologien

- ▷ Kompressions-Kälteprozess: *Prozess wird angetrieben durch Zufuhr mechanischer Energie*
- ▷ Sorptions-Kälteprozess: *Prozess wird angetrieben durch Zufuhr von Wärmeenergie*
- ▷ Linde-Verfahren.

Weitere nicht so weitverbreitete Technologien der Kältetechnik, jedoch technisch interessante Verfahren sind zB. das *Wirbelrohr*, *Magnetische Kühlung* oder das Kühlen mittels einem Peltier-Element. Diese Verfahren werden meist nur unter hohem Energieverbrauch in Sonderfällen angewandt. [Grote u. Feldhusen, 2014]

Da sich diese Masterarbeit mit dem Aufbau eines Prüfstandes zur Untersuchung von Abtaumethoden einer Kompressionskälteanlage beschäftigt, wird in den folgenden Kapitel ausschließlich auf diese Technologie eingegangen. Für weitere Informationen bezüglich der anderen Technologien sei an dieser Stelle auf die Literatur [Baehr, 2013], [Grote u. Feldhusen, 2014] und [Grote u. Feldhusen, 2014] verwiesen.

3.2.1 Komponenten eines Kaltdampfprozesses

Die Komponenten für einen einfachen Kaltdampfprozess besteht aus vier Komponenten:

- ▷ der Kompressor
- ▷ der Verflüssiger
- ▷ das Drosselventil Expansionsventil
- ▷ der Verdampfer.

In Abbildung 3.7 sind die vier Komponenten mit ihren Zustandspunkten dargestellt.

Der Kompressor

Der Kompressor bildet das Herzstück der Kälteanlage. Er verdichtet das gasförmige Kältemittel von niedrigem Druck auf ein höheres Druckniveau. Um diese Arbeit zu verrichten, wird der Verdichter mit elektrischer Energie versorgt. Der Kompressor gibt es in verschiedenen Bauvarianten. Die zwei wichtigsten Bauvarianten sind der *Hubkolbenverdichter* und der *Rotationskolbenverdichter*. Die Baugruppen der Verdichter werden in offene, halbhermetische und vollhermetische Verdichter unterschieden. Schrauben-, Scroll- sowie Turboverdichter sind Bauarten der *Rotationskolbenverdichter*.

Ein wichtiges Kriterium bei Verdichtern ist das Druckverhältnis von Ansaugdruck, vor der Kompression, und dem Ausgangsdruck. Das Druckverhältnis π ist definiert als:

$$\pi := \frac{p_{aus}}{p_{ein}}. \quad (3.15)$$

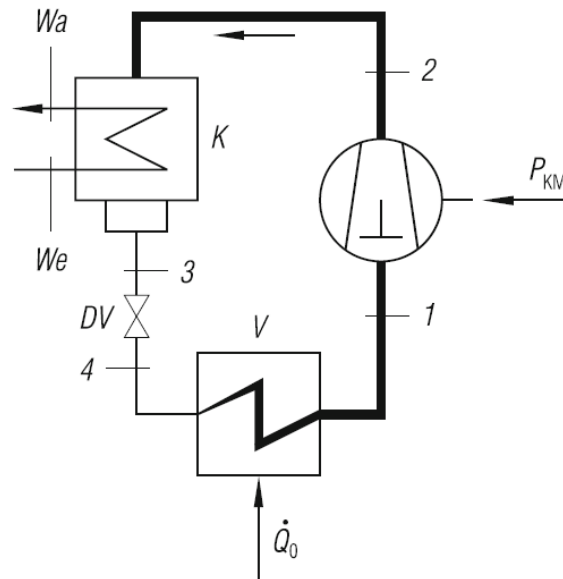


Abbildung 3.7: Einfacher Kältekreislauf [Baehr, 2013]

Der Verflüssiger

Dem Kältemittel wird im Verflüssiger auf einem hohen Druckniveau Wärme entzogen. Der Verflüssiger kühlt das überhitzte, gasförmige Kältemittel ab. Beim Austritt aus dem Verflüssiger ist das Kältemittel meist vollständig kondensiert. Um einen Wärmeentzug zu bewerkstelligen gibt es drei Bauarten:

- ▷ Wassergekühlte Verflüssiger
- ▷ Luftgekühlte Verflüssiger
- ▷ Verdunstungsverflüssiger

Wassergekühlte Verflüssiger können, aufgrund der besseren Wärmeübertragung verglichen zu Luft, sehr kompakt gebaut werden. Eine typische Bauform ist das *Bündelrohrverflüssiger*. In der Praxis werden am häufigsten luftgekühlte Verflüssiger eingesetzt. Um die gleiche Kühlleistung wie ein wassergekühlter Verflüssiger zu erreichen, werden Lamellen und Ventilatoren eingesetzt. Die Lamellen vergrößern die Fläche für die Wärmeübertragung mit der Luft. Ventilatoren ermöglichen durch einen höheren Luftdurchsatz und der daraus resultierendem höhere Wärmeübertragung eine größere Kühlleistung und eine kompaktere Bauform der Wärmeübertragers. Diese Variante hat den Vorteil, dass die einen wartungsfreien Betrieb sowie eine einfache Reinigung ermöglicht.

Das Expansionsventil

Das Expansionsventil versorgt den Verdampfer mit dem nötigen Kältemittel-Massenstrom. Die Zuführung des Kältemittels erfolgt über eine Druckdifferenz. Durch eine lokale Verengung des Strömungsquerschnitts, verringert sich der Druck des durchfließenden Kältemittels. Das Kältemittel vergrößert sein Volumen und es kommt zur Expansion. Die Druckreduzierung erfolgt ohne zusätzliche Arbeit. Im idealen Fall wird bei diesem Prozess auch keine Wärme abgeführt; der Prozess ist *isenthalp*. Das Expansionsventil trennt zusammen mit dem Kompressor die zwei Druckseiten des Kältekreislaufes. Es gibt Expansionsventile sowohl als regelbare und nicht regelbare Ausführungen. Bei kleineren Anlagen erfolgt die Expansion unregelt zum Beispiel durch Kapillarrohre. Geregelte Expansionsventile werden in mittleren und großen Kälteanlagen eingesetzt. Die Regelung erfolgt durch die Querschnittsänderung und dem damit einhergehendem Druckabfall.

Der Verdampfer

In dem Verdampfer wird das Kältemittel eingespritzt. Das Kältemittel verdampft und entzieht seiner Umgebung dabei Wärme. Aufgrund der vielfältigen Anforderungen an Verdampfer, gibt es eine Vielzahl an Bauarten für Verdampfer. Mögliche Bauarten sind

- ▷ Glattrohrverdampfer
- ▷ Beripptes Verdampferregister
- ▷ Rippenrohrverdampfer

Um eine möglichst große Kälteleistung zu ermöglichen, werden wie beim Verflüssiger auch, Ventilatoren eingesetzt. Die Ventilatoren erzwingen einen Luftstrom durch den Verdampfer und erhöhen damit die Wärmeübertragung zwischen der Luft und den Verdampferrohren.

3.2.2 Abtaumethoden

Um einen vereisten Luftkühler abzutauen, gibt es mehrere Methoden. Die Methoden unterscheiden sich in der Installation, Schnelligkeit, Effizienz und Effektivität. Je nach Einsatzbereich und Anlage wird entschieden welche Abtaumethode installiert und eingesetzt wird. Mehrkosten für die Installation sowie weitere Betriebskosten sind bei der Entscheidung stets ein nicht zu vernachlässigender Punkt. Die in der Praxis am weit verbreitesten Methoden sind die *Heißgas-Abtauung*, *Prozessumkehrung*, *elektrische Abtauung* und *Umluft-Abtauung*.

Die Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile der jeweiligen Abtaumethode.

Heißgas-Abtauung

Die Heißgasabtauung wird durchgeführt indem das Heißgas aus dem Kompressor anstatt in den Verflüssiger direkt in den vereisten Verdampfer leitet. Für diese Methode wird eine Bypass-Leitung von dem Austritt vom Verdichter bis zum Eingang des Expansionsventil gelegt. Mittels zwei Drei-Wegeventilen kann diese Leitung geöffnet bzw. geschlossen werden. In der Abtauphase ist der Verflüssiger vom Kreislauf ausgeschlossen, damit kein flüssiges Kältemittel in den Verdampfer fließt. [Baehr, 2013] Der Prozess läuft in 3 Schritten ab:

- 1 → 2 Kältemittel-Verdichtung durch den Kompressor unter Aufnahme elektrischer Energie
- 2 → 3 Isenthalpe Entspannung durch das Expansionsventil
- 3 → 1 Wärmeabgabe an Rohre, Lamellen und das Eis.

In Abbildung 3.8 ist der rechtsläufige Kreisprozess in einem $\ln p, h$ - Diagramm für das Kältemittel R290 abgebildet.

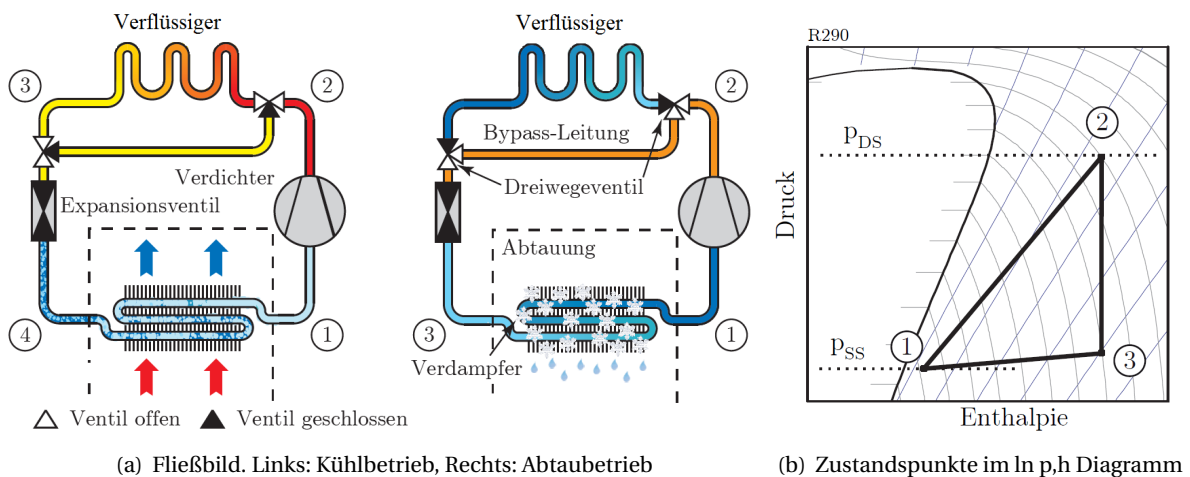


Abbildung 3.8: Heißgas-Abtauung [K. Kosowski, 2009]

Prozessumkehrung

Bei der Abtauung durch Prozessumkehrung wird die Funktion der Wärmeübertrager vertauscht. Während des Abtauprozesses fungiert der Verdampfer als Verflüssiger und der Verflüssiger hat die Aufgabe des Verdampfers inne. Die Prozessumkehrung wird in der Regel durch ein Vierwegeventil gewährleistet. Das Vierwegeventil wird bei der Abtauung geschaltet und leitet das Kältemittel nach dem Kompressor erst in den vereisten Verdampfer. Das überhitzte Kältemittel durchströmt den Verdampfer auf hohem Druckniveau und gibt Wärme an die Rohre und Lamellen des Luftkühlers sowie an das Eis ab.

Die Versuchsalage, die in dieser Arbeit optimiert worden ist, ist mit dieser Technologie ausgestattet. Der Umkehrprozess wird näher im Kapitel 5 erläutert.

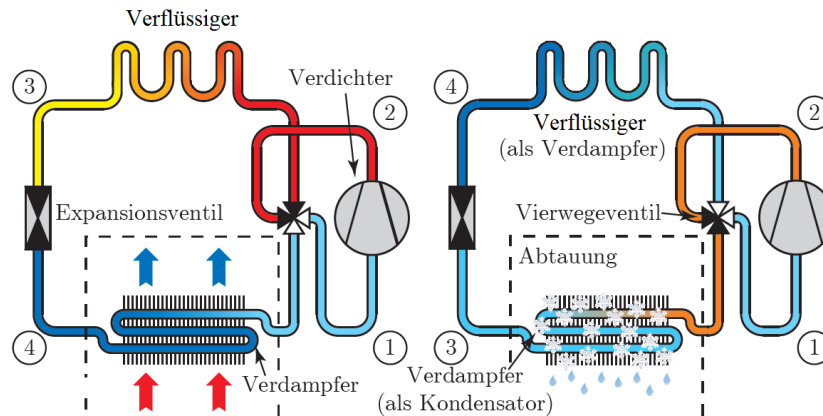


Abbildung 3.9: Links: Kühlbetrieb. Rechts: Heißgas-Abtauung [K. Kosowski, 2009]

Elektrische Abtauung

Eine weitere Möglichkeit der Abtauung ist die elektrische Abtauung. Bei dieser Methode sind Widerstandsheizungselemente in den Wärmeübertrager des Verdampfers installiert. Die Widerstandsheizung wandelt elektrische Energie in thermische Energie um, und überträgt diese weiter an den Wärmeübertrager und das Eis.

Das Prinzip der Widerstandsheizung beruht auf einem niedrig ohmigen Widerstand, der von Strom durchflossen wird und sich dabei erhitzt. Die Widerstandsheizung, auch Heizpatronen genannt, können in Reihe oder auch parallel geschaltet werden. Bei der Erhitzung Die abfallende elektrische Spannung über einen Heizwiderstand errechnet sich nach dem Ohmschen-Gesetz zu :

$$U = RI \quad (3.16)$$

Hierbei ist R der spezifische Widerstand des eingesetzten Material, meistens Metalle, und I die angelegte Stromstärke. Ein Heizwiderstand hat einen Wirkungsgrad von 100 % und wandelt somit die komplette elektrische Leistung in thermische um:

$$\dot{Q}_{th} = P_{el} = UI = \frac{U^2}{R} = RI^2 \quad (3.17)$$

Die thermische Leistung ist folglich proportional zu der angelegten Spannung U . Die Widerstände sind über die Spannung U regelbar. Der Wärmeübergang von den Heizpatronen auf den Wärme-

übertrager ist entscheidend für ein effizientes Abtausystem. Je formschlüssiger die Heizpatronen in den Verdampfer installiert sind, desto besser der Wärmeübergang und effizienter die Abtauung. Die Versuchsanlage dieser Arbeit ist auch mit dieser Abtautechnologie ausgestattet.

Umluft-Abtauung

Die Umluft-Abtauung ist eine weitere in der Praxis häufig verwendete Abtaumethode. Hierbei wird der Verdampfer durch die vorbeiströmende Umluft abgetaut. Um dies zu ermöglichen muss zum einen der Ventilator in der Abtauphase laufen und zum anderen die Umgebungstemperatur größer als 0 °C sein. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Wärmeübertragung luftseitig geschieht und dadurch die zuzuführende Wärme nicht zusätzlich das Material des Verdampfers erhitzen muss.

Diese Abtaumethode wird in der Arbeit nicht näher untersucht. Deswegen wird an dieser Stelle auf die Literaturquellen [Breidenbach, 2014] und [Ehrbar, 2002] verwiesen.

Tabelle 3.1: Vor- und Nachteile der verschiedenen Abtaumethoden [Breidenbach, 2014], [Institute of Refrigeration, 2000], [H.-J. Yin et al., 2012], [Huang u. a., 2009]

Abtaumethode	Vorteile	Nachteile
Heißgas-Abtauung	<ul style="list-style-type: none"> • Guter Wärmeübergang zwischen Heißgas, Rohre und Eis • Unkomplizierte Wartung • Kurze Abtaudauer • Schnelles Wiederanfahren möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Höherer Planungs- und Installationsaufwand • Zusätzliche Kühlung des Kompressors in Abtauphase ist erforderlich • Höhere Druckverluste durch zusätzliche Komponenten • kritische Kältemittel-Menge bestimmt durch Abtauleistung
Prozessumkehrung	<ul style="list-style-type: none"> • Guter Wärmeübergang zwischen Heißgas, Rohre und Eis • Unkomplizierte Wartung • Kurze Abtaudauer • geeignet für Verbund-Systeme 	<ul style="list-style-type: none"> • Abtropfwanne ist nicht beheizt • Höherer Planungs- und Installationsaufwand • Nicht nachrüstbar • Höhere Druckverluste durch zusätzliche Komponenten • Kritische Kältemittel-Menge bestimmt durch Abtauleistung
Elektrische Abtauung	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Komponenten und Installation • <i>Stand-Alone</i>-System ist nachrüstbar • Hohe Regelgenauigkeit • Abtropfwanne ist beheizbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Schlechter Wärmeübergang • Verursacht Kältemittelbewegung in den Sammler • Brandgefahr im Falle von Kabelbruch • Zeitliche Verzögerung beim Abtauprozess • Hohe thermische Belastung der Komponenten
Umluft-Abtauung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine zusätzlichen Komponenten nötig • Günstig • Keine zusätzlicher Wärmeeintrag ins System • Keine Abtauung der Abtauwanne möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei überdimensionierten Kompressoren sehr hohe Abtaudauer möglich • Funktioniert nur mit Umgebungstemperaturen über 2°C

3.3 Federn

Der Einsatzbereich von Federn ist genau so vielfältig wie die verschiedenen Bautypen, Größen und Werkstoffen. Je nach Funktion können Feder können zug-, druck-, torsion- oder biegebeansprucht werden. Die Hauptfunktionen umfassen die Gewährleistung des Kraftflusses und der Kraftverteilung, Speicherung von Energie, Ausdehnungsausgleich, Dämpfungssysteme oder Schwingungssysteme. Federn werden charakterisiert durch ihre Feder-Kraft-Kennlinie bzw. Moment-Verdrehwinkel-Kennlinie.

In dieser Arbeit wurde eine rechteckige Blattfeder dimensioniert, gefertigt und als Teil eines Wägesystems kalibriert, siehe Abschnitt 5.2. Deshalb werden in diesem Abschnitt nur auf biegebeanspruchte, rechteckige Blattfedern näher eingegangen.

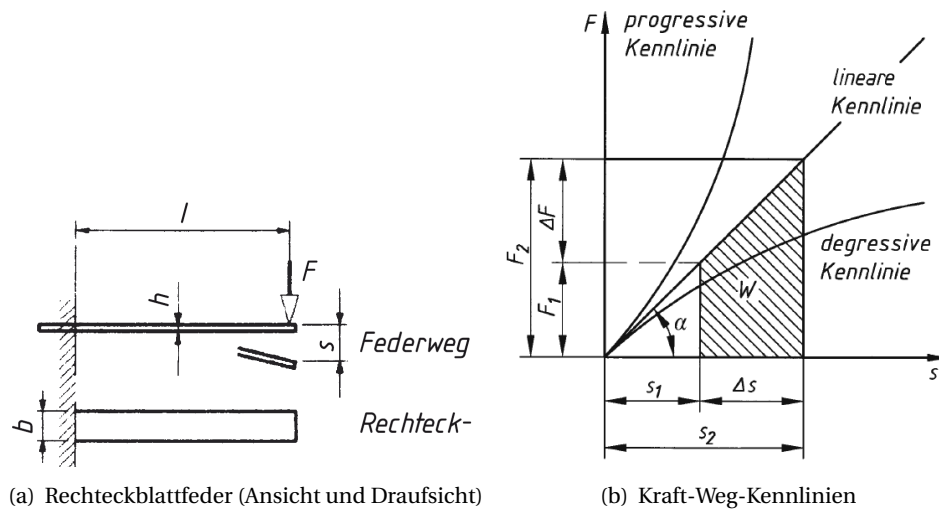


Abbildung 3.10: Blattfeder und Feder-Kennlinien [Wittel u. a., 2011]

Die Abbildung 3.10(a) zeigt das Prinzip einer einseitig eingespannten, rechteckigen Blattfeder und 3.10(b) drei unterschiedliche Kraft-Weg-Kennlinien. l ist die Länge von der Einspannung bis zum Angriffspunkt der Kraft F . h ist die Höhe und b die Breite der Feder. Der Federweg s resultiert aus der Verformung der Feder durch die Belastung mit der Kraft F .

Eine rechteckige Blattfeder verhält sich bei Zunahme der belastenden Kraft F , wie die *lineare Kennlinie* im Diagramm aufzeigt. Die Kraft F und der Federweg s sind zu einander proportional. Eine Verdoppelung der Kraft zieht gleichzeitig eine Verdoppelung des Federweges nach sich. Die meisten eingebauten Federn verfügen über eine solche lineare Kennlinie.

Die aufgenommene Arbeit W ist die Arbeit einer mit F_1 vorgespannten Feder, die zusätzlich zu F_1 mit ΔF belastet wird. Die gesamte Kraft beträgt $F_2 = F_1 + \Delta F$. Durch die zusätzliche Kraft verbiegt

sich die Feder um Δs von s_1 auf s_2 . Die aufgenommene Arbeit W und in Abbildung 3.10(b) markierte Fläche errechnet sich zu :

$$W = \frac{1}{2}(F_1 + F_2)\Delta s. \quad (3.18)$$

Die Federrate R ist das Verhältnis von der belastender Kraft F zum Federweg s :

$$R = \tan(\alpha) = \frac{\Delta F}{\Delta s} \quad (3.19)$$

Wie Abbildung ?? zeigt, haben harte Federn eine höhere Federrate. Weiche Feder besitzen hingegen eine kleinere Federrate.

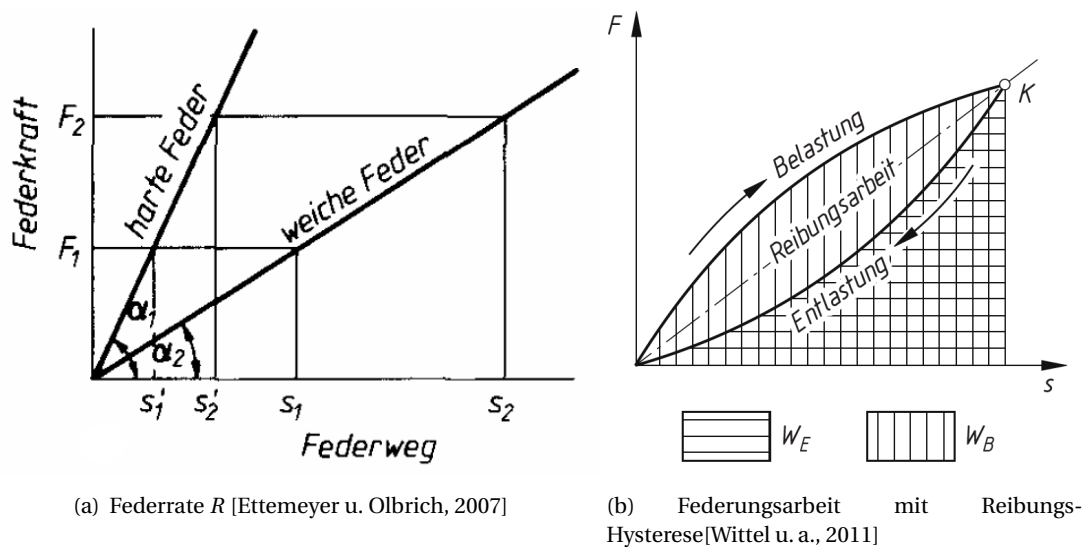


Abbildung 3.11: Federrate und -wirkungsgrad

Die Biegespannung σ_b ist das Verhältnis von der Feder aufzunehmendes Biegemoment M zum Widerstandsmoment W . Die Formel für die Biegespannung lautet:

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{6Fl}{bh^2}. \quad (3.20)$$

Die maximale Biegespannung ist vom eingesetzten Material und von dem Federtyp abhängig. Die Formel lautet:

$$\sigma_{b,zul} \approx 0,7 \cdot R_m. \quad (3.21)$$

Die Sicherheit für die Feder ist definiert als Verhältnis aus der der maximal zulässigen Biegespannung und maximal auftretenden Biegespannung:

$$S := \frac{\sigma_{b,zul}}{\sigma_{b,max}}; \quad (3.22)$$

Für rechteckige Blattfeder ergibt sich für den Federweg s am Ende der Feder zu:

$$s = 4 \frac{l^3}{bh^3} \frac{F}{E}. \quad (3.23)$$

Hierbei ist E das Elastizitätsmodul des verwendeten Werkstoffes.

Der Federwirkungsgrad jeder realen Feder ist kleiner als 1. Innere und äußere Reibung führen dazu, dass die zur Belastung aufzuwendende Arbeit W_B größer ist als die Arbeit zur Entlastung W_E der Feder, siehe Abbild 3.11(b). Die Formel für η_F lautet:

$$\eta_F = \frac{W_E}{W_B}. \quad (3.24)$$

Die Auslegung für die verwendete Feder erfolgt im Abschnitt 5.2. Für weitere Literatur zum Thema Federn wird auf die Litatur [Wittel u. a., 2011] und [Ettemeyer u. Olbrich, 2007] verwiesen.

4 Stand der Technik

Diese Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik im Bezug auf:

- ▷ Untersuchungen zur Eisbildung auf Luftkühlern
- ▷ Abtaumethoden und -messungen von Luftkühlern.

5 Versuchsaufbau

Diese Kapitel beschreibt den Versuchsauf

5.1 Kältetechnischer Aufbau

In diesem Abschnitt werden die Teilsysteme des kältetechnischen Aufbaus vorgestellt. Der komplette kältetechnische Aufbau besteht aus der Kälteanlage(KA) mit dem Verdampfer-Prüfling und der Klimakammer(KK), in der der Prüfling lokalisiert ist und unter verschiedenen Umgebungsbedingungen getestet werden kann.

Kälteanlage(KA)

Die Auslegungsdaten der KA sind in Tabelle 5.3 dargestellt. In Abbildung 5.1 ist das Fließschema der KA dargestellt.

Die Hauptkomponenten der Kälteanlage sind der Kompressor, der Verflüssiger, der Verdampfer und der Abtau-Verdampfer. Der Verflüssiger kondensiert im Kühlbetrieb das überhitzte Kältemittel vollständig und der Abtauverdampfer verdampft das Kältemittel im Abtaubetrieb durch Prozessumkehrung, bevor es zurück in den Kompressor gesaugt wird. Der Verdampfer ist gleichzeitig der Prüfling, den es zu untersuchen gilt. Der Verdampfer ist durch die vorgesehenen Absperrventile austauschbar. Diese Vorrichtung ermöglicht unterschiedliche Bautypen von Verdampfer zu testen.

Zwischen den Zustandspunkten 1 und 2 erfolgt die Verdichtung und Überhitzung des Kältemittels. Danach gelangt das Kältemittel in den Ölabscheider, der einen großen Teil des Öls vom Kältemittel trennt und zurück zur Schmierung des Verdichters führt. Vor und nach dem Kompressor sind sowohl zur Energie-Bilanzierung als auch zwecks Anlagenschutz Temperatur- und Drucksensoren installiert. Dieser Vorgang ist im Abtau- und Kühlbetrieb identisch.

Das Kältemittel, das aus dem internen Wärmeübertrager Richtung Kompressor gesaugt wird, passiert zunächst den Tropfenabscheider. Der Tropfenabscheider stellt sicher, dass kein noch flüssiges Kältemittel in den Kompressor eindringt. Dies hätte verheerende Folgen für den Kompressor und wird genauer in Abschnitt 5.4.4 des Anlagenschutzes beschrieben.

Tabelle 5.1: Leistungsdaten Kälteanlage

Systemparameter	Kälteanlage(KA)
Kältemittel	R134a
Verdampfungstemperatur	-8,0 °C
Verdampfungsdruck(abs)	2,17 Bar
Verflüssigungstemperatur	40,2 °C
Verflüssigungsdruck(abs)	10,23 Bar
Sauggastemperatur	2 °C
Verdichtungstemperatur	72,4 °C
Kälteleistung	11,2 kW
Verflüssigungsleistung	15,3 kW
Leistungsaufnahme	4,07 kW
Kälteleistungszahl	2,74
Massenstrom	0,077 kg/s
max. Leistung der Lufterwärmer	2x 20 kW
max. Befeuchtungsleistung	12 g/h
max. Kühlleistung	10 kW
min. Temperatur	16,3 °C
Steuer- und Regelungstechnik	TWINCAT 3/ VB.NET
Hart echtzeitfähig	Ja

In der KK findet der Verdampfungsprozess statt. Neben dem Verdampfer ist hier das Expansionsventil und die Versorgungsmimik installiert. Die Versorgungsmimik erlaubt 3 verschiedene Durchströmungswege durch den Verdampfer. Die Abbildung 5.2 sind die Varianten mit den Magnetventilstellungen abgebildet.

Kühlbetrieb, Zustandspunkte: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 2' \rightarrow 3' \rightarrow 3'' \rightarrow 3''' \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1'$

Im Kühlbetrieb strömt das flüssige, unterkühlte Kältemittel nach dem Verflüssiger erst in den Sammler. Danach überträgt es Wärme zwischen den Zustandspunkten $3''$ und $3'''$ an das aus dem Verdampfer kommende verdampfte Kältemittel. Am Zustandspunkt 3 befindet sich der Massensensor und ein Schauglas. Im **Kühlbetrieb** wird das Kältemittel durch das Expansionsventil entspannt und nochmal kurz vor dem Verdampfer durch eine Venturidüse ein weiteres Mal entspannt und eingespritzt.

Abtaubetrieb, Zustandspunkte: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1' \rightarrow 4 \rightarrow 3'' \rightarrow 3''' \rightarrow 3 \rightarrow 3' \rightarrow 2'$

Im Abtaubetrieb durch Prozessumkehrung fließt das Kältemittel, vom Verdampfer kommend, auch erst in den Sammler, um danach durch den internen Wärmeübertrager zum Massensensor zu

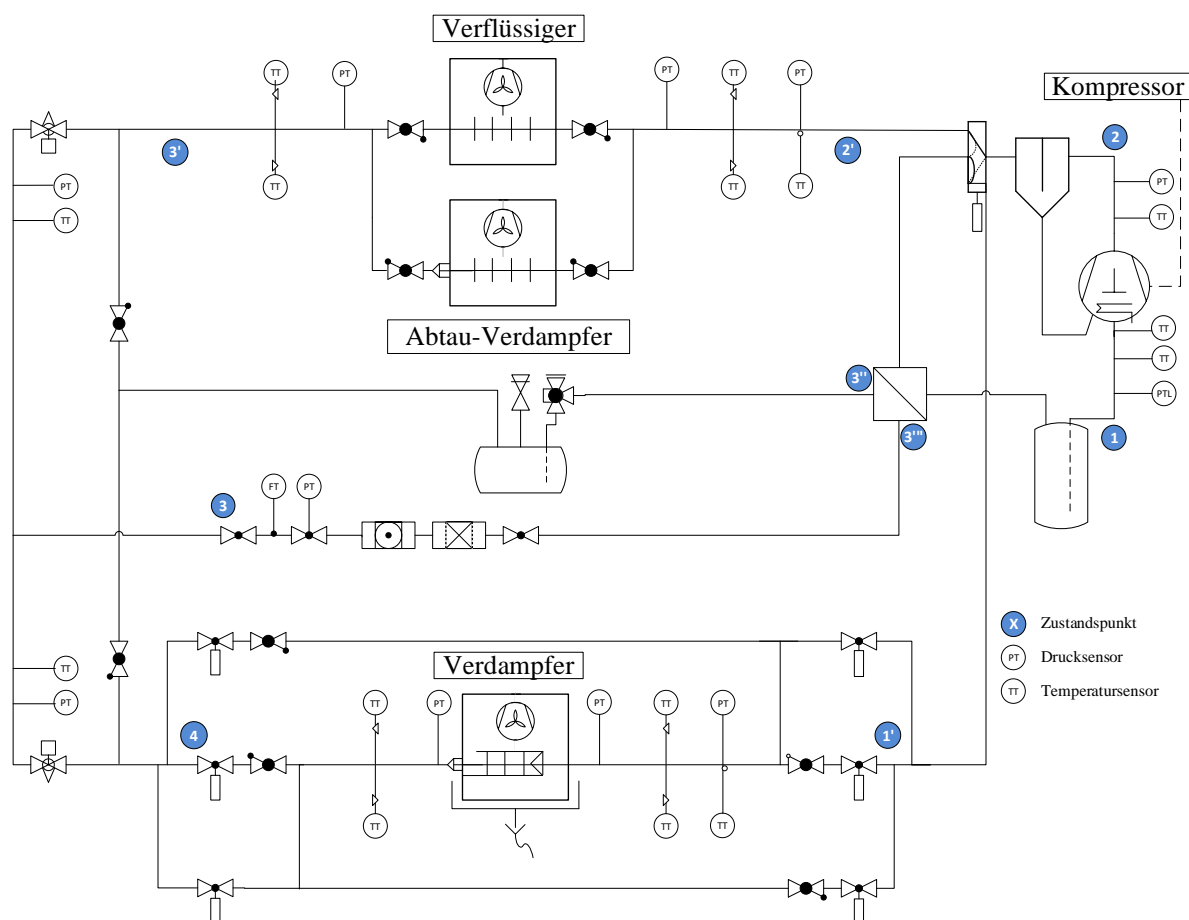


Abbildung 5.1: Kälteanlage(KA)-Fließbild

gelangen. Danach wird es über das Expansionsventil in den Abtau-Verdampfer eingespritzt. Rückschlagventile sind jeweils vor und nach einem Wärmeübertrager installiert. Rückschlagventile erlauben dem Kältemittel nur in eine Richtung zu fließen. Dies ermöglicht, dass im Abtaubetrieb das Kältemittel durch den Abtauverdampfer geführt wird und dort verdampft.

Im Abtaubetrieb durch Prozessumkehrung kann das Heißgas entweder durch die Venturidüse in den Verdampfer gelangen oder durch die Saugleitung ¹.

¹In dem weiteren Verlauf der Arbeit wird von Heißgaseintritt über die Venturidüse von *Oben* gesprochen, da der Wärmeübertrager aus 4 Rohrlamellen-Wärmeübertrager besteht und die Einspritzung stets im obersten, rechten Rohr geschieht. Von *Unten* wird hingegen benutzt um die Variante mit Eingang des Heißgases über die Saugleitung zu beschreiben, da die Saugleitung stets das unterste Rohr ist.

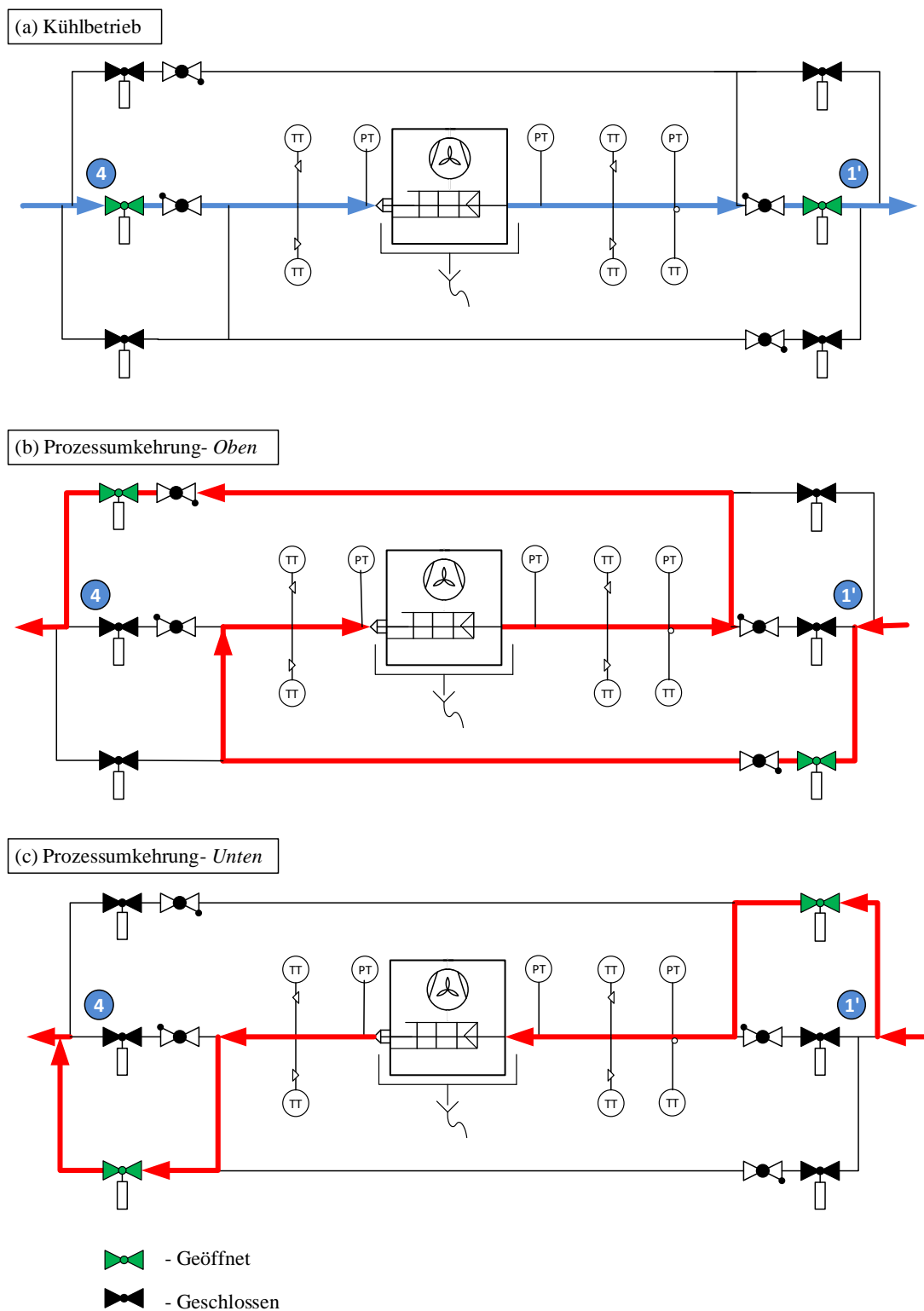


Abbildung 5.2: Mögliche Magnetventil-Schaltungen

Messtechnik

Die KA ist ausgerüstet mit drei Sensorenarten: Temperatur-, Druck- und Massenstromsensoren. Diese Sensoren dienen zur Bilanzierung der Wärmeübertrager und des Kompressors, spielen aber auch eine wichtige Rolle beim Anlagenschutz. In Tabellen 5.2 sind die Sensordaten aufgeführt.

Tabelle 5.2: Sensordaten-Übersicht

	Drucksensor	Temperatursensor	Massenstromsensor
Typ	PA 33 X	•	OPTIMASS 6400 C
Hersteller	KELLER AG	•	KROHNE Messtechnik GmbH
Messbereich	0..30 Bar(0..10 Bar)	•	0..400 kg/h
Messfehler[%]	0,01 (10..40°C) 0,1 (-10..80°C)	0,1	0,6
Kommunikationsart	RS-485	4..20 mA	RS-485
Abfragefrequenz	400 Hz	•	•
Hilfsenergie [V]	8..28	-	230
Anzahl	8	11	1

Klimakammer(KK)

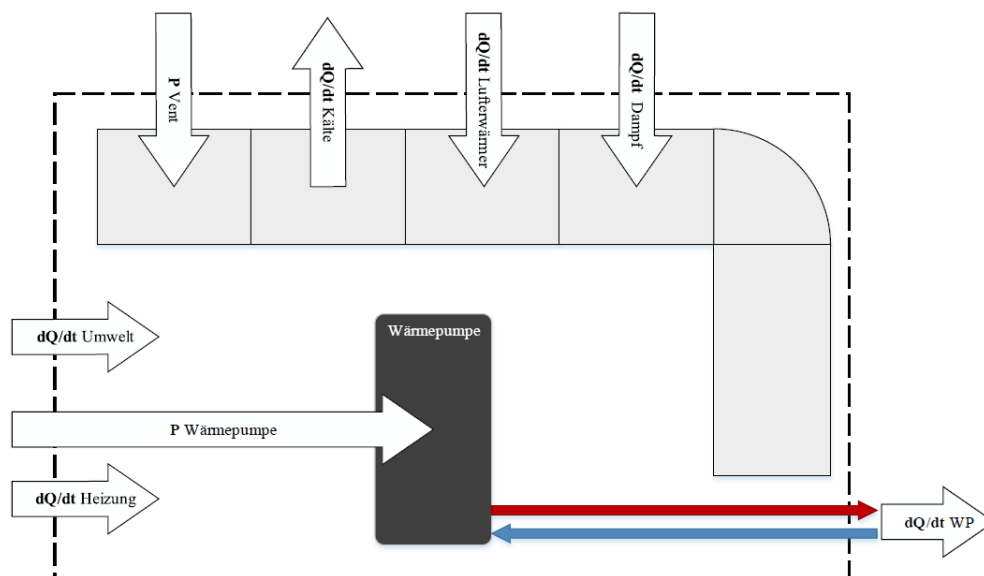


Abbildung 5.3: Wärmeströme in der Klimakammer [Nürnberg, 2015]

Die KK erlaubt es den Verdampfer und somit den Vereisungs- und Abtauprozess unter verschiedenen Abtaubedingungen zu untersuchen. Die KK ist als klassisches *Hardware in the Loop*. Die Kenn-
daten der KK sind in Tabelle 5.3. Die Abbildung 5.3 zeigt die Wärmeströme innerhalb der KK. Die
KK ist in der Lage eine stationäre Umgebungsbedingungen abzubilden. Es ist aber auch möglich in-
stationäre Situationen wie zum Beispiel Typtage oder -wochen nachzustellen. In der KK ist die Ver-
dampfereinheit mit der Kältemittelversorgungs-Mimik lokalisiert. Des Weiteren ist das Wägesystem
und die eingesetzten Waagen in der KK platziert.

Die KK ist konzipiert für Untersuchungen von Wärmepumpen und Kältemaschinen. Der Einsatz
der KK in Kombination mit einer klimatisierbaren Versuchshalle hebt die Reproduzierbarkeit von
Messungen. Die Bedingungen für Versuche können unabhängig von der Jahreszeit oder dem Ta-
gesklime konstant gehalten werden. So lassen sich Versuche mit verschiedensten Umgebungsbe-
dingungen ganzjährig durchführen. Die einzustellen Parameter sind die Temperatur und die Re-
lative Luftfeuchtigkeit(*RH*). Die KK wurde 2015 in Betrieb genommen und wird wie die KA auch
über eine SPS der Fa. Beckhoff geregelt und gesteuert. In dem KK-Projekt wurde von NÜRNBERG
beispielsweise die *StatusMaschine* eingeführt, auf der auch das Konzept der SPS der KA beruht,
siehe Abschnitt 5.4.

Die KK verfügt über Software-Schnittstellen mit Simulationssoftwares (zB. DYMOLA) und Daten-
banken (zB. MySQL). Die Kombination aus Simulator mit echter Hardware wird als *Hardware in*

the Loop bezeichnet. Diese Methode dient zum Testen und Absichern von eingebetteten Systemen, die noch in der Entwicklung sind oder sich in der Inbetriebnahme befinden. Die Vorteile dieser Methode liegt in der Verkürzung der Inbetriebnahmephase, Verringerung der Entwicklungskosten und das riskofreie Testen der Anlage in Grenzsituationen. [OPA, 2014]

Tabelle 5.3: Systemparameter der Klimakammer [Nürnberg, 2015]

Systemparameter	Klimakammer(KK)
Volumen	32,96 m ³
Oberfläche	74,4 m ²
Wandstärke	0,15 m
max. Volumenstrom	4000 m ³ /h
max. Leistung der Lufterwärmer	2x 20 kW
max. Befeuchtungsleistung	12 g/h
max. Kühlleistung	10 kW
min. Temperatur	16,3 °C
Steuer- und Regelungstechnik	TWINCAT 3/ VB.NET
Hart echtzeitfähig	Ja

5.2 Wägesystem

Während der Arbeit wurde ein Wägesystem Konzept entworfen und gebaut. Das Wägesystem hatte *konstruktive* als auch *messtechnische* Anforderungen zu erfüllen. Aufgrund wechselnder Verdampfer-Prüflinge und schneller Demontage des Prüflings inklusive Wägesystem aus der KK sollte das Wägesystem kompakt, mobil, für mehrere Verdampferhalterungen variabel und demontierbar sein. Messtechnische Anforderungen an das Wägesystem waren:

- ▷ Ermittlung des gesamten Eisgewichtes am Verdampfer
- ▷ Ermittlung des 2D-Schwerpunktes der Eismenge
- ▷ Automatisiertes Datenauslesen mittels der SPS, beschrieben im Abschnitt 5.4.

5.2.1 Messtechnik

Für das Wägesystem wurden 5 Waagen der Fa. KERN UND SOHN GMBH verwendet. Die Waagen kommunizieren mit der SPS per RS-232 Schnittstelle. Das Kommunikationsprotokoll ist das 22-bit Protokoll, dass auf dem ASCII-7 bit- Zeichenkodierung beruht. ². Die Kommunikation zwischen der

²**ASCII** steht für *American Standard Code for Information Interchange* und wurde im Jahre 1963 *American Standards Association* gebilligt. Es war bis 2007 die meist verbreiteste 7-bit-Zeichenkodierung im World-Wide-Web bis es von UTF-8 überholt wurde.

Waage und der SPS ist näher in 5.4 beschrieben und erläutert.

Das Wägeprinzip der eingesetzten Waagen beruht auf dem Dehnungsmessstreifen-Prinzip. Die Ablesegenauigkeit der Waagen korrelieren mit dem max. Wägebereich. Es wurde sich für den Waagentyp *PCD 10K0.1* der Fa. Kern und Sohn GmbH entschieden. Diese Waage kann jeweils bis 10 kg belastet und dann gewogen werden. Des Weiteren besitzt die Waage eine sehr genaue Ablesbarkeit. Da der Verdampfer auf vier Waagen stehen wird, die maximal mit 10 kg jeweils belastet werden können, muss die Konstruktion erstens die Eismenge gleichmäßig auf alle vier Waagen verteilen. Und Zweitens muss das Eigengewicht des Verdampfers mit der Konstruktion gehalten werden.

Tabelle 5.4: Waagendaten

	Waage
Typ	PCD 10K0.1
Hersteller	KERN UND SOHN GMBH
Messbereich	0..10 kg
Ablesbarkeit	100 mg
max. Luftfeuchtigkeit	80 %
min. Umgebungstemperatur	5 °C
max. Umgebungstemperatur	35 °C
Kommunikationsart	RS-232
Hilfsenergie	220-240 V
Anzahl	5

5.2.2 Konstruktion

Nach Entwicklungen von verschiedenen Konzepten und Prototypen wurde sich für ein Wägesystem mit vier eingespannten Stahlblätter als Blattfedern entschieden. Die Abbildung 5.5 zeigt die Federkonstruktion mit den auf die Feder wirkenden Kräften. Die Blattfeder ist mit einem Boschprofil verschraubt, dass die Lagerkräfte auf den Boden ableitet. An dem Ende der Blattfeder ist eine 10 mm Gewindestange mit zwei Muttern befestigt. Durch diese Muttern lassen sich bei der späteren Kalibrierung die Vorspannung einstellen. Am oberen Ende der Gewindestange ist die Standgerüst des Verdampfers befestigt. Da es vier Aufhängungs- bzw. Lagerpunkte gibt, wird ca. 1/4 der Gewichtskraft ($F_{\text{Verdampfer}}$) in jede Gewindestange eingeleitet. Am Fuß der Gewindestange ist eine 50x50x5 mm Eisenplatte mit einer zentrierten 10 mm Gewindebohrung befestigt. Über den Fuß findet die Gewichtsübertragung zwischen der Waage und dem restlichen System statt. Am Fuß selber wird zusätzlich ein 5 mm dicker Gummidämpfer angeklebt. Dieser beugt zum einen mögliche Verkratzungen und Eindellungen auf der Waagenoberfläche vor. Zum anderen bewirkt der Gummidämpfer eine minimale Dämpfung des ganzen Systems. Die Konstruktion sieht vor, dass der Fuß im

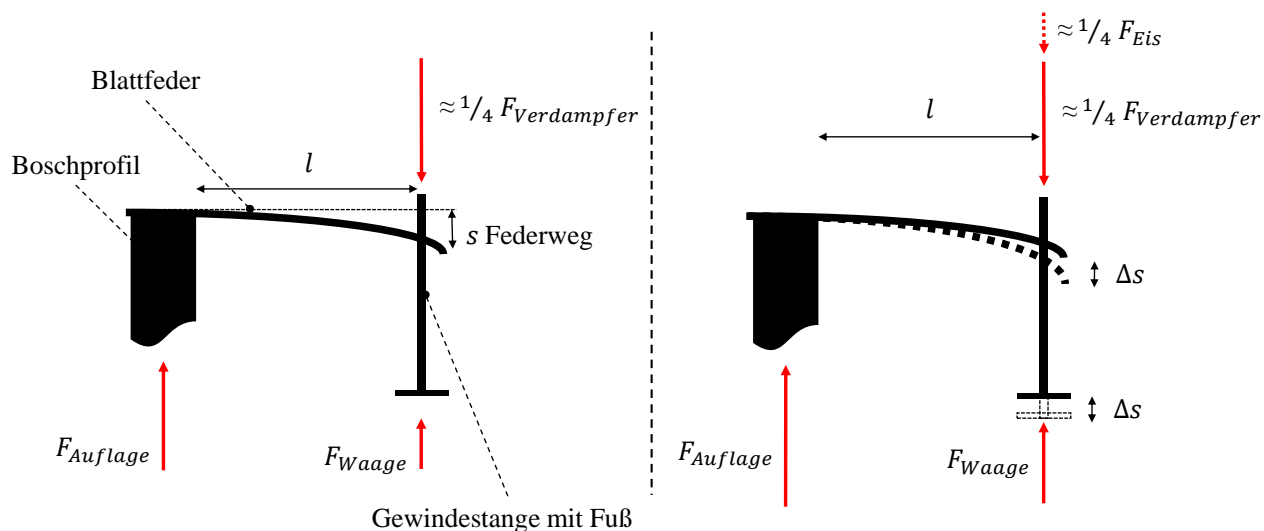


Abbildung 5.4: Federkonstruktion nach dem Prinzip des einseitig eingespannten Balkens

90°-Winkel auf der Waage aufliegt.

Die Blattfedern soll im Form einer Blattfeder gebaut sein, die über eine lineare Federkennlinie verfügen. Die Federn sollen in der Länge l verstellbar sein und nach dem Prinzip eines einseitig eingespannten Balkens fungieren, vgl. Abschnitt 3.3.

Tabelle 5.5: Feder-Daten

	Blattfeder
Werkstoff	Edelstahl
Elastizitätsmodul E	206 kN/mm^2
Höhe h x Breite b x Länge l	$5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 185 \text{ mm}$
Verdampfergewicht $F_{\text{Verdampfer}}/4$	$490,5 \text{ N}$
maximale Eismenge $F_{\text{Eis}}/4$	$24,5 \text{ N}$
F_{ges}	515 N

Die maximale Eismenge am Ende des Vereisungsvorgang wird zu 10 kg festgelegt. Der Verdampfer verfügt über ein Gesamtgewicht von 10 kg. Da 4 Waagen mit jeweils einer Blattfeder vorgesehen sind, werden für die Auslegung nur ein Viertel der gesamten Gewichtskraft berücksichtigt. Die Ge-

wichtskräfte ergeben sich zu:

$$F_{Verdampfer} = 1/4 \cdot 200 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 490,5 \text{ N}$$

$$\Delta F_{Eis} = 1/4 \cdot 10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 24,5 \text{ N}$$

$$F_{ges} = F_{Verdampfer} + \Delta F_{Eis} = 515 \text{ N}.$$

Die Federwege, nach Gleichung 3.23, je nach Belastung ergeben sich zu:

$$s(F = F_{Verdampfer}) = 9,65 \text{ mm}$$

$$s(F = F_{ges}) = 10,13 \text{ mm}$$

$$\Delta s(\Delta F_{Eis}) = 0,48 \text{ mm}$$

Die Federrate R ergibt sich zu:

$$R = \frac{24,5 \text{ N}}{1 \text{ mm}} = 24,5 \text{ N/mm}.$$

Die maximal auftretende Biegespannung ergibt sich bei F_{ges} zu $\sigma_{b,max} = 457,34 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Mit $R_m = 1000 \text{ N/mm}^2$, entnommen für Blattfedern aus TB 10-1 aus [Wittel u. a., 2011], ergibt sich $\sigma_{zul} \approx 0,7 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2 = 700 \text{ N/mm}^2$ als maximal zulässige Biegespannung. Daraus resultiert eine Sicherheit für die Blattfeder von:

$$S = \frac{700 \text{ N/mm}^2}{457,34 \text{ N/mm}^2} = 1,53. \quad (5.1)$$

Diese Berechnung gelten für den Einsatz einer einzelnen Feder ohne Waage. Die Kombination aus einer Blattfeder und einer Waage hat Einfluss auf die Federrate und so auf den resultierenden Federweg des Wägesystems. Die Federrate wird größer, sprich die Feder wird härter. Aus einer härteren Feder resultiert ein kürzerer Federweg Δs . In Abbildung ?? ist der verkürzte Federweg Δs_{F+W} für ein System aus Feder und Waage dargestellt. Es folgt $\Delta s_{F+W} < \Delta s_F$. Die resultierende Federrate für eine Feder-Waage-Kombination ergibt sich aufgrund einer Parallelschaltung zu :

$$R_{F+W} = R_F + R_W. \quad (5.2)$$

Die Federrate der Waage nicht bekannt. Eine gleichmäßige Verteilung des Verdampfersgewicht auf die vier Waagen könnte durch die Bestimmung der Durchbiegung aller Federblätter bestimmt wer-

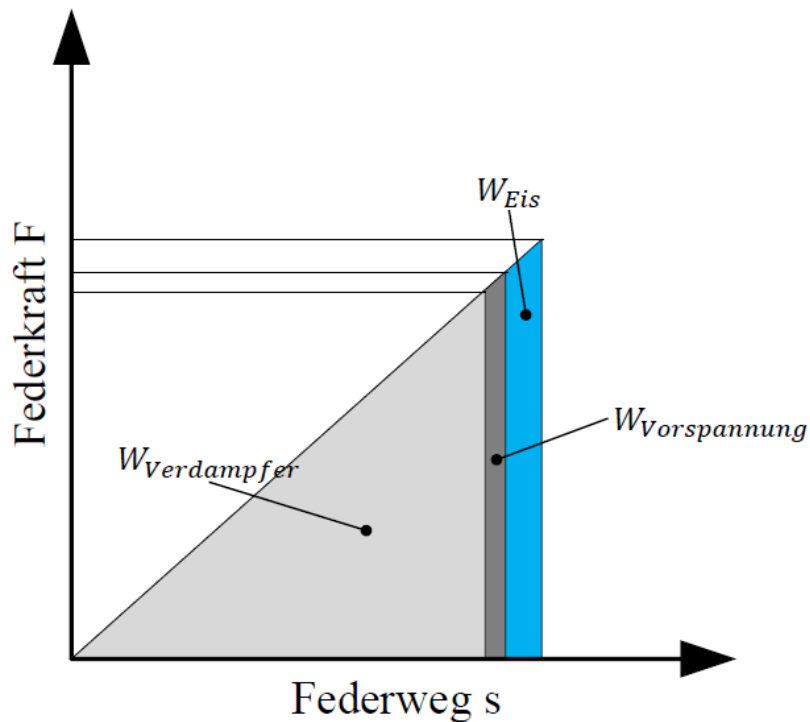


Abbildung 5.5: Federarbeit aufgeteilt auf Verdampfergewicht, Waagenvorspannung und Eismenge

den. Eine praktische Auslesung des Federweges s ist nicht vorhanden. Ungenaueres Bestimmen würde zu großen Fehlern führen. Eine Abweichung von $\pm 0,1 \text{ mm}$ zöge einen Messfehler von $\pm 0,5 \text{ kg}$ hinter sich. Zusätzlich kann noch keine Aussage über den Schwerpunkt des gefrorenen Eises im Verdampfer getroffen werden. Erste Versuche mit dem Wägesystem führten zu der Erkenntnis, dass die Federn sich bei der Einstellung der Vorspannung sehr stark gegenseitig beeinflussen.

Deshalb wird das Wägesystem und alle ihre Waagen vor jeder Messung kalibriert. Die Kalibrierung geschieht mit fünf Prüfgewicht an allen vier Waagen, siehe Abschnitt 6.2. Der Kalibrierungsprozess wird in die Software implementiert, siehe Abschnitt 5.4 für den informationstechnischen Aufbau.

5.3 Elektrischer Aufbau

Im Zuge der Arbeit wird die KA, die zuvor nur manuell betrieben werden konnte, vollständig auf eine SPS umgebaut. Zu berücksichtigen ist dabei die Hardware-Schaltschrank-Architektur des manuellen Betriebes. Für den manuellen Betrieb hatte die KA zwei Schaltschränke zur Versorgung der Komponenten mit der Hilfsenergie, sowie zur Ansteuerung der Magnetventile und des Vierwegeventils.

Um den Umbau auf eine SPS vollziehen zu können, ist es nötig, das elektrische Konzept für den manuellen Betrieb nachzuvollziehen, um gleiche Funktionalität und Sicherheit der KA im SPS-Betrieb gewährleisten zu können. Es wird versucht einen möglichst großen Anteil der Komponenten des manuellen Betriebes in das neue elektrische Konzept der SPS einzubinden. Nach dem Umbau wird die KA ausschließlich über die SPS bedienbar sein. Der manuelle Betrieb über Schalter wird nicht mehr möglich sein, jedoch wird es einen *Manuellen-Modus* im späteren informationstechnischen Konzept geben, siehe Abschnitt 5.4.

Das elektrische Konzept umfasst folgende Teilaspekte bzw. -funktionen:

- ▷ Auslesen von Sensoren
- ▷ Stellen von Aktoren
- ▷ Versorgung der Aktoren/Sensoren mit Hilfsenergie.

Das *Auslesen von Sensoren* umfasst das Auslesen von Temperatur, Druck, Massenstrom, Gewicht der Waagen sowie die Ventilöffnungen der Expansionsventile. Das *Stellen von Aktoren* besteht aus der Sollwertvorgabe für die Kompressor- und Verflüssigerventilatorumdrehzahl, elektrische Heizung sowie das An- und Ausschalten der Ventilatoren vom Verdampfer und Abtauverdampfer. Des Weiteren werden Magnet- und Vierwegeventile geschaltet. Die *Versorgung der Aktoren/Sensoren mit Hilfsenergie* gewährleistet einen sicheren Betrieb der KA und die Funktionalität der Komponenten.

Das elektrische Konzept sieht eine zentralisierte elektrische Installation vor. Für die KA sind sowohl Analoge Ein- und Ausgangssignale (0..10 V DC, 4..20 mA), Digitale Ausgangssignale (0...24 V DC). Diese Signale werden über maximal 10 m gesendet. Die Verwendung eines Buskopplersystem ist folglich nicht notwendig. Die meisten Signale werden jedoch nur über wenige Meter zu den benachbarten Schaltschränken gesendet. Hierbei ist mit keinen Problemen durch elektromagnetische Störungen zu rechnen.

Für das Auslesen der Sensoren, die maximal 20 m von dem SPS-Schaltschrank entfernt sind, wird ein Bussystem (MODBUS RTU) eingesetzt. Dieses Bussystem erlaubt es bis zu 32 Sensoren auf einer Entfernung von theoretisch 1000 m anzuschließen. Im Abschnitt 5.3.1 wird das Protokoll *Modbus RTU* und der elektrische Aufbau des Modbuses erklärt.

Die SPS besteht aus dem CPU-Grundmodul CX9020 sowie Busklemmen der Fa. Beckhoff. Die Busklemmen sind vom Typ E-Bus, die das firmeneigene Protokoll EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technolog) unterstützen. Das EtherCAT verfügt neben ihrer Echtfähigkeit (1.000 verteilte I/Os in 30 μ s [Bec, 2016]) auch über die Fähigkeit zur Einbindung von Standardethernet Komponenten und flexiblen Typologien. Bei einem E-Bus (ELxxxx) wird das Prozessabbild mittels des EtherCAT Protokolls, das abgeleitet vom Standard Ethernet Protokoll ist, bis an die jeweilige Busklemme übermittelt. Die Busklemme kann dann ihren Wert lesen bzw. schreiben. Dieses Verfahren erlaubt

äußerst geringe Zykluszeiten. Abbildung 5.6 zeigt exemplarisch das Grundmodul CX9020 und eine PT100-Temperatur-Busklemme. Der CX9020 verfügt über einen 1-GHz-CPU und läuft mit dem Betriebssystem Windows CE. Es wird auf einer Hutschiene montiert und erkennt angeschlossene Busklemmen automatisch.

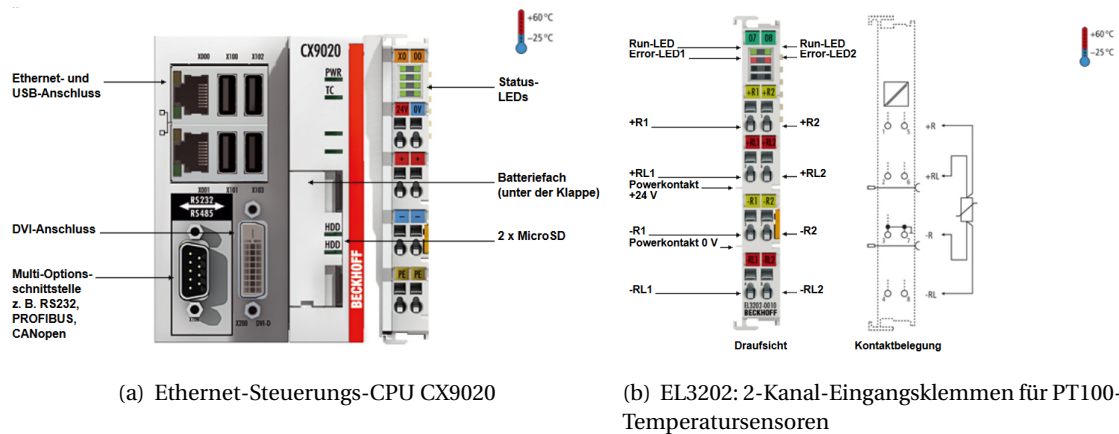


Abbildung 5.6: SPS-CPU und E-Busklemme der Fa. Beckhoff

In Tabelle ?? sind alle verwendeten Klemmen mit Kanalanzahl, Signalart und der eingesetzten Anzahl aufgelistet.

Der CX-9020 verfügt über zwei RJ45 Anschlüsse für LAN-Schnittstellen. Hier können weitere Buskoppler oder ein PC angeschlossen werden. Buskoppler kommunizieren über EtherCAT und der PC über TCP/IP mit dem Gerät. Eine der zwei Schnittstellen dient zur Kommunikation mit dem Host-PC. Vier USB-Schnittstellen dienen für einen Anschluss von beispielsweise einer Maus, Tastatur oder eines Speichermediums.

Der CX-9020 wird an ein Trafo von der Fa. Siemens mit 24 V DC versorgt. Über die Kanäle 24 V und 0 V wird der Buskoppler EK 1200 mit Spannung gespeist. Der EK 1200 kommuniziert per E-Bus mit den angeschlossenen Klemmen und versorgt diese über die Powerkontakte mit Spannung. Der Buskoppler ist in den den CX-9020 integriert. Die EK 1200 stellt eine Stromversorgung von 1860 mA zur Verfügung. Jede Klemme hat einen Stromverbrauch im Bereich von 50-190 mA. Eine Unterschreitung der 0 mA Grenze ist möglich, kann laut Hersteller jedoch zu Kommunikationsproblemen führen und ist zu vermeiden. Deshalb wird eine E-Bus-Auffrischklemme EL 9410 zur Einspeisung weiterer 1860 mA in den E-Bus integriert.

Jede Klemme verfügt je nach Ausführung über verschiedene Diagnose-LEDs, die Auskunft über korrekten Anschluss, Betriebsstatus oder eventuelle Fehler geben. Die Kommunikation zu den Busklemmen erfolgt über die Kontakte an der Seite (E-Bus). Die Ausführungen der Busklemmen sind

Tabelle 5.6: Busklemmen-Übersicht

Klemmen- nummer	Typ	Anzahl Kanäle	Signal	Eingesetzte Anzahl
EL 4024	Analog Ausgang	4	4..20 mA	1
EL 4008	Analog Ausgang	8	0..10 V DC	1
EL 3202	Analog Eingang	2	Temperatur (°C)	6
EL 3054	Analog Eingang	4	4..20 mA	1
EL 2809	Digital Ausgang	16	24 V DC	1
EL 6021	Serielle Schnittstelle	1	RS422/RS485	1
EL 9410	E-Bus Auffrischung	0	-	1
EL 6002	Serielle Schnittstellen	2	RS232	3
EL 9011	Endklemme	0	-	1

sehr vielfältig. Sie unterscheiden sich in der Kanalanzahl, Genauigkeit, Auflösung etc. Abbildung 5.6 zeigt den CX-9020 und eine EL 3202 für zwei PT100-Temperaturelemente.

Der Beckhoff-Schaltschrank wird über eine separate Spannungsquelle, getrennt von anderen elektrischen Komponenten, versorgt. Dies erlaubt ein Betrieb der SPS, zB. fürs Programmieren oder Testen, unabhängig von den anderen Schaltschränken.

Folgende Komponenten der KA werden elektrisch an die SPS angeschlossen:

- ▷ Kompressor-Frequenzregelung mit analogem Ausgangssignal 4..20 mA
- ▷ Verflüssigungsregelung mit analogem Ausgangssignal 0..20 mA
- ▷ Elektrische Heizungselemente analogem Ausgangssignal mit 0..10 V
- ▷ Schaltschütze mit digitalem Ausgangssignal 0..24 V DC für Magnetventile, 4-Wegeventil, Spannungsfreigabe für Verdampfer-Ventilatoren
- ▷ Modbus RTU über COM-Schnittstelle und RS-485 Klemme
- ▷ PT100- Temperaturelemente

Für die genaue elektrische Installation wird an dieser Stelle an die Handbücher der jeweiligen Komponenten verwiesen. Elektrische Arbeiten über 50 V wurden von der elektrischen Werkstatt des Instituts durchgeführt. [?]

5.3.1 Modbus RTU

Ein Auslesen von Sensoren kann über analoge Ausgangssignale, zB. 4-20 mA oder älter 0-20 mA, geschehen oder über Bussysteme. Beide Varianten sind in der Praxis weit verbreitet. Je nach Menge der Sensoren und Entfernungen zwischen den Sensoren wird sich für eine Variante entschieden. Feldbusse sind nach der Norm IEC 61158³ weltweit standardisiert.

Die Verwendung von Feldbussen hat sowohl Vor- und Nachteile. Die Vorteile sind der geringe Verkabelungsaufwand oder Eigendiagnose durch das System sind möglich. Ein Feldbus-System bietet eine hohe Flexibilität gegenüber Erweiterungen oder Änderung des Netzwerkes. Eine Festlegung auf Messbereiche der Sensoren ist nicht notwendig. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit der Abfrage unterschiedlicher Messwerte, wie zum Beispiel Temperatur und Druck, von einem Sensor. Die hohe Zuverlässigkeit und hohe Kompatibilität von verschiedenen Sensortypen ist ein weiterer großer Vorteil.

Die Nachteile eines Feldbusses sind die komplexere Netzwerkstrukturen und -abläufe. Ein höher qualifiziertes Personal ist eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Implementierung eines Feldbus-Systems. Des Weiteren erfordert eine Abfrage der Sensoren meist eine größere Reaktionszeit. Sensoren mit der entsprechender Feldbusteknik sind häufig teurer als Sensoren, die mit analogen Datenübertragung ausgestattet sind. Eine Beschädigung des Kabels kann in manchen Fällen zu dem Ausfall des kompletten Feldbusses und dessen Sensoren führen. Redundante Netzwerke sind folglich wünschenswert, jedoch nicht immer umsetzbar.

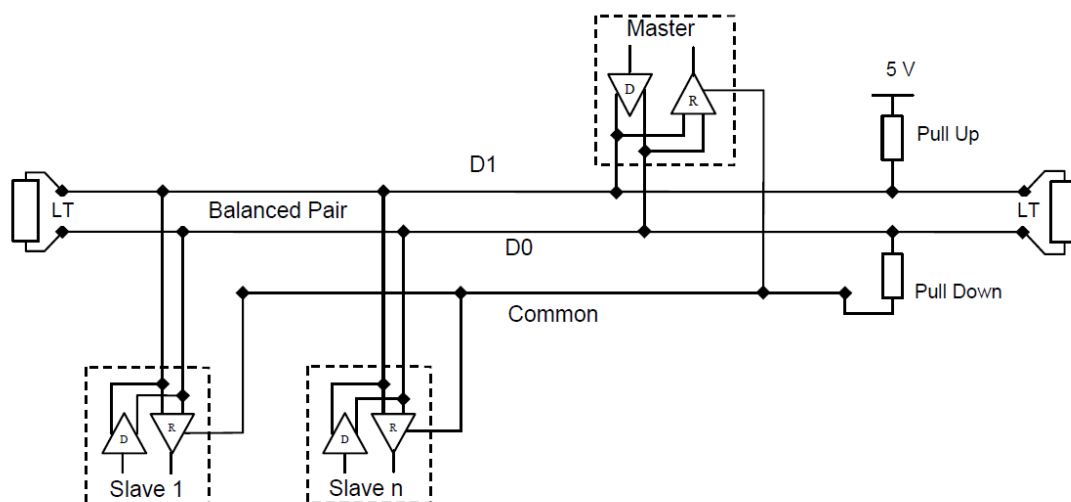


Abbildung 5.7: Zwei-Kabel-Topologie eines MODBUS RTU- Feldbusses [MODBUS.ORG, 2002]

³Digital data communication for measurement and control - Fieldbus for use in industrial control systems

Feldbusse können mit verschiedenen Netzwerk-Topologien ausgeführt werden. Für den Modbus RTU wird nach [MODBUS.ORG, 2002] eine Serienschaltung der Hardware-Komponenten (engl. *Daisy Chain*) empfohlen. Die Komponenten sind in dieser Topologie in einer Kette verbunden. Das Signal wird immer an alle Komponenten gesendet und empfangen. Ein Netzwerk besteht zu jeder Zeit aus einem Master und multiplen Slaves. Zunächst schickt der Master einen Befehl an einen Slave. Der Slave setzt den Befehl um und schickt dem Master seine Antwort. Der informationstechnische Aufbau des Modbus RTUs wird im Kapitel 5.4 beschrieben.

Ein Modbus RTU kann über ein Vier- oder Zwei-Kabel-Topologie verfügen. Ein Vier-Kabel-Topologie verfügt über zwei paarweise Kabel über die entweder gesendet oder empfangen wird. Die Befehle über die Sendekabel werden nur vom Master empfangen. Die Befehle über das Empfänger-kabel werden hingegen nur von den Slaves empfangen. Beide Kabeltypen sind *monodirektional*.

Wird eine Zwei-Kabel-Topologie verwendet, so wird von einer *bi-direktionaler* Verkabelung geredet. Die Kabel tragen nach der *EIA/TIA-485 Standard* die Namen *D0* und *D1* und werden auch positive und negative *Polarität* genannt. Die Sende- als auch Empfangsbefehle werden von dem Master und allen Slaves empfangen. In beiden Topologiefällen können bis zu 32 Slaves angeschlossen werden und bis auf eine Entfernung von größer 1000 m betrieben werden.

Zusätzlich zu den vier bzw. zwei Kabeln wird ein weiteres Kabel, das *Common*, benötigt. Es stellt ein gleiches Spannungsniveau für alle Slaves sicher. Elektromagnetische Störungen beeinflussen die Datenleitungen (*D0* und *D1*) und das *Common*-Kabel im gleichen Maße. Die Potentialdifferenz von *D1* und *D0* zu *Common* ist folglich konstant. Serielle Bits (0 oder 1) werden mittels Potentialdifferenzen zwischen *D0* und *D1* gesendet. Im Falle einer Störung werden diese Bits immer noch vom jeweiligen Receiver erkannt. Somit ist diese Verkabelungsart sehr unanfällig gegenüber elektromagnetischer Störsignale.

Abbildung 5.7 zeigt eine typische Zwei-Kabel-Topologie mit Abschlusswiderständen (engl. *Line Termination* (LT)), einem *Pull-up*- und *Pull-Down*-Widerstand. Abschlusswiderstände (meist 150 Ω , 0.5 W) werden an den zwei Enden der Linientopologie vorgesehen und dienen zur Reduzierung von Signalreflexionen am Ende der Leitungen. Diese können zu Fehlern in der Kommunikation führen. Es wird ein *Pull-Up* und ein *Pull-Down* mittels Widerstand zwischen 450 und 650 Ohm durchgeführt. Ein *Pull-Up* zieht die *D1*-Datenleitung auf ein Ruhepotential von 5 V und ein *Pull-Down* die *D0*-Datenleitung auf das Ruhepotential des *Common*-Leiters (meist 0 V).

Die Keller-Drucktransmitter müssen zusätzlich mit Spannung versorgt werden. Die Spannung von 24 V DC wird über eine externe Spannungsquelle gewährleistet und wird in einem Kabelpaar mit 0 V und +24 V zu jedem Drucksensor geführt. Für den Modbus wurden zwei Kontaktpunkte am Prüfstand installiert. Von den Kontaktpunkten gehen Stichleitungen mit Datenkabeln und bei den Drucktransmitter auch die Spannungsversorgung zu den Slaves ab. Ein Knotenpunkt ist außerhalb

der Klimakammer an dem Verflüssigungssatz. Im Abbild 5.8 sind die Knotenpunkte mit *Kälteanlage* und *Klimakammer* gekennzeichnet. Die Empfehlungen für die Länge der Stichleitung hängt vom Hersteller ab. An diesem Versuchsaufbau sind die Stichleitung nicht länger als 6 m.

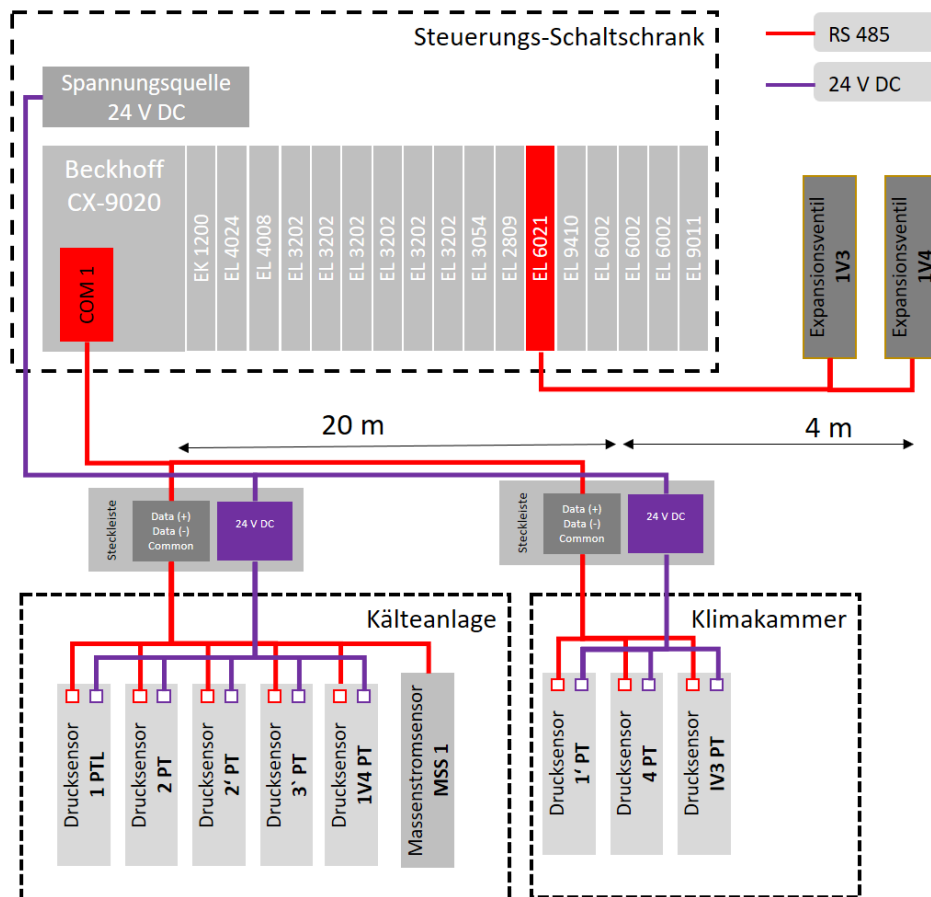


Abbildung 5.8: Zwei Modbus-Feldbusse mit angeschlossenen Sensoren, Busklemmen und Spannungsspeisung

Aufgrund der Inkompatibilität von zwei Slavetypen, KELLER- Drucktransmitter und CAREL-Expansionsventile, wurde ein weiterer Modbus aufgebaut. Genauer wird das Problem in Abschnitt 5.4.2 erklärt. Die Lösung des Problem sind zwei von einander unabhängige Modbus-Systeme. Ein Modbus wird über die COM-Schnittstelle des CX9020 betrieben und der zweite Modbus über die Klemme EL 6021. Abbildung 5.8 zeigt die zwei Modbus-Systeme. Der erste Modbus verbindet alle 8 Drucktransmitter und den Massenstromsensor. Der zweite Modbus liest die zwei Expansionsventile aus. Beide Modbus-System sind erweiterbar.

5.4 Informationstechnischer Aufbau

5.4.1 Status Maschine

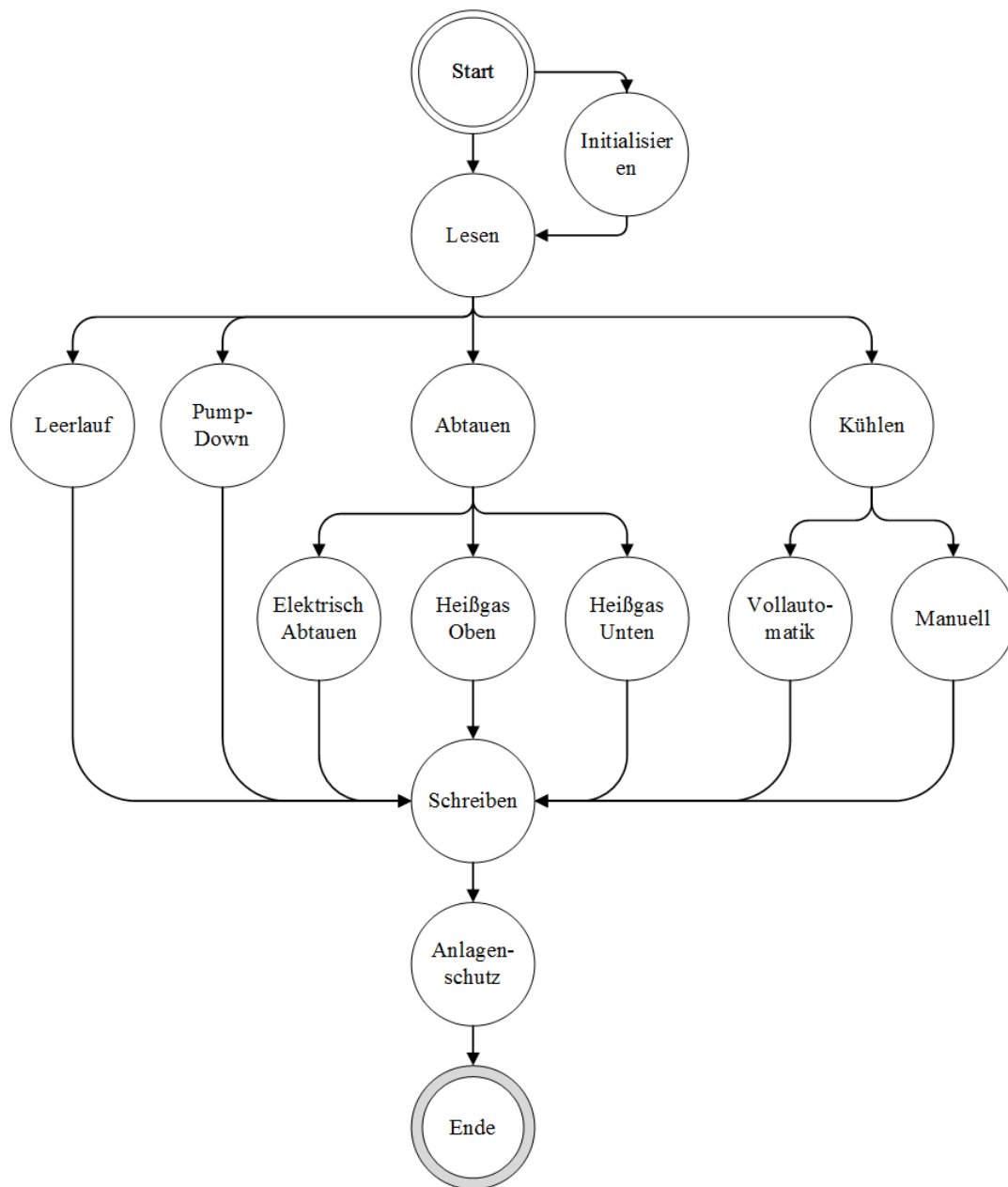
5.4.2 Modbus RTU

5.4.3 Grafical User Interface - GUI

Drei Hauptzonen sind in der Abbildung farblich dargestellt. Das ist zum einen in *grün* die Kompressor-Einheit. In der *orange* Zone befinden sich der Verflüssiger und der Abtau-Verdampfer. Die *blaue* Zone ist der Verdampfer, er befindet sich innerhalb der KK. Alle Komponenten außerhalb der blauen Zone sind außerhalb der KK installiert.

Im Kältekreislauf sind drei Wärmeübertrager installiert: In der *orangenen* Zone sind zwei Wärmeübertrager dargestellt:

5.4.4 Anlagenschutz

**Abbildung 5.9:** Status-Maschine

6 Inbetriebnahme

6.1 Kälteanlage

6.2 Kalibrierung: Wägesystem

Literaturverzeichnis

- [OPA 2014] OPAL-RT TECHNOLOGIES (Hrsg.): *What is Hardware-in-the-Loop Simulation?* <http://www.opal-rt.com/about-hardware-loop-simulation>. Version: 2014
- [Bec 2016] BECKHOFF AUTOMATION GMBH & CO. KG (Hrsg.): *TwinCAT 3- eXtended Automation Engineering (XAE)*. http://download.beckhoff.com/download/Document/catalog/Beckhoff_TwinCAT3_042012_d.pdf. Version: 2016
- [Baehr 2013] BAEHR, Hans D.: *Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen*. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978–3–662–10518–4
- [Breidenbach 2014] BREIDENBACH, Karl: *Der Kälteanlagenbauer. 2 Bände - Band 1: Grundkenntnisse - Band 2: Grundlagen der Kälteanwendung*. Berlin, Offenbach : Vde Verlag GmbH, 2014. – ISBN 978–3–800–73267–8
- [Danfoss GmbH 2006] DANFOSS GMBH: *Kältetechnik-Einführung in die Grundlagen*. Version: Juni 2006. <http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/EC23F2C0-8831-4187-843F-580012B3E0BE/0/PF000F103.pdf>
- [Ehrbar 2002] EHRBAR, M.: *Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfer / Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs Labor für Thermodynamik und Kältetechnik*. Version: November 2002. <http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000007564.pdf>. 2002. – Forschungsbericht
- [EnergieAgentur.NRW 2010] ENERGIEAGENTUR.NRW: *Kälteerzeugung Potenziale zur Energieeinsparung*. (2010). http://www.energieagentur.nrw/content/anlagen/qb_kaelteerzeugung_final.pdf
- [Ettemeyer u. Olbrich 2007] ETTEMEYER, Andreas ; OLBRICH, Otoo ; MÜNCHEN, Fachhochschule (Hrsg.): *Konstruktionselemente*. 2007
- [Freitag 2015] FREITAG, H.: *Experimentelle Kältetechnik am EBC: Der Abtau-Prüfstand*, 2015
- [Grote u. Feldhusen 2014] GROTE, Karl-Heinrich ; FELDHUSEN, Jörg: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 24. Aufl. Berlin Heidelberg New York, 2014. – M7–M15 S. ISBN 978–3–642–38891–0
- [H.-J. Yin et al. 2012] H.-J. YIN ET AL.: *Experimental research on a novel cold storage defrost method based on air bypass circulation and electric heater*. In: *Energy* 37 (2012), Januar, S. 623–631

- [Hayashi 1977] HAYASHI, K. ; Yuhara H. Y. ; Aoki A. Y. ; Aoki: Study of Frost Formation Based on a Theoretical Model of the Frost Layer. (1977)
- [Helmlinger 2015] HELMLINGER, Michael: *Untersuchung von Energieeffizienz steigernden Maßnahmen bei der Abtauung von Luftkühlern mithilfe eines selbstentwickelten Messsystems*, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, RWTH Aachen University, Diplomarbeit, November 2015
- [Hilfiker 2004] HILFIKER, Rasid Sahinagic; Martin Imholz; Louis Berlinger; Heinrich Huber; K.: *LOREF: Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung: Untersuchung der Frostbildung für Lamellenluftkühler von Wärmepumpen*. <http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000008172.pdf&name=240120.pdf>. Version: 2004
- [Huang u. a. 2009] HUANG, Dong ; LI, Quanxu ; YUAN, Xiuling: Comparison between hot-gas bypass defrosting and reverse-cycle defrosting methods on an air-to-water heat pump. In: *Applied Energy* 86 (2009), Nr. 9, 1697 - 1703. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.023>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.023>. – ISSN 0306-2619
- [Institute of Refrigeration 2000] INSTITUTE OF REFRIGERATION: DEFROSTING. In: *SES Technical Bulletin No 3* (2000), Oktober. http://www.ior.org.uk/ior_/images/pdf/se/Bulletin%203%20-%20Defrost.pdf
- [K. Kosowski 2009] K. KOSOWSKI, L. K. W. Tegethoff T. W. Tegethoff: CO₂- Wärmepumpe für Passivhäuser / Institut für Thermodynamik, TU Braunschweig. 2009. – Forschungsbericht
- [MODBUS.ORG 2002] MODBUS.ORG (Hrsg.): *MODBUS over Serial Line Specification & Implementation guide V1.0*. Version: 2002. http://www.modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1.pdf
- [M.Stöckner 2012] M.STÖCKNER: *Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft . Forschung aktuell 2012*. https://www.klimaschutz.de/sites/default/files/page/downloads/hs_karlsruhe_forschung_aktuell_2012.pdf. Version: 2012
- [Nürnberg 2015] NÜRNBERG, Markus: *Entwicklung und Inbetriebnahme der Mess-, Regel und Datenverwaltungsfunktionen für einen Hardware-in-the-Loop Prüfstand*. 2015
- [Preuß 2011] PREUSS, G. ; VDMA (Hrsg.): *Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland: Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik in Deutschland nach Einsatzgebieten*. 2011
- [Schydlo 2010] SCHYDLO, A.: *Reifbildung und -wachstum auf gekühlten Rohroberflächen*, Technischen Universität Darmstadt, Diss., März 2010. http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2191/1/080610_Schydlo_PhD.pdf
- [Siemens Schweiz AG 2007] SIEMENS SCHWEIZ AG: *Kältetechnik*. Version: Januar 2007.

<https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&id1=8358>

[Wittel u. a. 2011] WITTEL, Herbert ; MUHS, Dieter ; JANNASCH, Dieter ; VOSSIEK, Joachim: *Rollhoff/Matek Maschinenelemente - Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch*. 20. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – 301–310 S. – ISBN 978–3–834–81454–8

Anhang

A Wichtiger Anhang 1



Abbildung A.1: Waage vom Typ *PCD 10K0.1* der Fa. KERN UND SOHN GMBH

Modbus Org.	EIA/TIA-485 Standard	Beckhoff/ TwinCat	Keller- Drucktransmitter	Krohne- Ma
D0	Data A = Data (-) = inverted	Data (-)	RS 485 B	Sig
D1	Data B = Data (+) = non-inverted	Data (+)	RS 485 A	Sig
Common	Common	Ground	GND	C

A.1 Die Versalien

B Ähnlich wichtiger Anhang

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die vorliegende Arbeit in der Lehrstuhlbibliothek und Datenbank aufbewahrt und für den internen Gebrauch kopiert werden darf.

Aachen, den 24. Juni 2016

Name hier bitte einfügen