

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, 4. Juli 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 Kältekreislaufs 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 Wägeaufbau 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 Wägeaufbau entwickelt. Ziel ist die Messung der zeitlich veränderlichen Eis- bzw. Tauwassermenge im Luftkühler im Normal- bzw. Abtrieb 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 deren Speicherung. 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.

Abstract

Icing of the evaporator in a refrigeration cycle leads to an impairment of the transferred heat flow and the system efficiency. The icy heat exchanger must therefore be defrosted from time to time. Electrical and hot gas defrosting methods are used in practice.

For more detailed study of these strategies an experimental setup of a refrigeration circuit with replaceable air cooler is modified. In the refrigeration cycle installed temperature and pressure sensors and an electrical power measurement allows the energy balance of all components of the refrigerant circuit.

An existing scale system for measuring the mass of the ice within the air cooler is optimized. A concept for a mobile setup to study different samples will be created and developed. A calibration method for the optimized scale system will be developed and implemented into the programmable logic controller(PLC). The aim is to measure the time-varying amount of ice and condensation in the air cooler in normal cooling or defrosting mode. Also the effect on the change of center of gravity (2D) of the air cooler will be analyzed. The reading of sensor data is automated and will be carried out by the PLC.

For the refrigeration cycle, a control concept is software-designed and implemented by a PLC of the company Beckhoff. The PLC enables fully automated operation of the refrigeration cycle by user default, the reading of all sensors and the display of measured values. A software-governed system protection, including function test is also provided in the PLC. If necessary, an adjustment of the control parameters will be carried out.

After commissioning of the entire system, an air cooler is measured in a climate chamber under different boundary conditions. In addition to the evaluation of the measurement results carried out an evaluation of the measurements in terms of their reproducibility and an estimate of the measurement error is made.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	v
Abbildungsverzeichnis	viii
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	16
3.3 Federn	19
4 Stand der Technik	22
4.1 Abtaumethoden	22
5 Versuchsaufbau	26
5.1 Kältetechnischer Aufbau	26
5.2 Wägesystem	32
5.2.1 Messtechnik	33
5.2.2 Konstruktion	34
5.2.3 Kalibrierung	37
5.3 Elektrischer Aufbau	39
5.3.1 RS232-Kommunikation zwischen SPS und KERN-Waage	43
5.3.2 RS485-Kommunikation zwischen SPS und Sensoren über MODBUS RTU	44

5.4 Informationstechnischer Aufbau	47
5.4.1 User Centered Design(UCD)	48
5.4.2 Statusmaschine	49
5.4.3 TwinCAT 3	57
5.4.4 Namensgebung der Variablen	58
5.4.5 RS232-Kommunikation: Verarbeitung des Prozessabbildes	60
5.4.6 Regelung	61
5.4.7 Modbus RTU	64
5.4.8 Programme	67
5.4.9 Grafical User Interface - GUI	67
6 Inbetriebnahme	75
6.1 Elektrische Inbetriebnahme	76
6.2 Informationstechnische Inbetriebnahme	76
6.3 Fehlersuche	78
6.4 Kalibrierung Wägesystem	82
6.5 Versuche	82
6.5.1 Fehlerabschätzung	90
7 Ausblick und Optimierungsvorschläge	91
8 Zusammenfassung	95
Literaturverzeichnis	97
A Datenbank lesen	102
A.1 Die Versalien	102
B Ähnlich wichtiger Anhang	104

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
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
T	Temperatur	K
t	Zeit	s

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit
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	$^\circ C$
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K
ψ	Sättigungsgrad	%

Indizes und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
0	Referenzzustand (<i>ambient dead state</i>)
A	Außen/Umgebung
aus	Ausgang
el	elektrisch
EV	Expansionsventil
ein	Eingang
KA	Kälteanlage

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Indizes und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
KK	Klimakammer
KP	Kompressor
LabVIEW	Programmiersprache und Entwicklungsumgebung für die Messdatenerfassung der Firma National Instruments
L	Luft
m	Mittelwert
Modbus RTU	ein offenes Kommunikationsprotokoll basierend auf einer Master-/Slave-Architektur
MySQL	Datenbank-Verwaltungssoftware
PT	Drucksensor
R 134a	Handelsname von 1,1,1,2-Tetrafluorethan. Eingesetztes Kältemittel
rev	Strömungsumkehrung (<i>reverse</i>)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung (engl. <i>PLC</i>)
TT	Temperatur-Sensor
TwinCat 3	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 ausgeführt.	5
3.1 log p,h-Diagramm von eines reinen Fluids [Baehr, 2013]	7
3.2 Kreisprozess im log p,h-Diagramm [Baehr, 2013]	8
3.3 h^* , X- Diagramm für feuchte Luft bei einem Gesamtdruck $p = 100 \text{ kPa}$ [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]	16
3.7 Einfacher Kältekreislauf [Baehr, 2013]	17
3.8 Blattfeder und Feder-Kennlinien [Wittel u. a., 2011]	19
3.9 Federrate und -wirkungsgrad	20
4.1 Heißgas-Abtauung [K. Kosowski, 2009]	23
4.2 Links: Kühlbetrieb. Rechts: Heißgas-Abtauung [K. Kosowski, 2009]	24
5.1 Gesamtaufbau mit Klimakammer, Luftkühler, Verflüssigungssatz und Wägesystem .	26
5.2 Kälteanlage-Fließbild	28
5.3 Mögliche Magnetventil-Schaltungen	30
5.4 Wärmeströme in der Klimakammer [Nürenberg, 2015]	32
5.5 CAD-Modell des Wägesystems mit Blattfeder.	33
5.6 Federkonstruktion nach dem Prinzip des einseitig eingespannten Balkens	35
5.7 SPS-CPU und E-Busklemme der Fa. Beckhoff	40
5.8 Verkabelung von CX 9020 und Busklemmen	42
5.9 Waage mit Spannungspotentiale für eine RS232-Kommunikation	43
5.10 Verkabelung für die RS232-Kommunikation zwischen der Busklemme EL 6002 und einer Waage	44

5.11 Zwei-Kabel-Topologie eines MODBUS RTU- Feldbusses [MODBUS.ORG, 2002]	45
5.12 Zwei Modbus-Feldbusse mit angeschlossenen Sensoren, Busklemmen und Spannungs- speisung	47
5.13 Prozessschritte beim <i>User Centered Design</i> [Nürenberg, 2015]	48
5.14 Statusmaschine	50
5.15 TwinCAT 3 [Bec, 2016b]	57
5.16 EL 6002: Kommunikation zwischen der PLC-Anwendungen und dem SerialLineCon- trol [Bec, 2016a]	61
5.17 Regelstrecke mit PID-Regler und Regelgrößen	62
5.18 Mehrgrößensystem: Regelstrecke mit PID-Regler und Regelgrößen	64
5.19 Verschiedene Bit-Sequenzen im RTU-Modus [MODBUS.ORG, 2002]	65
5.20 Aufbau und Timing einer Modbus RTU Nachricht [MODBUS.ORG, 2002]	66
5.21 Modbus-Nachrichten Beispiel: Druckabfrage vom Kanal P1. Links der Modbusbefehl <i>(request)</i> vom Master und rechts die Antwort <i>(response)</i>	67
5.22 RI-Fließbild in der GUI	68
5.23 RI-Fließbild-Reiter in der GUI	69
5.24 log p,h-Diagramm-Reiter in der GUI	71
5.25 Wägesystem-Reiter in der GUI	72
5.26 Karteireiter <i>Anleitung Kalibrierung</i>	73
5.27 Scope-Reiter in der GUI	74
6.1 Inbetriebnahmeprozess mit Fehlersuche und -behebung	75
6.2 Kältemittelbewegungen im Anlagenstillstand (gelb markierte Ventile). Kältemittelbewe- gung im Kühlbetrieb in Richtung Abtauverdampfer (grün markierte Ventile). In blau hinterlegte Magnetventile sind mögliche Lösungsvorschläge zur Problembehebung.	79
6.3 Hohe Kältemittel-Überhitzung nach Verdampfer und hoher Druckverlust zwischen Expansionsventil und Verflüssiger dargestellt im log p,h-Diagramm	80
6.4 Zustandspunkte der Kältemaschine nach Fehlerbehebung dargestellt im log p,h-Diagramm	81
6.5 Versuchsreihe I: Temperaturverläufe am Luftkühler (VD) während Vereisungszeit . .	83
6.6 Versuchsreihe II: Temperaturverläufe am Luftkühler (VD) während Vereisungszeit . .	84
6.7 Versuchsreihe III: Temperaturverläufe am Luftkühler (VD) während Vereisungszeit . .	85
6.8 Versuchsreihe I: Abtauen mittels <i>Heißgas-Oben</i>	87
6.9 II: Abtauen mittels <i>Heißgas-Oben</i>	88
6.10 III: <i>Elektrisch</i> Abtauen mit 6,2 kW Heizleistung	89
6.11	90
A.1 Initialisieren nach [Nürenberg, 2015]	103

Tabellenverzeichnis

4.1 Vor- und Nachteile der verschiedenen Abtaumethoden [Breidenbach, 2014], [Institute of Refrigeration, 2000], [H.-J. Yin et al., 2012], [Huang u. a., 2009]	25
5.1 Leistungsdaten Kälteanlage	27
5.2 Sensordaten-Übersicht	31
5.3 Systemparameter der Klimakammer [Nürnberg, 2015]	32
5.4 Waagendaten	34
5.5 Feder-Daten	36
5.6 Busklemmen-Übersicht	41
5.7 Abkürzungen-Übersicht	59
5.8 Abkürzungen-Übersicht [Nürnberg, 2015]	60
5.9 PID-Regler-Übersicht	63
5.10 Modbus-Register Adressen [KMG, 2013]	66
5.11 Modbus-Befehle mit ihrem Funktions-Code	67
6.1 Werte für CAREL-PID-Regler für Einschwingvorgang und stationärer Betrieb	82
6.2 Versuchsreihen	82
7.1 Aufwands- und Prioritätsschlüssel	91

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.

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 Kältemaschinen beliefen sich 2009 nach Schätzungen von Preuß auf ca. 72 Mrd. kWh. Dies entspricht ca. 15 % des nationalen Stromverbrauchs. Die Aufteilung der Kältemaschinen auf ihre Einsatzbereich ist in Abbildung 1.1 dargestellt. [M.Stöckner, 2012] [EnergieAgentur.NRW, 2010]

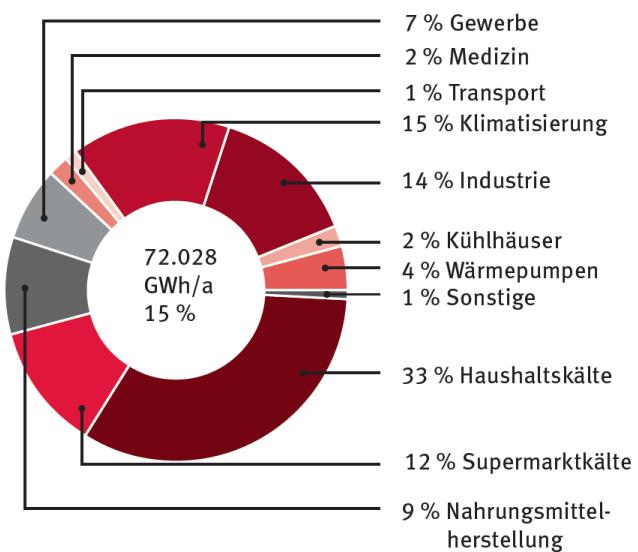


Abbildung 1.1: Aufteilung der sich in Deutschland in Betrieb befindenden Kältemaschinen je nach Einsatzgebiet und Energieverbrauch im Jahre 2009. [M.Stöckner, 2012]

Der Kälteleistungsbedarf ist nach wie vor ansteigend, womit eine größere Klimabelastung einhergeht. 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 ungewollte direkte Kältemittelemissionen mit teils hohen CO₂-Äquivalenten Emissionen eine Herausforde-

Einführung

rung dar.

Im Bezug auf Kältemaschinen werden in der Literatur eine Vielzahl an Möglichkeiten und Potentialabschätzungen zur Senkung des Energieverbrauches und der Umweltbelastung genannt. Von der Verwendung von natürlichem Kältemittel, Wärmerückgewinnung vom Verflüssiger sowie von Downsizing des Kompressors ist die Rede. Laut ENERGIEAGENTUR.NRW entfallen bei der elektrischen Leistungsaufnahme einer Kälteanlage im Kühlbetrieb durchschnittlich:

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

Die Energieverbrauch des Verflüssigers bzw. Verdampfers wird durch deren eingebauten Ventilator bestimmt. Folglich ist der Kompressor der größte Energieverbaucher in einer Kälteanlage. Um eine effiziente Kälteanlage zu betreiben, sollte die zu verrichtende Arbeit vom Kompressor 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 Kompressors 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

Am *Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate* (EBC) werden 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 basiert auf dem 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 zu einer Vereisung. Die Bereifung führt durch eine Querschnittsverengung 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]

Motivation und Ziele

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. Verdampfungstemperatur geht mit einem geringeren Saugdruck für den Kompressor einher. 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.

Das Forschungsvorhaben zielt sowohl auf experimentelle als auch numerische Erkenntnisgewinne im Hinblick auf Reibbildungsvorgänge bei verschiedenen Abtaumethoden bei Luftkühlern in einem Kältekreislauf. Diese Erkenntnisse sollen in eine spätere Datenbasis zur energieeffizienten Auslegung von Luftkühlerkomponenten einfließen.

Das WSA übernimmt hierbei die Entwicklung eines numerischen Simulationsmodells. 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 Wärmeübertrager-Varianten testen zu können.

Diese Masterarbeit umfasst, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, die Arbeitspakete *Aufbau (bzw. Optimierung) eines Prüfstandes* und *Ermitteln von Messdaten*.

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

- ▷ Optimierung des Kältekreislaufs: 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 Kältekreises und Auswertung des Wägesystems in Echtzeit.
- ▷ Auslegung der Regelparameter für verwendete PID-Regler

Am Ende der Masterarbeit und nach erfolgreichem Abschließen des ersten Arbeitspakets wird das zweite Arbeitspaket *Ermitteln von Messdaten* bearbeitet. Dieses setzt sich aus folgenden Punkten zusammen:

- ▷ Durchführung von Reibbildungsversuchen
- ▷ Durchführung von Abtauversuchen mittels verschiedener Abtaumethoden

Motivation und Ziele

- ▷ Ermittlung der Reproduzierbarkeit der Messungen.

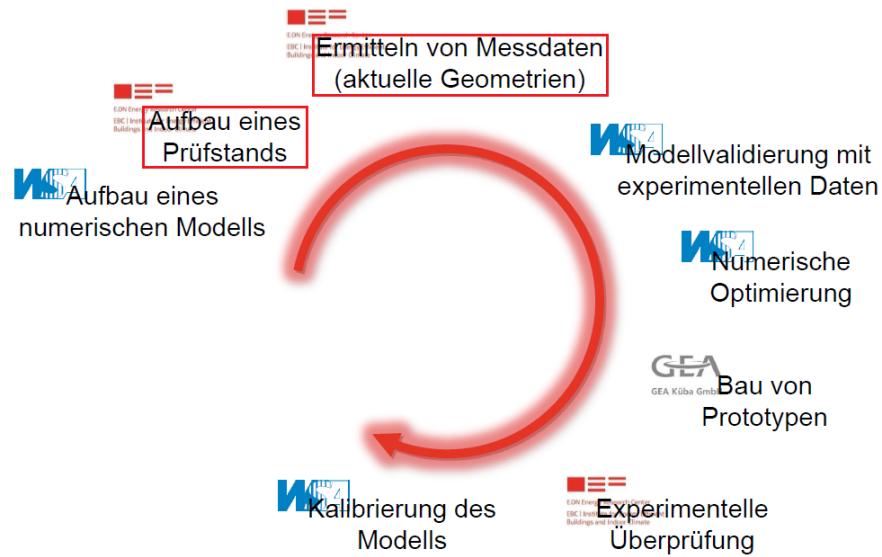


Abbildung 2.2: Aufgabenpakete im Projektzyklus.[Freitag, 2015] Rot umrahmte Arbeitspakte werden in dieser Masterarbeit behandelt und ausgeführt.

3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen für diese Arbeit erläutert. Zuerst werden in Abschnitt 3.1 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 kühlst zunächst den Wärmeübertrager, danach wird über die Wärmeübertrager-Lamellen der vorbei strömende Luft Wärme entzogen. Der Kaltdampf-Kälteprozess ist ein linksläufiger *Clausius-Rankine-Kreisprozess*. Die Zustandspunkte des verwendeten Kältemittels im log p,h Diagramm sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

Das halb-logarithmische Diagramm ist ein vielgebrauchtes und hilfreiches Mittel in der Kältetechnik.¹ 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; $1 - x$ ist der 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, sondern zu einer Veränderung vom Gas- bzw. Flüssigkeitsanteil. Es wird von einer *latenten*, also

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

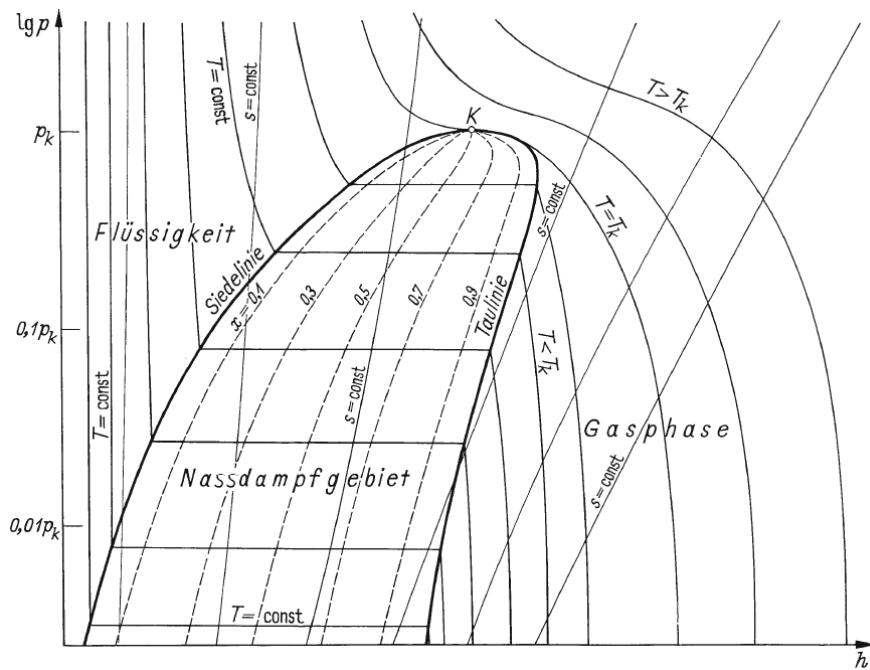


Abbildung 3.1: $\log p, h$ -Diagramm von einem reinen Fluids [Baehr, 2013]

nicht fühlbaren, Wärmeänderung gesprochen. Um einen Tropfen flüssigen Wassers, 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 zu einer Veränderung der Temperatur. Die Wärmeänderung ist *sensibel*.

In einem Kaltdampfprozess, sprich ohne Verluste durch Reibung (*reversibel*), finden folgende vier Teilprozesse statt:

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

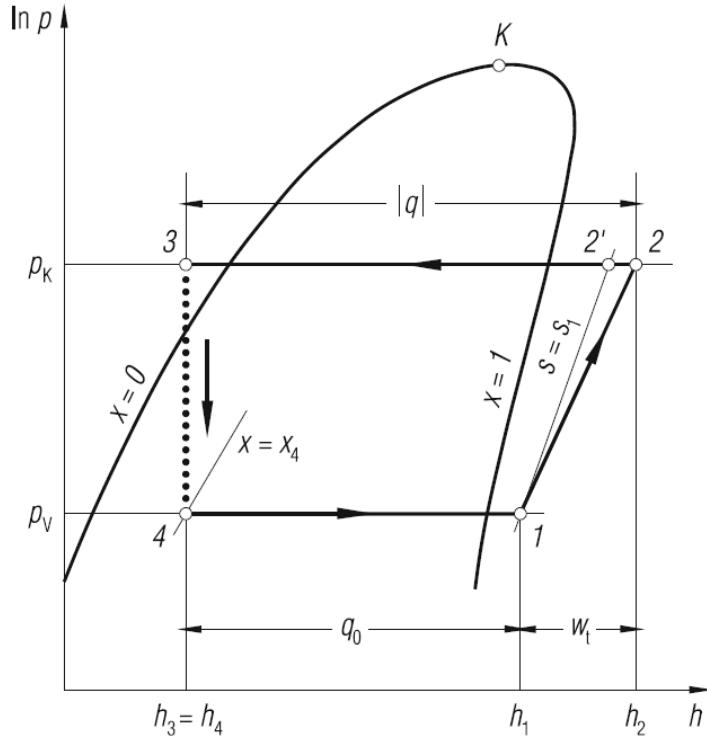


Abbildung 3.2: Kreisprozess im log p,h-Diagramm [Baehr, 2013]

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 der 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 es eine möglichst große Leistungszahl zu erlangen.

3.1.2 Feuchte Luft

Bei dem Kühlprozess durch einen Verdampfer kommt es zwischen dem Wärmeübertrager und der feuchten Luft zu 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.

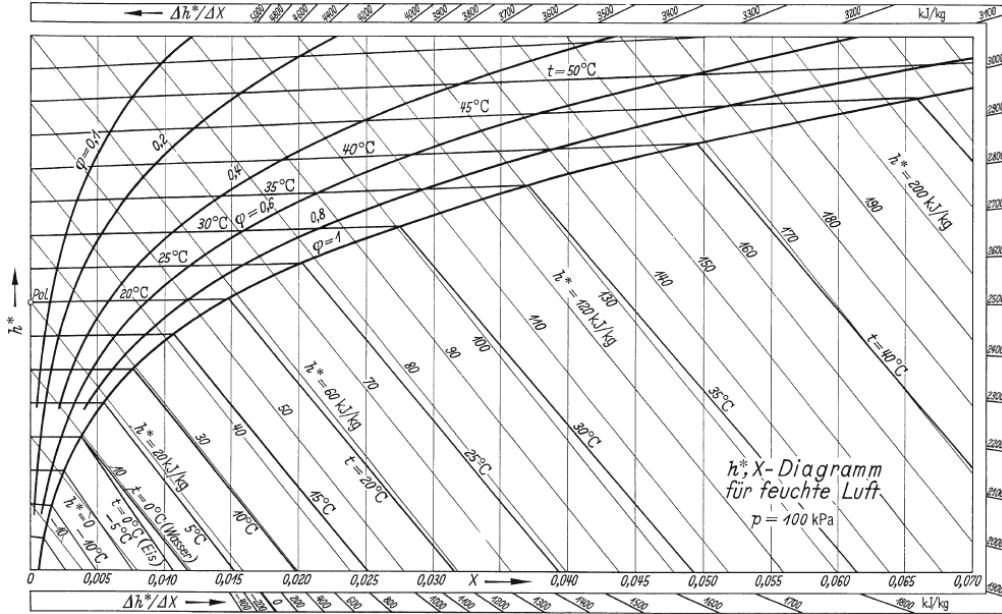


Abbildung 3.3: h^* , X -Diagramm für feuchte Luft bei einem Gesamtdruck $p = 100 \text{ kPa}$ [Baehr, 2013]

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 aufgenommene 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 Werte 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 eingesogenen 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 zum 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 aufzunehmendem Wasser einen Grenzwert hat. Dieser Grenzwert wird Sättigungswert der Wasserdampfbeladung genannt und ist eine Funktion, die abhängig von der Temperatur und dem Druck ist. 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 die Menge an Wasser, die im Wasserdampf aufgenommen werden kann. Der erste Tropfen Kondensat bildet sich und Wasser fällt aus. Wird das ausgefallene Wasser mit der Luft weitertransportiert, so wird von *Nebel* geredet. Die Kondensationsmenge lautet formalmäßig:

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

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 rauе Oberflächen sein. Das höchste treibende Potential für eine solche Keimzelle hat der kälteste Punkt im System. In unserem Anwendungsfall ist das der Wärmeübertrager des Verdampfers. 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 Wärmeübertragers. 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 die selbige. Der übertragene Wärmestrom ist, ausgehend von der Luft, formelmäßig gegeben mit:

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

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 Taupunktpunkt der feuchten Luft, sondern auch unter dem Gefrierpunkt, kann es zum Gefrieren der kondensierten Tropfen und/oder zur Desublimation von Wasserpartikeln 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 theoretischer Sicht als auch mittels simulationsrelevanten und technischen Überlegungen bzw. Untersuchungen. Der scheinbar triviale Prozess der Bildung eines Eiskristalles auf einer Oberfläche und sein weiteres Wachstumsverhalten ist sehr komplex und Gegenstand zahlreicher aktueller und schon abgeschlossener Forschungsprojekte.

Neben den theoretischen Grundlagen wird in der Arbeit von SCHYDLO ein Simulationsmodell für den Reifbildungs- und Abtauprozess auf einem Rohr entwickelt. Zudem sind bisherige Arbeiten zu

der Thematik in [Schydlo, 2010] aufgelistet und zusammengefasst. Praktische Untersuchungen sowie Versuchsaufbauten zum Thema der Vereisung von Luftkühlern werden in HILFIKER und K. KOSOWSKI beschrieben. In den Arbeiten werden die Vereisungs- und innovative Abtauungsprozesse von einer CO₂-Wärmepumpe, die zur Heizung von Passivhäusern 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 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. Reifsichtwachstumsphase
3. Vergletscherung.

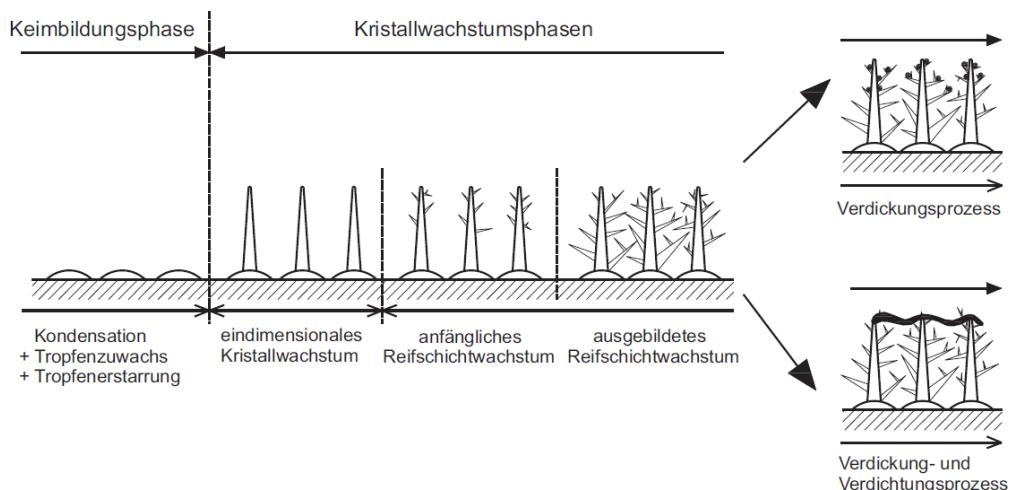


Abbildung 3.4: Kristallwachstum auf einer ebenen Oberfläche [Schydlo, 2010]

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 zu größeren Tropfen anwachsen.

sen. 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 aufgrund der sich stetig vermehrenden Kristalle zu einer erhöhten Rauigkeit.

Reifschichtwachstumsphase

In der zweiten Phase beginnt das dreidimensionale Wachstum. Die Kristalle fangen an sich miteinander zu verästeln. Ein poröses Kristallgitter entsteht. Aufgrund des Wärmeleitwiderstandes, der mit der Reifdicke steigt, erhöht sich die Oberflächentemperatur der Reifschicht. Des Weiteren kommt es zu einem Massenstrom innerhalb der Reifschicht, ausgelöst durch Diffusion. Die Diffusion röhrt aus dem Konzentrationsunterschieden 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 vorangegangenen Abschnitt 3.1.3 wurden die einzelnen Bildungsphasen von Eiskristallen beschrieben. In diesem Abschnitt wird auf die Eigenschaften von Eiskristallen eingegangen und dargestellt wie sie sich während eines Vereisungsvorganges eines Luftkühlers verändern.

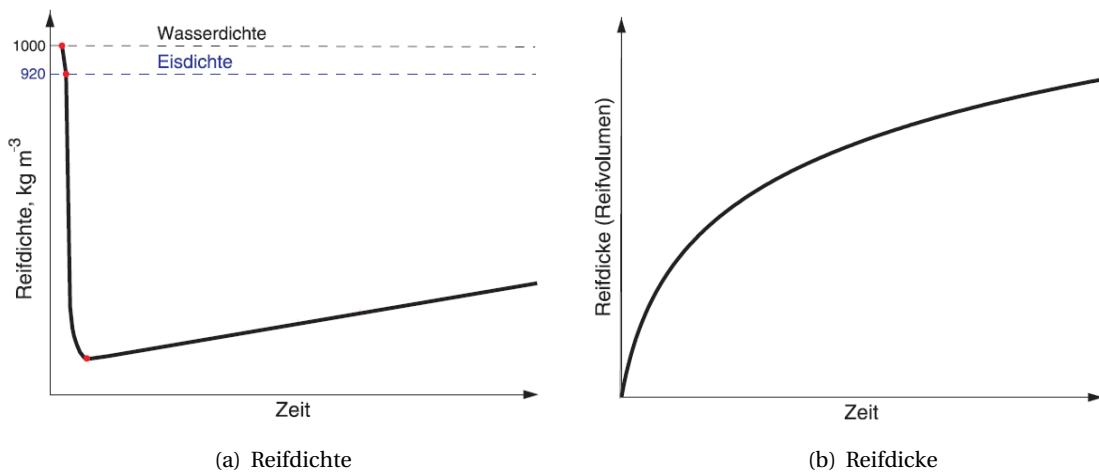


Abbildung 3.5: Schematischer Reifdichte- und Reifdickeverlauf beim Vereisungsvorgang eines Tropfen Wassers [Schydlo, 2010]

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.

Da Diagramm 3.5(a) zeigt den Dichteverlauf, aufgetragen über die Vereisungszeit. Die Dichte eines Tropfens fällt beim Gefrieren von 1000 kg/m^3 auf 920 kg/m^3 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.

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 Kondensat, das sich an der Lamelle absondert und dann gefriert, am Anfang am größten ist und findet während des eindimensionalen Wachstums auf statt. 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 Reifdichte abbilden. Alle Modelle sagen einen Anstieg von λ mit steigender Reifdichte 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. [Baehr, 2013] [K. Kosowski, 2009]

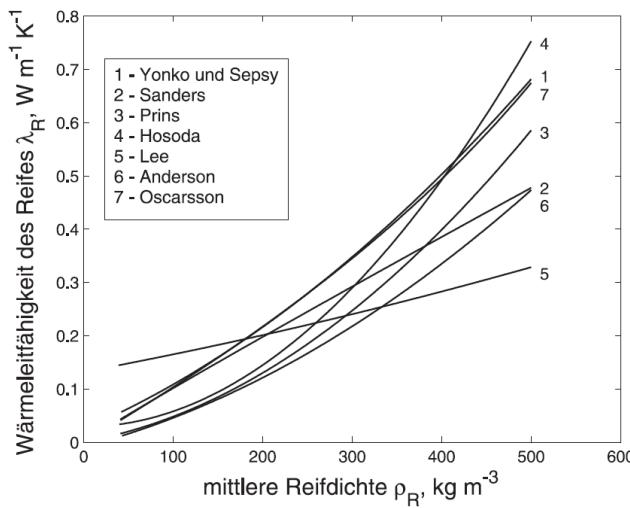


Abbildung 3.6: Wärmeleitfähigkeit des Reifs aufgetragen über die mittlere Reifdichte [Schydlo, 2010]

3.2 Kältetechnik

Da sich diese Masterarbeit mit dem Aufbau eines Prüfstandes zur Untersuchung von Abtaumethoden einer Kompressionskälteanlage beschäftigt, wird in den folgenden Kapiteln 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 sind folgende vier Komponenten:

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

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

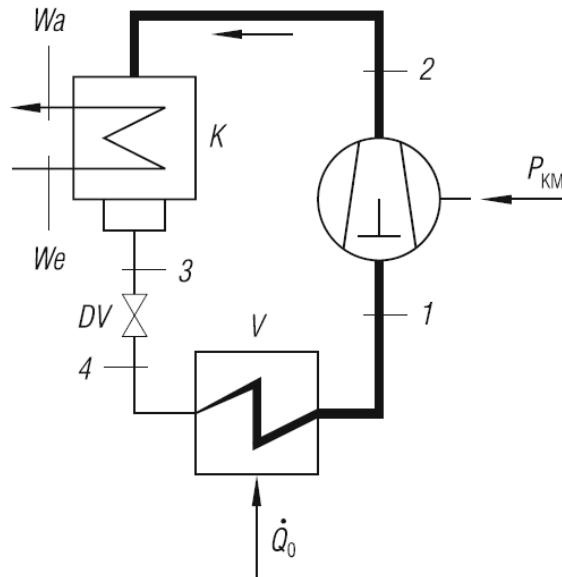


Abbildung 3.7: Einfacher Kältekreislauf [Baehr, 2013]

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 Kompressor mit elektrischer Energie versorgt. Den Kompressor gibt es in verschiedenen Bauvarianten. Die zwei wichtigsten Bauvarianten sind der *Hubkolbenkompressor* und der *Rotationskolbenverdichter*. Kompressoren zwischen offenen, halbhermetischen und vollhermetischen Ausführungen unterscheiden. Schrauben-, Scroll- sowie Turboverdichter sind Bauarten der *Rotationskolbenverdichter*.

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

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

Der Verflüssiger

Dem Kältemittel wird im Verflüssiger auf einem hohen Druckniveau Wärme entzogen. Der Verflüssiger entzieht dem überhitzten gasförmigen Kältemittel Wärme. Beim Austritt aus dem Verflüssiger ist das Kältemittel meist vollständig flüssig. Um einen Wärmeentzug zu bewerkstelligen, gibt es drei Bautypen:

- ▷ Wassergekühlte Verflüssiger
- ▷ Luftgekühlte Verflüssiger
- ▷ Verdunstungsverflüssiger

Verflüssiger unterscheiden sich hinsichtlich des Wärmeabführenden Mediums durch Bauform, Baugröße und Hilfsenergien.

Das Expansionsventil

Das Expansionsventil ist ein Überhitzungsregler und regelt das in den Verdampfer eingespritzten Kältemittelmassenstrom. Die Zuführung des Kältemittels erfolgt über eine Druckdifferenz. Durch eine lokale Verengung des Strömungquerschnitts verringt sich der Druck des durchfließenden Kältemittels. Das Kältemittel vergrößert sein Volumen und es kommt zur Expansion. Im idealen Fall wird bei diesem Prozess auch keine Wärme abgeführt; der Prozess ist *isenthalp*. Es gibt bei Expansionsventile sowohl regelbare als auch nicht regelbare Ausführungen. Geregelte Expansionsventile werden in mittleren und großen Kälteanlagen eingesetzt. Die Regelung erfolgt durch die Querschnittsänderung und dem damit einhergehendem Druckabfall.

Der Verdampfer

Das Kältemittel wird in den Verdampfer 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 spezifische 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. Es wird von *erzwungener Konvektion* gesprochen.

3.3 Federn

Der Einsatzbereich von Federn ist genau so vielfältig wie die verschiedenen Bautypen, Größen und Werkstoffen. Je nach Funktion können Federn 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 Wäge-systems kalibriert, siehe Abschnitt 6.4. Deshalb wird in diesem Abschnitt nur auf biegebeanspruchte, rechteckige Blattfedern näher eingegangen.

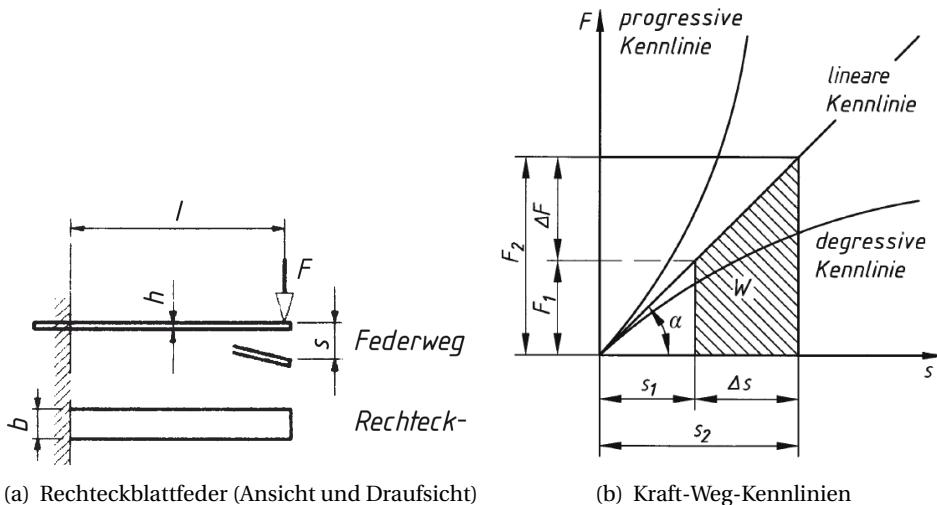


Abbildung 3.8: Blattfeder und Feder-Kennlinien [Wittel u. a., 2011]

Die Abbildung 3.8(a) zeigt das Prinzip einer einseitig eingespannten, rechteckigen Blattfeder und 3.8(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 zueinander proportional. Eine Verdopplung 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 3.8(b) markierte

Fläche errechnet sich zu :

$$W = \frac{1}{2}(F_1 + F_2)\Delta s. \quad (3.16)$$

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

$$R = \tan(\alpha) = \frac{\Delta F}{\Delta s} \quad (3.17)$$

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

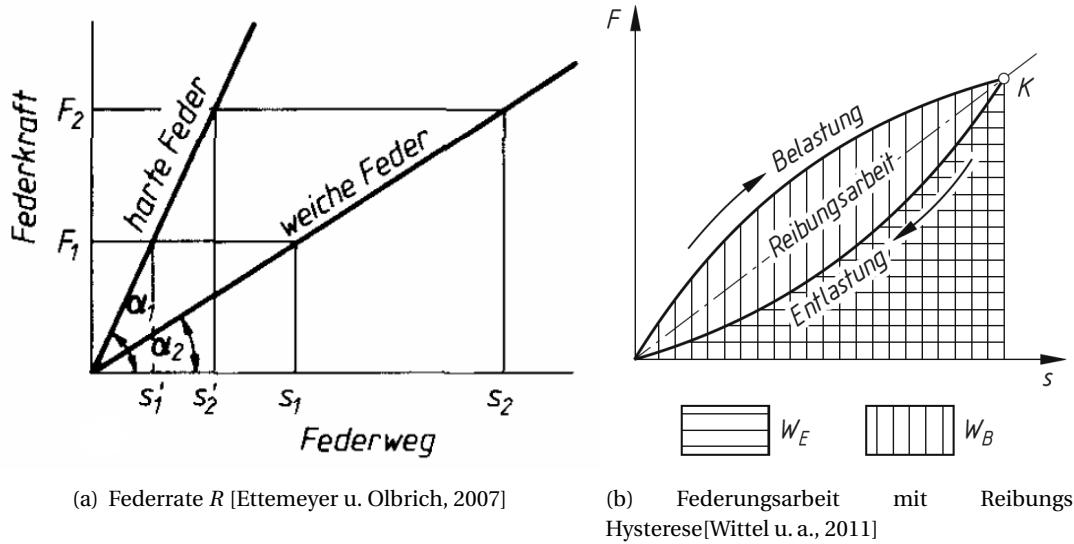


Abbildung 3.9: Federrate und -wirkungsgrad

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

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{6Fl}{bh^2}. \quad (3.18)$$

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

$$\sigma_{b,zul} \approx 0,7 \cdot R_m. \quad (3.19)$$

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

$$S := \frac{\sigma_{b,zul}}{\sigma_{b,max}}; \quad (3.20)$$

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

$$s = 4 \frac{l^3}{bh^3} \frac{F}{E}. \quad (3.21)$$

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 3.9(b). Die Formel für η_F lautet:

$$\eta_F = \frac{W_E}{W_B}. \quad (3.22)$$

Die Auslegung für die verwendete Feder erfolgt im Abschnitt 6.4. Für weitere Literatur zum Thema Federn wird auf die Literatur [Wittel u. a., 2011] und [Ettemeyer u. Olbrich, 2007] verwiesen.

4 Stand der Technik

Dieses 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.

4.1 Abtaumethoden

Um einen vereisten Luftkühler abzutauen, gibt es mehrere Methoden. Die Methoden unterscheiden sich in Kosten und Anlagenkomplexität. Mehrkosten für die Installation sowie weitere Betriebskosten sind bei der Entscheidung stets ein nicht zu vernachlässigender Punkt. Die in der Praxis am weitest verbreiteten Methoden sind die *Heißgas-Abtauung*, *Prozessumkehrung*, *elektrische Abtauung* und *Umluft-Abtauung*.

Heißgas-Abtauung

Die Heißgasabtauung wird durchgeführt, indem das Heißgas aus dem Kompressor anstatt in den Verflüssiger direkt in den vereisten Verdampfer geleitet wird. Für diese Methode wird eine Bypass-Leitung von dem Austritt vom Kompressor bis zum Eingang des Expansionsventil gelegt. Mittels zweier 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 4.1 ist der rechtsläufige Kreisprozess in einem log p, h- Diagramm für das Kältemittel R290 abgebildet.

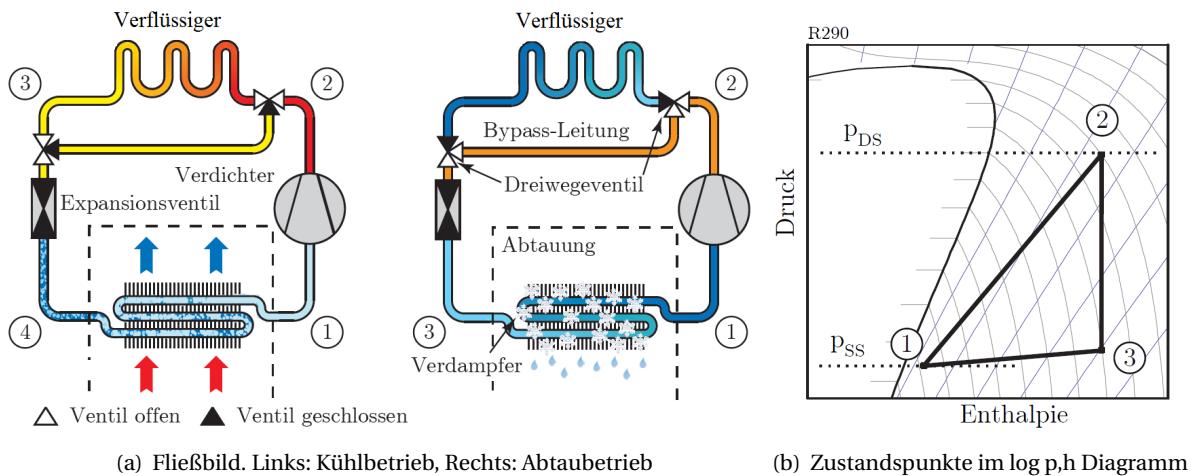


Abbildung 4.1: Heißgas-Abtauung [K. Kosowski, 2009]

Prozessumkehrung

Bei der Abtauung durch Prozessumkehrung wird die Funktion der Wärmeübertrager vertauscht. Während des Abtuprozesses fungiert der Verdampfer als Verflüssiger und der Verflüssiger hat die Aufgabe des Verdampfers inne. Die Prozessumkehrung wird in der Regel durch ein Vierwegeventil realisiert. 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 Versuchsanlage, die in dieser Arbeit optimiert worden ist, ist mit dieser Technologie ausgestattet. Der Umkehrprozess wird näher im Kapitel 5 erläutert.

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.

Die Versuchsanlage dieser Arbeit ist auch mit dieser Abtautechnologie ausgestattet.

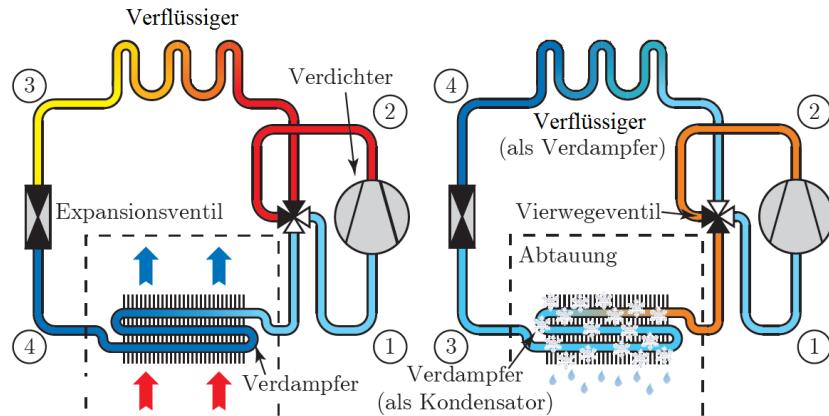


Abbildung 4.2: Links: Kühlbetrieb. Rechts: Heißgas-Abtauung [K. Kosowski, 2009]

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.

Gegenüberstellung der Abtaumethoden

Die Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile der jeweiligen Abtaumethode.

Tabelle 4.1: 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"> • Günstig • <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

5 Versuchsaufbau

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau des gesamten Versuchsstandes. Zunächst wird in Abschnitt 5.1 der Aufbau und die Funktionsweise der Kälteanlage und der Klimakammer erläutert. Im Weiteren wird in Abschnitt 6.4 auf das Konzept und Aufbau des Wägesystems eingegangen. Der elektrische Aufbau des Versuchsstandes wird in Abschnitt 5.3 näher erläutert, um im darauf folgenden Abschnitt 5.4 den informationstechnischen Aufbau zu erklären.

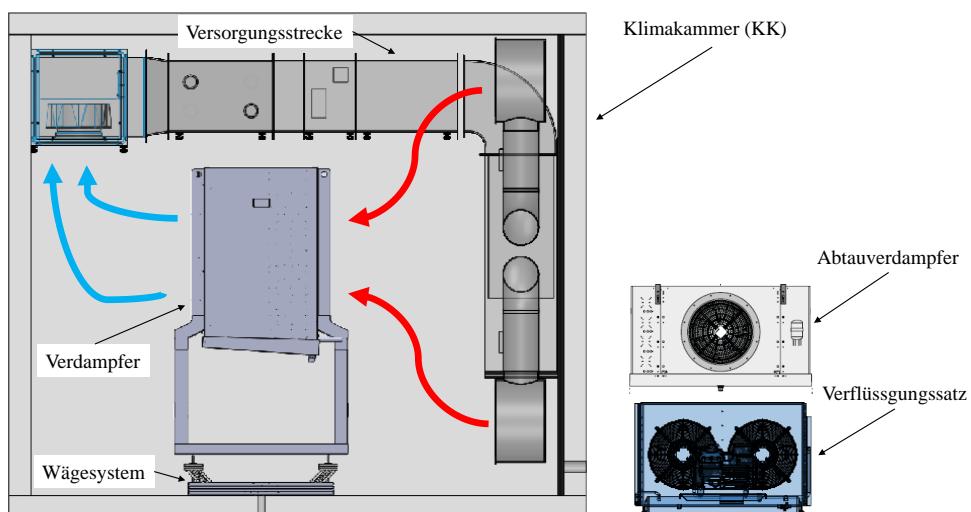


Abbildung 5.1: Gesamtaufbau mit Klimakammer, Luftkühler, Verflüssigungssatz und Wägesystem

5.1 Kältetechnischer Aufbau

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

Kälteanlage

Die Auslegungsdaten der Kälteanlage sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Abbildung 5.2 zeigt das Fließschema der Kälteanlage.

Tabelle 5.1: Leistungsdaten Kälteanlage

Systemparameter	Kälteanlage
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 Luftherwärmer	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

Die Hauptkomponenten der Kälteanlage sind der Kompressor, der Verflüssiger, der Verdampfer und der Abtauverdampfer. 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 Verdampfern 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 Wärmeträger 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 ?? des Anlagenschutzes beschrieben.

In der Klimakammer findet der Verdampfungsprozess statt. Neben dem Verdampfer ist hier das Expansionsventil und die Versorgungsmimik installiert. Die Versorgungsmimik erlaubt drei verschiedene Durchströmungswege durch den Verdampfer. Die Abbildung 5.3 sind die Varianten mit den Magnetventilstellungen abgebildet.

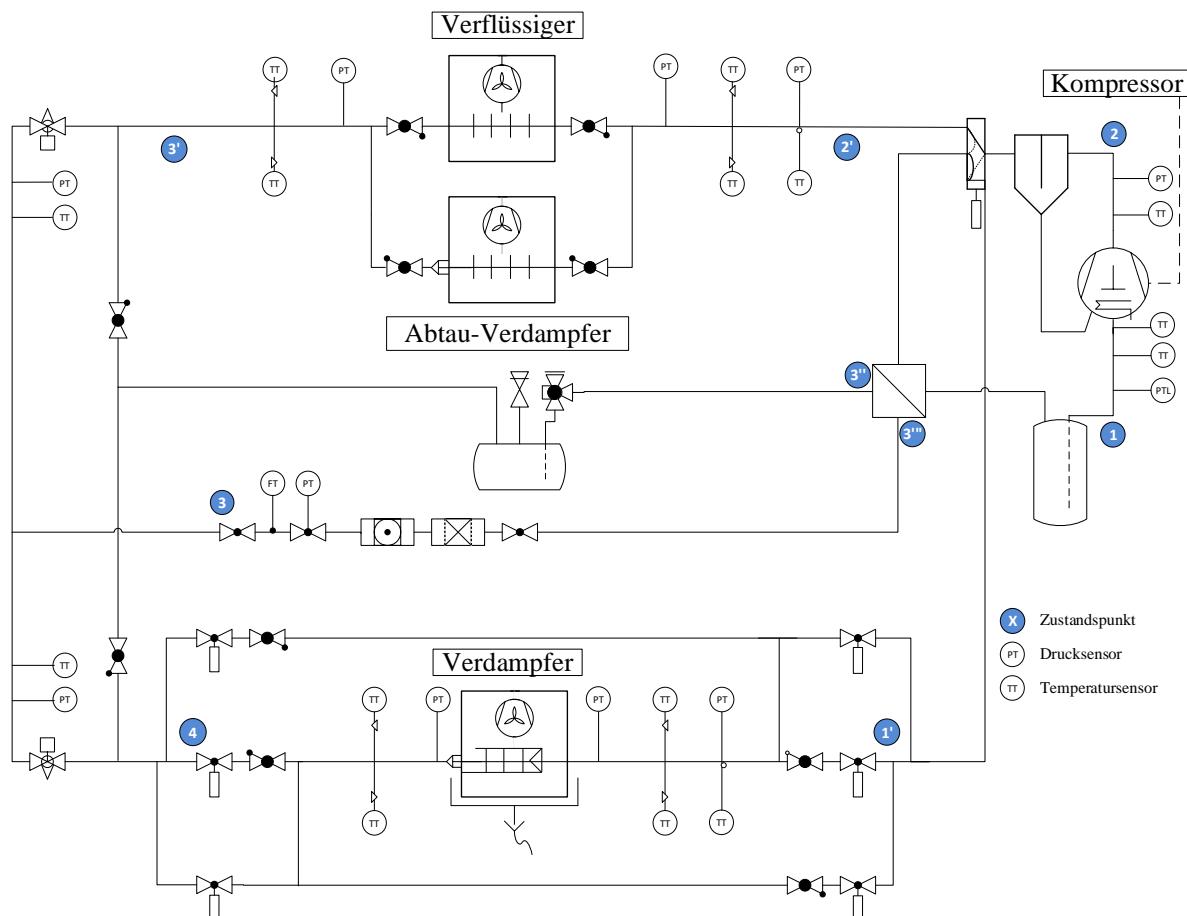


Abbildung 5.2: Kälteanlage-Fließbild

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

Im Kühlbetrieb strömt das flüssige unterkühle Kältemittel nach dem Verflüssiger erst in den Sammler. Danach überträgt es Wärme zwischen den Zustandspunkten $3''$ und $3'''$ an das aus dem Ver-

dampfer kommende verdampfte Kältemittel. Am Zustandspunkt 3 befindet sich der Massenstromsensor und ein Schauglas. Im **Kühlbetrieb** wird das Kältemittel durch das Expansionsventil entspannt und 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 Massenstromsensor zu 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 oder durch die Saugleitung gelangen¹.

Messtechnik

Die Kälteanlage ist mit drei Sensorenarten: Temperatur-, Druck- und Massenstromsensoren ausgerüstet. 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.

¹In dem weiteren Verlauf der Arbeit wird von Heißgaseintritt über die Venturidüse von *Oben* gesprochen, da der Wärmeübertrager aus vier Rohrlamellen-Wärmeübertragern 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.

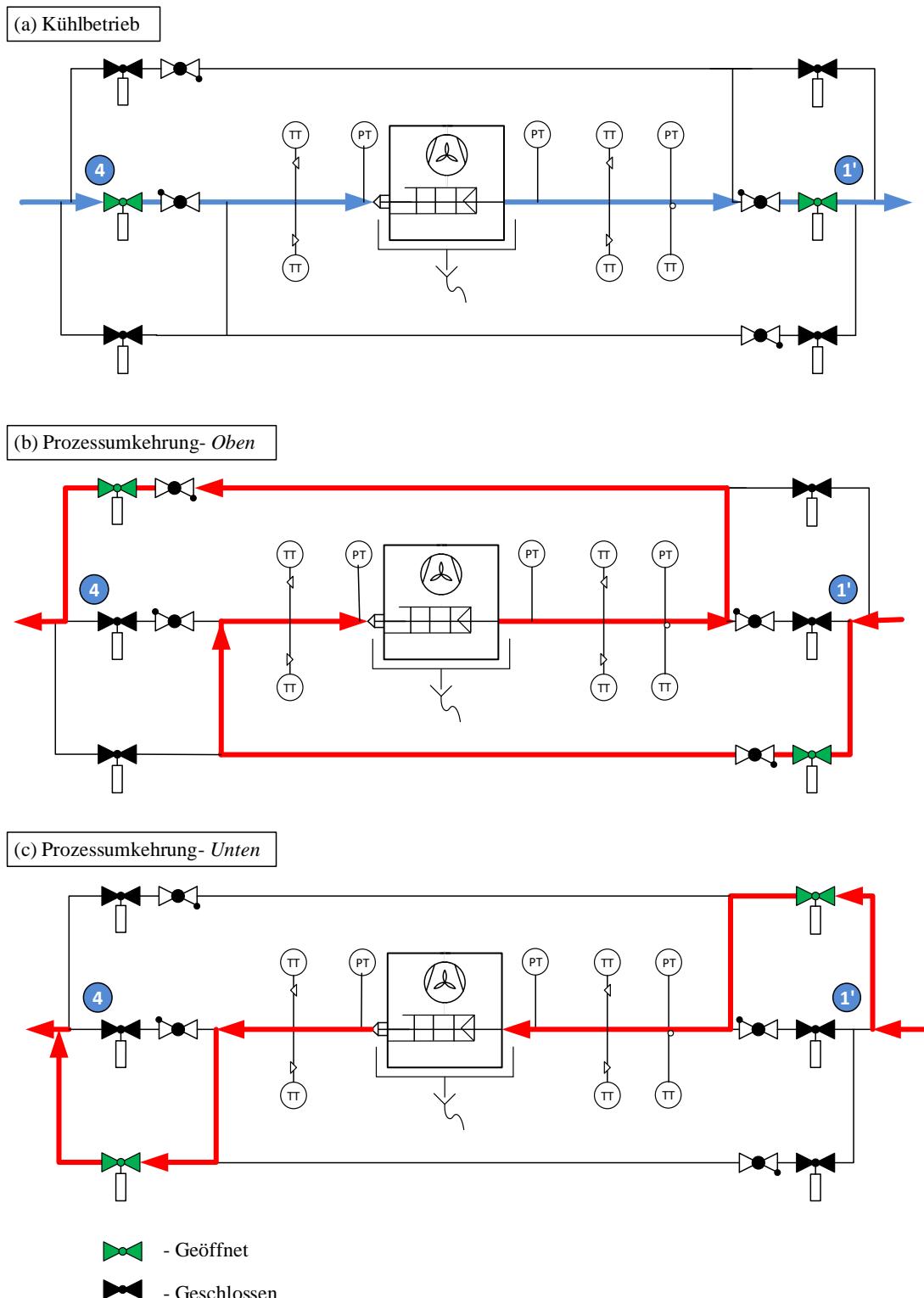


Abbildung 5.3: Mögliche Magnetventil-Schaltungen

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

Die Klimakammer erlaubt es, den Verdampfer und somit den Vereisungs- und Abtauprozess unter verschiedenen Abtaubedingungen zu untersuchen. Die Klimakammer ist als klassisches *Hardware in the Loop*-System entworfen und wird so betrieben. Die Kenndaten der Klimakammer stehen in Tabelle 5.3. Die Abbildung 5.4 zeigt die Wärmestrome innerhalb der Klimakammer. Die Klimakammer ist in der Lage, eine stationäre Umgebungsbedingungen abzubilden. Es ist aber auch möglich, instationäre Situationen wie zum Beispiel Typtage oder -wochen nachzustellen. In der Klimakammer ist die Verdampfereinheit mit der Kältemittelversorgungsmimik lokalisiert. Des Weiteren sind das Wägesystem und die eingesetzten Waagen in der Klimakammer platziert.

Die Klimakammer ist konzipiert für Untersuchungen von Wärmepumpen und Kältemaschinen. Der Einsatz der Klimakammer in Kombination mit einer klimatisierbaren Versuchshalle hebt die Reproduzierbarkeit von Messungen. Die Bedingungen für Versuche können unabhängig von der Jahreszeit oder dem Tagesklima konstant gehalten werden. So lassen sich Versuche mit verschiedensten Umgebungsbedingungen ganz jährlich durchführen. Die einzustellenden Parameter sind die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit(RH). Die Klimakammer wurde 2015 in Betrieb genommen und wird wie die Kälteanlage auch über eine SPS der Fa. Beckhoff geregelt und gesteuert. In dem Klimakammer-Projekt wurde von NÜRENBERG beispielsweise die *Statusmaschine* eingeführt, auf der auch das Konzept der SPS der Kälteanlage beruht (siehe Abschnitt 5.4).

Die Klimakammer verfügt über Software-Schnittstellen mit Simulationssoftware (zB. DYMOLA) und Datenbanken (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

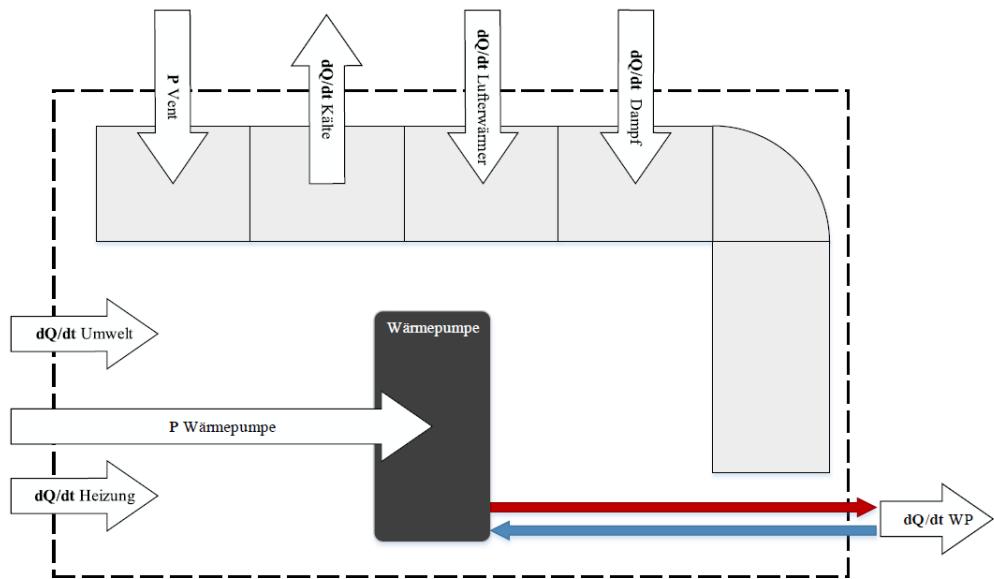


Abbildung 5.4: Wärmeströme in der Klimakammer [Nürnberg, 2015]

Methode liegt in der Verkürzung der Inbetriebnahmephase, Verringerung der Entwicklungskosten und im risikofreien Testen der Anlage in Grenzsituationen. [OPA, 2014]

Tabelle 5.3: Systemparameter der Klimakammer [Nürnberg, 2015]

Systemparameter	Klimakammer
Volumen	32,96 m ³
Oberfläche	74,4 m ²
Wandstärke	0,15 m
max. Volumenstrom	4000 m ³ /h
max. Leistung der Lüfterwärmern	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 Wägesystemkonzept entworfen und gebaut. Das Wägesystem hatte *konstruktive* als auch *messtechnische* Anforderungen zu erfüllen. Aufgrund wechselnder Verdampfer-

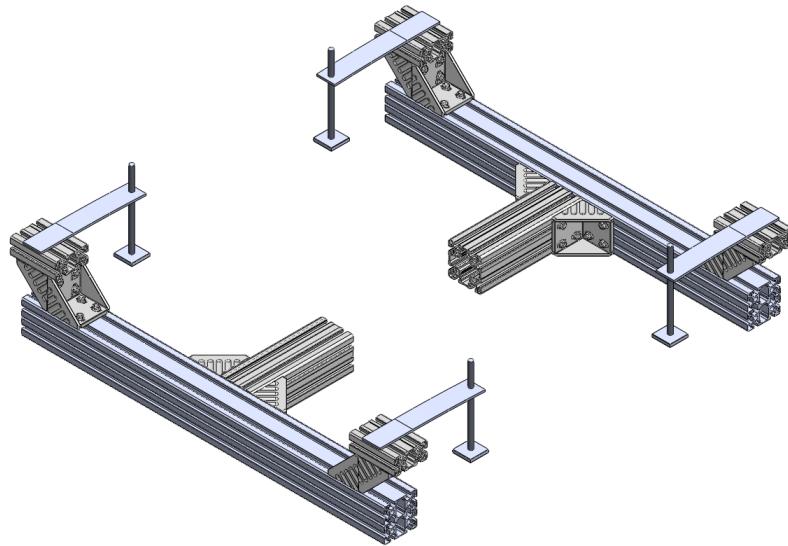


Abbildung 5.5: CAD-Modell des Wägesystems mit Blattfeder.

Prüflinge und schneller Demontage des Prüflings inklusive Wägesystem aus der Klimakammer 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 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 korreliert mit dem max. Wägebereich. Der Waagentyp PCD 10K0.1 der

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

Fa. Kern und Sohn GmbH ist ein guter Kompromiss aus Messbereich und -genauigkeit. Diese Waage kann jeweils bis 10 kg belastet 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. 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 Stahlblättern als Blattfedern entschieden. Die Abbildung 5.6 zeigt die Federkonstruktion mit den auf die Feder wirkenden Kräften. Die Blattfeder ist mit einem Boschprofil verschraubt, dass die Lagerkräfte auf den Boden ableitet. Am 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 ($F_{Verdampfer}$) in jede Gewindestange eingeleitet. Am Fuß der Gewindestange ist eine 50 mm x 50 mm x 5 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 möglichen Verkratzungen und Eindellungen auf der Waagoberfläche vor, zum anderen bewirkt der Gummidämpfer eine minimale Dämpfung des ganzen Systems. Die Konstruktion sieht vor, dass der Fuß im 90°-Winkel auf der Waage aufliegt.

Die Federn sollen in Form einer Blattfeder gebaut sein, die über eine lineare Federkennlinie verfügt. Die Blattfedern sollen über der Länge l verstellbar sein und nach dem Prinzip des einseitig

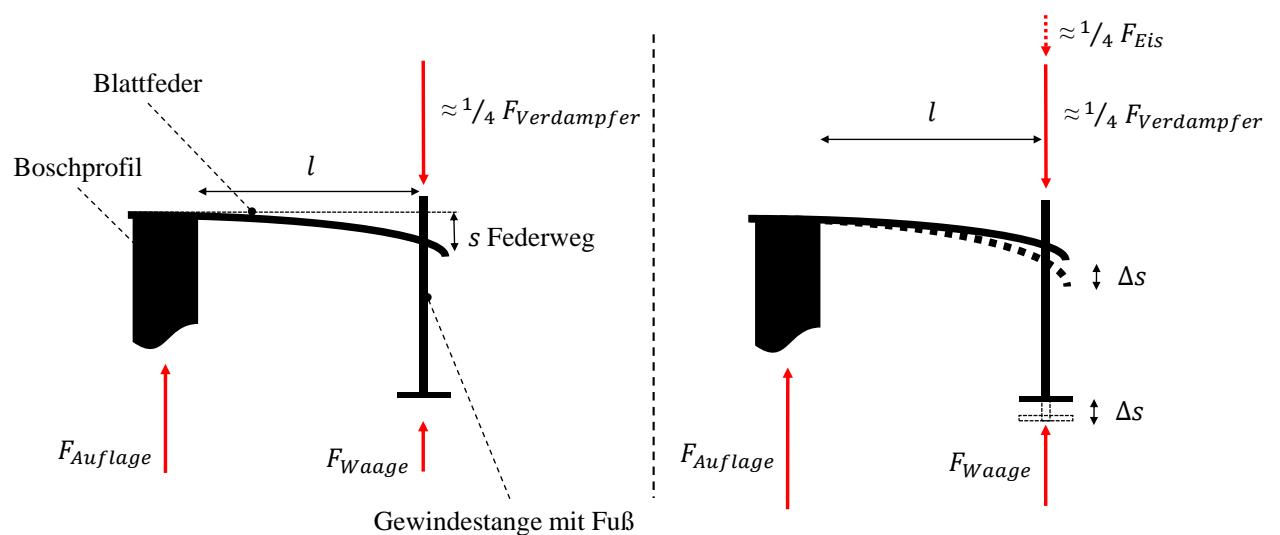


Abbildung 5.6: Federkonstruktion nach dem Prinzip des einseitig eingespannten Balkens

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 mm x 50 mm x 185 mm
Verdampfergewicht $F_{Verdampfer}/4$	490,5 N
maximale Eismenge $F_{Eis}/4$	24,5 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 Gewichtskräfte 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 3.21, 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:

$$R = \frac{24,5 \text{ N}}{1 \text{ mm}} = 51,04 \text{ N/mm}.$$

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 $\sigma_{zul} \approx 0,7 \cdot 1100 \text{ N/mm}^2 = 770 \text{ N/mm}^2$ als maximal zulässige Biegespannung. Daraus resultiert eine Sicherheit für die Blattfeder von:

$$S = \frac{770 \text{ N/mm}^2}{457,34 \text{ N/mm}^2} = 1,68. \quad (5.1)$$

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 werden. Eine praktische Auslesung des Federweges s ist nicht vorhanden. Ungenaues Bestimmen würde zu großen Fehlern führen. Eine Abweichung von $\pm 0,1 \text{ mm}$ zöge einen Messfehler von $\pm 0,5 \text{ kg}$ nach sich. Außerdem kann noch keine Aussage über den Schwerpunkt des gefrorenen Eises im Verdampfer getroffen werden.

5.2.3 Kalibrierung

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. Da ein Wägesystem aus Blattfedern einen bestimmten Teil des Gewichtes durch die Blattfedern ableiten und nur ein Bruchteil des belastenden Gewichtes an die Waagen weitergibt, gilt es diesen Teil zu bestimmen. Das Verhältnis von dem belastenden Gewichts bei der Waage ankommt wird im folgenden Umrechnungsfaktor k genannt. Der Umrechnungsfaktor lautet formelmäßig:

$$\text{tatsächliches Gewicht} = \frac{\text{angezeigtes Waagengewicht}}{k}. \quad (5.3)$$

Das tatsächliche Gewicht, mit dem die Waage belastet wird, lässt sich zurückrechnen, wenn die Funktion von k bekannt ist. Da das E-Modul der Blattfeder von der Temperatur abhängt, ist auch k eine Funktion von der Temperatur. Da eine Belastung des Wägesystems auch eine Verschiebung des gesamten Schwerpunktes des Luftkühlers mit sich bringt, wird k auch von der belastenden Masse abhängen. Folglich ist die Funktion des Umrechnungsfaktors gegeben durch:

$$k_i = f_i(T, m). \quad (5.4)$$

Um die Funktion nur von der zu belastenden Masse abhängig zu machen, wird die Kalibrierung bei einer konstanten Temperatur in der Klimakammer durchgeführt. Bevor die Kalibrierung startet werden alle Waagen mit 2000 g vorgespannt und dann mittels des Offset-Programms auf Null gesetzt. Für das Offset-Programm ermittelt die SPS die aktuelle Belastung, mittelt diese über 60 Sekunden und subtrahiert diese dann von dem angezeigten Waagengewicht. Für die Kalibrierung werden 5 Prüfgewichte (500...2500 g) zeitlich hintereinander genau über der Gewindestange platziert. Es folgt eine Einschwingphase des Wägesystems. Danach wird 60 Sekunden das angezeigte Waagengewicht aufgezeichnet und gemittelt. Da das genaue Gewicht der Prüfgewichte bekannt ist, kann k für diesen Belastungspunkt errechnet werden. Nach Beendigung der Messphase ist das nächst höhere Gewicht an der Reihe. Dieser Vorgang wird durchgeführt bis alle vier Waagen mit allen Prüfgewichten belastet und gemessen worden ist. Der Umrechnungsfaktor kann nun für jede Waage und jede Belastungsmasse interpoliert bzw. extrapoliert werden.

Die gesamte Eismasse im Verdampfer ist die Summe aller angezeigten Gewichte geteilt durch den zugehörigen Umrechnungsfaktor:

$$m_{Eis} = \frac{m_1}{k_1} + \frac{m_2}{k_2} + \frac{m_3}{k_3} + \frac{m_4}{k_4} \quad (5.5)$$

Der Schwerpunkt(SP) wird berechnet aus den Anteilen der Waagen am gesamten Gewicht am Verdampfer multipliziert mit ihrer eigenen Position. Der Nullpunkt des Koordinatenkreuzes wird auf die Mitte des Wärmeübertragers gelegt. Von hier wird dann der Ortpunkt jeder Waage ermittelt. Da nicht der ursprüngliche Schwerpunkt des gesamten Luftkühlers bekannt ist, kann durch die Schwerpunktsermittlung lediglich die Schwerpunktsverschiebung bestimmt werden. Diese Verschiebung wird auf den Mittelpunkt des Wärmeübertrager referenziert und ist bei jedem Start der Messung gleich Null. Für die x-Koordinate der Schwerpunktsverschiebung gilt folgende Formel:

$$x_{SP} = \frac{x_1 \cdot \frac{m_1}{k_1} + x_2 \cdot \frac{m_2}{k_2} + x_3 \cdot \frac{m_3}{k_3} + x_4 \cdot \frac{m_4}{k_4}}{\frac{m_1}{k_1} + \frac{m_2}{k_2} + \frac{m_3}{k_3} + \frac{m_4}{k_4}} \quad (5.6)$$

Hierbei ist x_i die Position jeder Waage. Die y-Koordinate des Schwerpunktes wird analog zu Gleichung ?? ermittelt.

Die Ergebnisse der Kalibrierung sind im Abschnitt 6.4 nachzulesen. 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 Kälteanlage, die zuvor nur manuell betrieben werden konnte, vollständig auf eine SPS umgebaut. Zu berücksichtigen ist dabei die Hardware-Schalschränke-Architektur des manuellen Betriebes. Für den manuellen Betrieb besaß die Kälteanlage zwei Schalschränke zur Versorgung der Komponenten mit der Hilfsenergie sowie zur Ansteuerung der Magnetventile und des Vierwegevents.

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 Kälteanlage 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 Kälteanlage ausschließlich über die SPS bedienbar sein. Der manuelle Betrieb über Schalter wird nicht mehr möglich sein. Die möglichen Betriebsmodi der Kälteanlage werden im Abschnitt 5.4 *informationstechnischen Konzept* erklärt und vorgestellt.

Das elektrische Konzept umfasst folgende Teilespekte 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, Gewichte der Waagen sowie die Ventilöffnungen der Expansionsventile. Das *Stellen von Aktoren* besteht aus der Sollwertvorgabe für die Kompressor- und Verflüssigerventilatordrehzahl, 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 Kälteanlage und die Funktionalität der Komponenten.

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

Für das Auslesen der Sensoren, die maximal 20 m von dem SPS-Schalschränke 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 5.3.2 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 Technology) unterstützen. Das EtherCAT verfügt neben ihrer Echtzeitfähigkeit(1.000 verteilte I/Os in 30 μ s[Bec, 2016b]) 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 vom Standard Ethernet Protokoll abgeleitet ist, bis an die jeweilige Busklemme übermittelt. Die Busklemme kann dann ihren Wert lesen bzw. schreiben. Dieses Verfahren erlaubt eine äußerst geringe Zykluszeit. Abbildung 5.7 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.

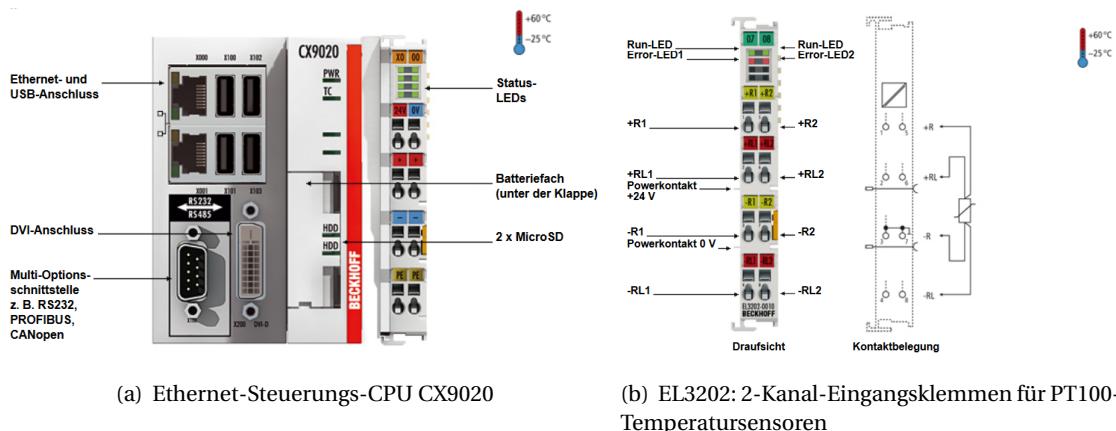


Abbildung 5.7: SPS-CPU und E-Busklemme der Fa. Beckhoff

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

Der CX9020 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 CX9020 wird über einen 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-

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

Bus mit den angeschlossenen Klemmen und versorgt diese über die Powerkontakte mit Spannung. Der Buskoppler ist in den CX9020 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-Auffrischungsklemme 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 sehr vielfältig. Sie unterscheiden sich in der Kanalanzahl, Genauigkeit, Auflösung etc. Abbildung 5.7 zeigt den CX9020 und eine EL 3202 für zwei PT100-Temperaturelemente.

Der Beckhoff-Schalschrank wird über eine separate Spannungsquelle, getrennt von anderen elektrischen Komponenten, versorgt. Dies erlaubt einen Betrieb der SPS, z. B. fürs Programmieren oder Testen, unabhängig von den anderen Schalschränken.

Folgende Komponenten der Kälteanlage werden elektrisch an die SPS angeschlossen:

- ▷ Kompressor-Frequenzregelung geregelt mit einem analogem Ausgangssignal 4..20 mA
- ▷ Verflüssigungsregelung geregelt mit einem analogem Ausgangssignal 0..20 mA
- ▷ Elektrische Heizungselemente gesteuert mit einem 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 RS485-Busklemme

- ▷ Waagen-Auslesung über RS232-Schnittstelle
- ▷ 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. [MicroNova AG, 2011]

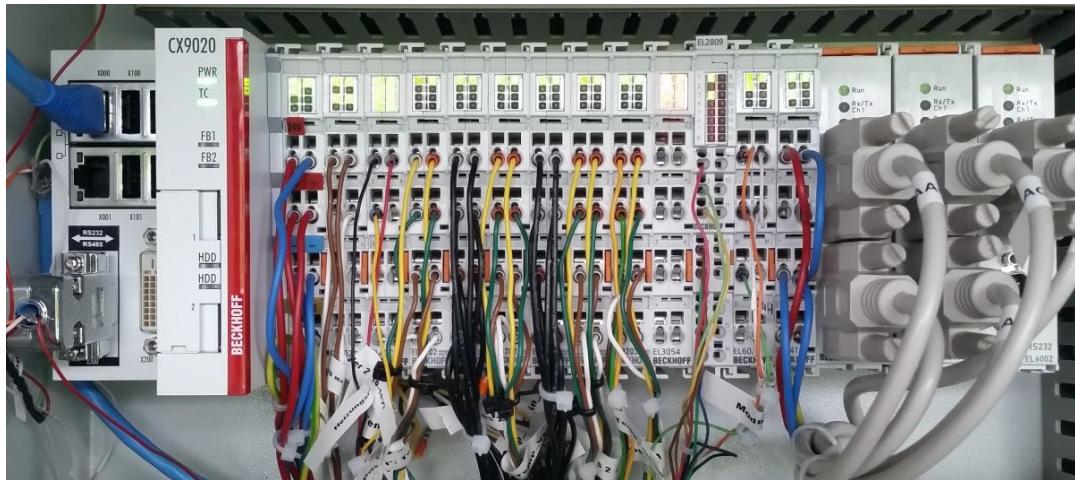


Abbildung 5.8: Verkabelung von CX 9020 und Busklemmen

5.3.1 RS232-Kommunikation zwischen SPS und KERN-Waage

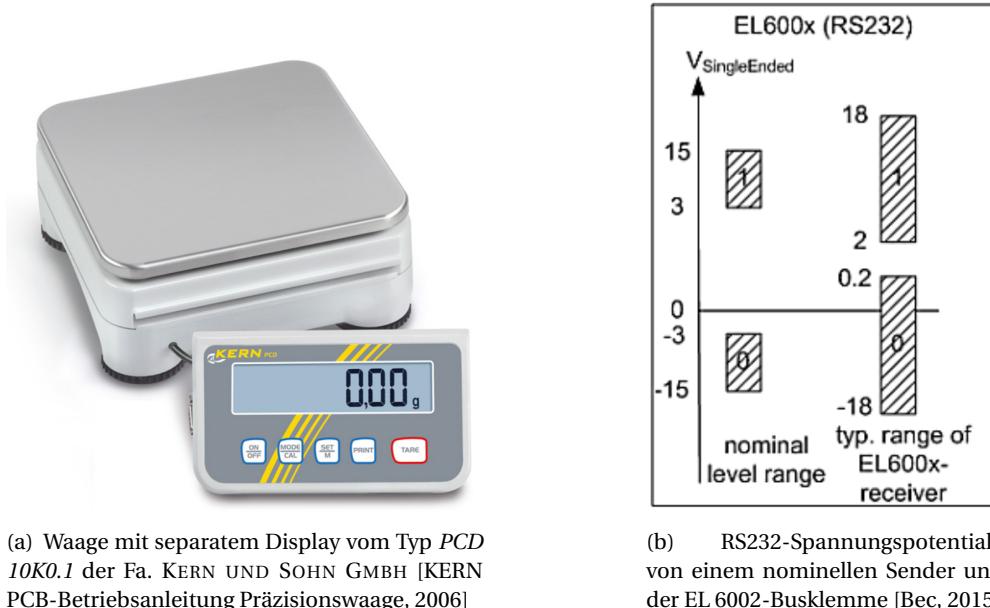


Abbildung 5.9: Waage mit Spannungspotentiale für eine RS232-Kommunikation

Das Wägesystem verfügt zurzeit über 5 Waagen, die kontinuierlich von der SPS ausgelesen werden sollen. Jede Waage besteht aus zwei miteinander verbunden Teilen: die Wägeeinheit und das Display mit der RS232-Schnittstelle, vgl. Abbild 5.9. Das Datenverbindungskabel zwischen Waage und Display wurde verlängert, sodass sich die Displays in der Nähe des SPS-Schaltkrankes befinden. Der Hersteller empfiehlt die Länge von 2 m für die RS232-Verbindung nicht zu überschreiten. Über die Datenschnittstelle kann die Waage Befehle empfangen und Messdaten bzw. Fehlermeldungen senden.

Eine RS232-Kommunikation arbeitet *bitseriell* und diesem Fall mit einem 8-bit ASCII-Code. RS232 ist eine Spannungsschnittstelle. Binäre Zustände werden durch unterschiedliche Spannungspegel realisiert und versendet. Der Spannungspegel für eine RS232-Kommunikation ist in Abbild 5.9(b) dargestellt. [Schleicher, 2005]

Hierfür wird ein serielles D-Sub-Kabel benutzt, das an einem Ende einen männlichen D-Sub-Stecker für die EL 6002-Busklemme hat und einen weiblichen D-Sub-Stecker für die Waagen-Schnittstelle. Abbildung 5.10 zeigt die Verkabelung für die RS232-Kommunikation.

Die Waagen sind in der Klimakammer aufgestellt und ihre Sendeeigenschaften werden in den Einstellungen auf *AU PC* gestellt. Die Waagen senden dadurch kontinuierlich ihre aktuellen Messdaten an die Klemme, ohne Aufforderung der SPS. Auch wenn die Werte instabil sind, werden sie gesen-

det. Die Auslesung der gesendeten Daten bzw. des Prozessbildes erfolgt dann über Funktionsbausteine und Programme auf der SPS, siehe Abschnitt 5.4.

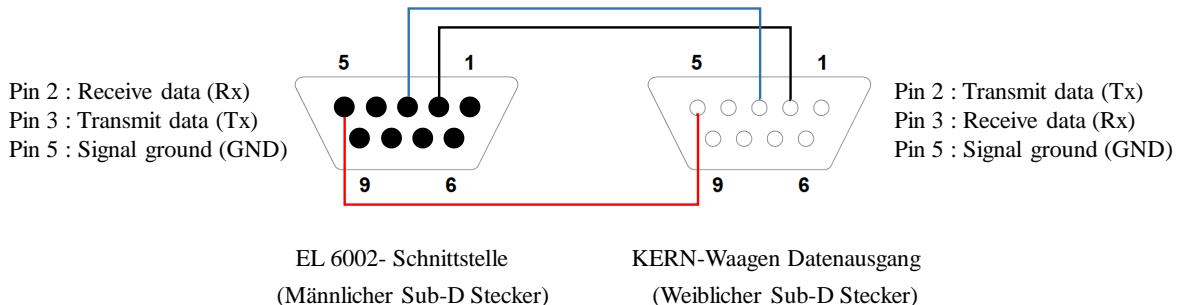


Abbildung 5.10: Verkabelung für die RS232-Kommunikation zwischen der Busklemme EL 6002 und einer Waage

5.3.2 RS485-Kommunikation zwischen SPS und Sensoren über MODBUS RTU

Ein Auslesen von Sensoren kann über analoge Ausgangssignale, z. B. 4-20 mA oder älter 0-20 mA, geschehen oder über Bussysteme. Beide Varianten sind in der Praxis weit verbreitet. Welche Variante zum Einsatz kommt, ist vor allem von der Menge der eingesetzten Sensoren und der Entfernung zwischen ihnen abhängig. Feldbusse sind nach der Norm IEC 61158³ weltweit standardisiert.

Die Verwendung von Feldbussen hat sowohl Vor- und Nachteile. Die Vorteile sind der geringe Verkabelungsaufwand und die Möglichkeit der Eigendiagnose durch das System selbst. 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. Für eine erfolgreiche Implementierung eines Feldbus-Systems wird ein höher qualifiziertes Personal benötigt. Des Weiteren erfordert eine Abfrage der Sensoren meist eine größere Reaktionszeit. Sensoren mit entsprechender Feldbusstechnik sind häufig teurer als Sensoren, die mit analoger Datenübertragung ausgestattet sind. Eine Beschädigung des Kabels kann in manchen Fällen zum Ausfall des kompletten Feldbusses und dessen Sensoren führen. Redundante Netzwerke sind folglich wünschenswert, jedoch nicht immer umsetzbar.

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

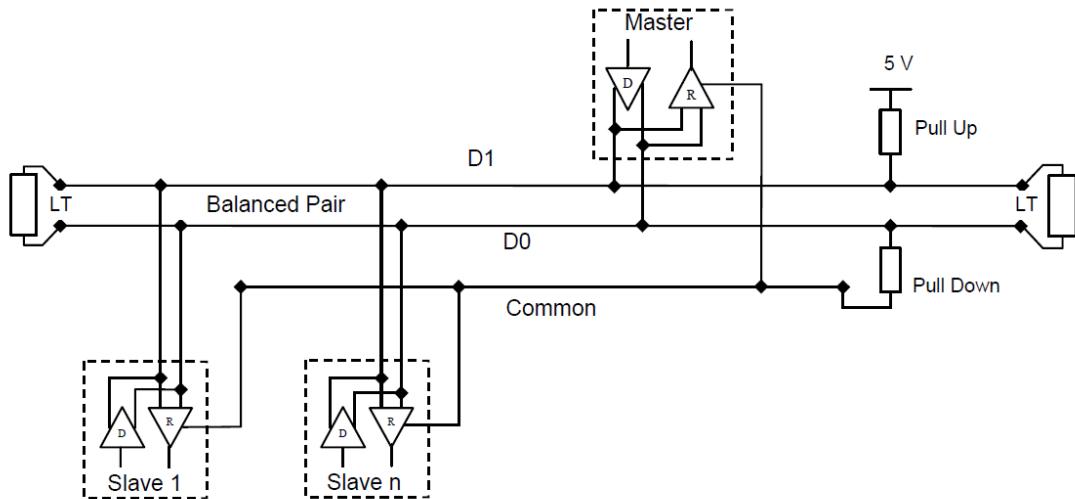


Abbildung 5.11: Zwei-Kabel-Topologie eines MODBUS RTU- Feldbusses [MODBUS.ORG, 2002]

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 Empfängererkabel werden hingegen nur von den Slaves empfangen. Beide Kabeltypen sind *monodirektional*.

Wird eine Zwei-Kabel-Topologie verwendet, so wird von einer *bi-direktionalen* Verkabelung gesprochen. 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 5.11 zeigt eine typische Zwei-Kabel-Topologie mit Abschlusswiderständen (engl. *Line-Termination(LT)*), einem *Pull-up*- und *Pull-Down*-Widerstand. Abschlusswiderstände (meist $150\ \Omega$, 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 Kontenpunkte am Prüfstand installiert. Von den Kontenpunkten gehen Stichleitungen mit Datenkabeln und bei den Drucktransmittern auch die Spannungsversorgung zu den Slaves ab. Ein Knotenpunkt ist außerhalb der Klimakammer an dem Verflüssigungssatz. Im Abbild 5.12 sind die Knotenpunkte mit *Kälteanlage* und *Klimakammer* gekennzeichnet. Die Empfehlungen für die Länge der Stichleitung hängt vom Hersteller ab. An diesem Versuchsaufbau sind die Stichleitungen nicht länger als 6 m.

Aufgrund der Inkompatibilität von zwei Slavetypen, KELLER- Drucktransmitter und CAREL-Expansionsventilen, wurde ein weiterer Modbus aufgebaut. Genauer wird das Problem in Abschnitt ?? erklärt. Die Lösung des Problems sind zwei voneinander unabhängige Modbus-Systeme. Ein Modbus wird über die COM-Schnittstelle des CX9020 betrieben und der zweite Modbus über die Klemme EL 6021. Abbildung 5.12 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.

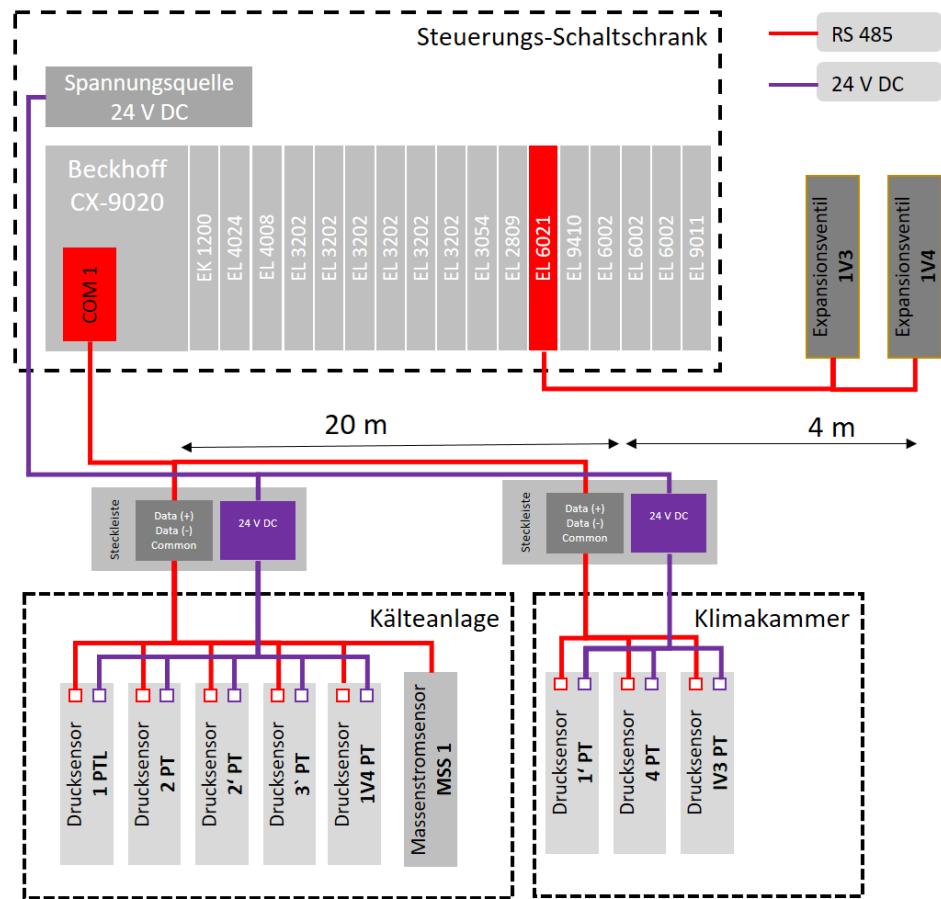


Abbildung 5.12: Zwei Modbus-Feldbusse mit angeschlossenen Sensoren, Busklemmen und Spannungsspeisung

5.4 Informationstechnischer Aufbau

In diesem Abschnitt wird der informationstechnische Aufbau der Kälteanlage vorgestellt und erläutert. Eine Grundlage für die Software-Entwicklung für die Kälteanlage waren das Vorgehen und Erfahrungen aus dem Aufbau der Klimakammer und dessen SPS-Entwicklung. Das Grundgerüst für die SPS bildet die Ablaufstruktur aus dem Klimakammer-Projekt, nachzulesen in NÜRENBERG. Das Konzept wurde an die Anforderung der Kälteanlage angepasst sowie in einigen Teilen weiterentwickelt und um neue Programme und Ablaufstrukturen ergänzt. Zunächst wird das Grundkonzept sowie das Vorgehen erläutert, um später auf die Konzepte und Teilprogramme näher einzugehen.

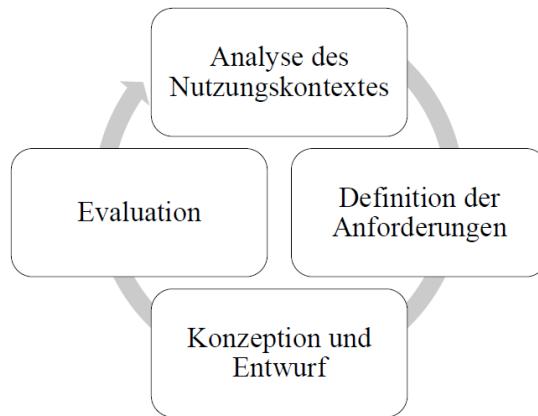


Abbildung 5.13: Prozessschritte beim *User Centered Design* [Nürenberg, 2015]

5.4.1 User Centered Design(UCD)

Für die Software-Entwicklung für die Kälteanlage wird der Ansatz des *User Centered Design* (UCD) verfolgt. Dieser Ansatz dient zur Gestaltung von interaktiven Systemen. Im Mittelpunkt stehen hierbei die Bedürfnisse, Fähigkeiten und Erfahrungen vom Endanwender. Es wird sowohl für die Produktentwicklung als auch in der Softwareentwicklung eingesetzt. Sie beruht auf der alten Norm EN ISO 13407⁴ und ging in der neuen Norm EN ISO 9241-210⁵ auf. [Normung, 2010]

Das Konzept besteht aus vier Prozessschritten. Zunächst werden in der *Analyse des Nutzungskontextes* die Benutzergruppe, ihr fachlicher Hintergrund und ihre Arbeitsaufgaben definiert. Bei der Benutzung der Kälteanlage handelt es sich um Entwickler oder um eingewiesenes Personal. Beide verfügen über ein gutes bis sehr gutes technisches und thermodynamisches Verständnis. Sie kennen die Funktionen der einzelnen Bauteile und das Verhalten des Prüfstandes. Technische Fachtermini sowie englische Begriffe werden vorausgesetzt. Des Weiteren verfügt es über Erfahrungen im Umgang mit PC-Software.

Nach der Definition und Analyse des Nutzungskontextes folgt die nächste Phase der *Definition der Anforderungen*. Die Anforderungen der Software werden festgelegt und danach in zwei Untergruppen unterteilt. Die eine Untergruppe beinhaltet alle Aufgaben, die vom Benutzer ausgeführt werden. Die andere Untergruppe definiert alle Aufgabenfelder, die von der Technik ausgeführt werden sollen. Vom Benutzer werden die folgenden Arbeitsfelder ausgeführt:

- ▷ Messen
- ▷ Steuern und Regeln

⁴EN ISO 13407: Benutzer-orientierte Gestaltung interaktiver Systeme

⁵EN ISO 9241-210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme

- ▷ Beobachten und Analysieren
- ▷ Optimieren.

Um diese Arbeitsfelder durchführen zu können, werden die *Basisanforderungen* an die Software definiert. Diese umfassen die Sicherheit für Mensch und Maschine, ein effizientes und komfortables Arbeiten. Zuletzt soll die Software flexibel und erweiterbar sein.

Nach der Erfassung der Anforderungen geht die Software-Entwicklung zur nächsten Phase über. Diese umfasst die *Konzeption und Entwurf* der Prüfstandssoftware. In der Arbeit von NEUMANN [Neumann, 2007] werden zu beachtende Gesetze für diese Phase aufgelistet. Diese Gesetze sollen ein späteres effizientes, angenehmes Arbeiten ermöglichen. In [Preim, 2013] werden 15 Punkte genannt, die es bei der Entwicklung einer ergonomischen Softwareentwicklung zu berücksichtigen gilt.

Die letzte Phase des UCD ist die kontinuierliche *Evaluation* der Software. Der Kreis des UCDs ist nun geschlossen und fängt von vorne an. Es ist ein kontinuierlicher Prozess für eine bessere und effizientere Software für die definierten Aufgabenfelder.

5.4.2 Statusmaschine

Die Statusmaschine ist das Werkzeug zur Umsetzung der vom UCD definierten Basisanforderungen an die Kälteanlage-Software. Das Werkzeug für eine kontinuierliche und zuverlässige Ausführung der Anforderungen ist eine Speicher-Programmierbare-Steuerung (SPS) am besten geeignet. Die SPS gewährleistet die kontinuierliche Ausführung des Programm-Codes und besitzt eine hohe Kompatibilität mit der eingesetzten Hardware inklusive Regler und Sensoren der Kälteanlage.

Die SPS ermöglicht das Weiteren das Lesen und das Schreiben jeder Variablen innerhalb eines Zykluses. Ein herkömmliches PC-Programm ist, im Gegensatz zu dem zyklusgesteuerten SPS-Programmcode, ereignisgesteuert. Die Dauer für einen Durchlauf des Programmes in einem herkömmlichen PC-Programm variiert je nach Belegung des Arbeitsspeicher und Auslastung der CPU. Der Ablauf einer zyklusgesteuerten SPS lässt sich unterteilen in folgende Teilschritte:

1. Nach Bereitschafts-Kontrolle aller angeschlossenen Baugruppen wird das Prozessabbild aller Eingänge aktualisiert. Der Status aller Eingangs-Busklemmen wird abgefragt
2. Die SPS gibt die Kontrolle an den Anwender-Code und durchläuft diesen. Als Ergebnis entsteht ein neues Prozessabbild der Ausgänge.
3. Die Kontrolle wird nun wieder an das Betriebssystem der SPS übergeben und diese gibt das Prozessabbild weiter an die Busklemmen.

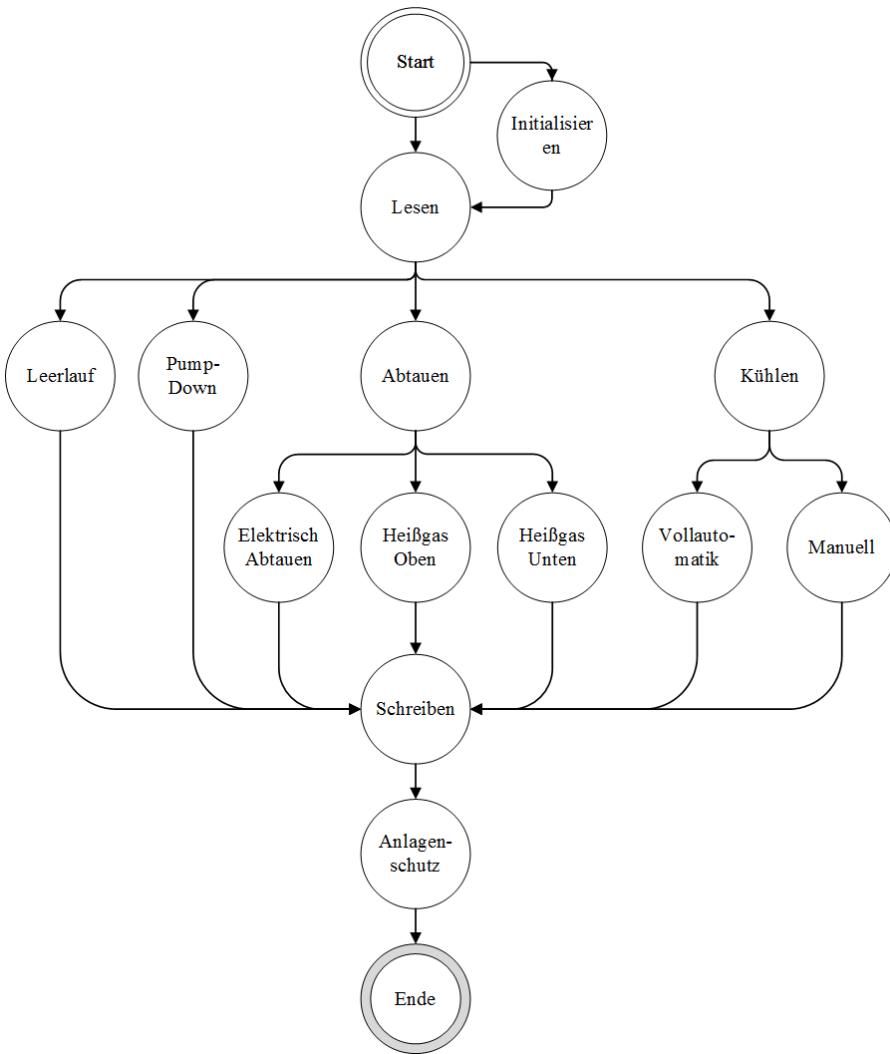


Abbildung 5.14: Statusmaschine

Nachdem alle Teilschritte durchlaufen sind, beginnt der Zyklus erneut. Die Zeiten für einen Zyklus variieren je nach Anwendung und können vom Benutzer eingestellt werden. Die zyklische Verarbeitung von einem Programmcode kann dazu führen, dass Funktionen Ergebnisse gegenseitig beeinflussen oder den Wert einer Variable öfters überschrieben werden könnte. Deshalb wird das Konzept einer sogenannte Statusmaschine verwendet. Eine Statusmaschine orientiert sich dabei an der grundsätzlichen Ablaufstruktur einer zyklusgesteuerten SPS. Das Verwenden einer Statusmaschine erleichtert eine gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Zustände.

Die Verwendung einer Statusmaschine verkürzt den zu durchlaufenden Programmcode und erleichtert eine Fehlersuche und -analyse. Des Weiteren ist eine Statusmaschine leichter zu designen, nachzuvollziehen und zu diskutieren. Das Abbild 5.14 verdeutlicht den Aufbau des Statusmaschine-

Konzeptes.

Die Statusmaschine beginnt ihren Zyklus beim Start. Dort wird über eine Transitionsvariable entschieden, ob die Prozessparameter neu initialisieren werden sollen. Ist dies nicht der Fall, so wird sofort in den Status *Lesen* gewechselt. Im weiteren Verlauf entscheiden weitere Transitionsvariablen über den nächsten Zustand der Statusmaschine.

Statusmaschine: Initialisieren

Während des Initialisierungsvorgangs werden Daten aus den Datenbanken eingelesen und an die Variablen weitergegeben. Das Konzept der Datenbanken beruht hauptsächlich auf dem Programm *DB_leSEN* von NÜRENBERG[Nürenberg, 2015]. Die Verbindung zu einer Tabelle aus der Datenbank wird mittels des Funktionsblockes *FB_DBRecord-ArraySelect* hergestellt. Aus der Tabelle werden dann eine bestimmte Menge an Datensätzen gelesen. Die Verbindungsinformationen zur Datenbank und Tabelle werden über das Beckhoff-Konfigurationstool *Database Server Konfigurator* hergestellt und verwaltet. Rückgabewert des Funktionsbausteins *FB_DBRecord – ArraySelect* ist ein Array der Struktur der Tabelle. Bei keinem Fehler ist die Tabelle mit Werten von der Datenbank gefüllt und die Array-Größe ist größer als Null. Kommt es zu einem Verbindungsfehler, können die Daten nicht eingelesen werden und die Arraygröße ist gleich Null. Dann wird die Fehler-Boolvariable *bDBFehler* auf TRUE gesetzt und die Statusmaschine verharrt im Status *Initialisieren*.

Das gefüllte Array mit den Tabellenwerten wird im folgenden Schritt an die lokale Struktur übergeben. NÜRENBERG verwendet hierzu eine Kombination aus einer FOR-Schleife mit einer IF-Abfrage. Mit der FOR-Schleife wird die ID-Nummer hochgezählt und falls der Variablenname mit dem lokalen Namen übereinstimmt, in deren Struktur übergeben. NÜRENBERG schreibt in seiner Arbeit von Problemen mit der Verbindung zur Datenbank in dem ersten Zyklus und setzt daher einen *Timer* ein. Der *Timer* startet den Lese-Prozess drei Sekunden nach dem Start der Statusmaschine und fängt an die Datensätze zu lesen. In dem jetzigen Programmablauf wird das Timeout für den Funktionsbaustein auf 150 ms gestellt und auf den *Timer* verzichtet. Das führt dazu, dass das System der Kommunikation zwischen SPS und Datenbank mehr Zeit gibt, bevor der Prozess abgebrochen wird und die Fehlervariable auf TRUE gesetzt wird. Dies hat den gleichen Effekt wie der Einsatz eines Timers. Die Datenbanken werden jedoch im ersten Zyklus ausgelesen.

Stoffwerte, die mittels Datenbankübertragung, an die SPS geliefert werden, sind lokal als *Persistente Variablen* gespeichert. Neukompilieren, Neustarten der SPS oder Programmänderungen haben keinen Einfluss auf die Variablenwert. Die SPS speichert die Variablen lokal auf ihrem Speicherplatz. Dadurch werden die Daten für die Stoffwerte nur dann gelesen, wenn der Benutzer dies mittels der Boolvariable *bLeseStoffwerte* entscheidet. Im Gegensatz zu den anderen Datenbanken, beispielsweise mit Reglereinstellungen, verändern die Stoffwerte sich nicht. Deshalb müssen diese nicht je-

des Mal beim Starten der SPS gelesen werden. Werden die Stoffwerte-Tabellen in der Datenbank angepasst bzw. das Abfrageraster der Werte verkleinert, so muss man die lokalen Strukturen und Iterationsverfahren daran anpassen.

Des Weiteren wird während Initialisierung der Status des Wägesystems kontrolliert. Sind die Waagen korrekt mit 2 kg vorbelastet, jede Feder gewichtskalibriert und der alle Offsets ermittelt, wird die Boolvariable *bWaagenBereit* auf TRUE gesetzt. Diese Abfrage gilt nur zur Kontrolle. Das System startet auch ohne die vorher aufgelisteten Schritte, die im Status *Leerlauf* durchgeführt werden.

Nach erfolgreichem Abschließen geht die Statusmaschine in den nächsten Status: *Lesen*.

Statusmaschine: Lesen

Im Status *Lesen* werden folgende Schritte durchgeführt:

- ▷ Temperatur-Eingänge werden ausgelesen
- ▷ Waagen-Eingänge werden aus Datenpuffer gelesen, vgl. Abschnitt ??
- ▷ Ablaufstruktur für Modbus RTU, vgl. ??
- ▷ Berechnungsprogramm für Enthalpien der Zustandspunkte und 2-D Schwerpunkttermittlung der Eismasse im Luftkühler.

Die Klemmenwerte der Busklemmen werden gelesen und in native Werte umgerechnet, z. B. 4..20 mA oder 0..10V. Dieses Vorgehen ermöglicht ein komfortableres und effizienteres Arbeiten und Verarbeiten der Signale auf Seiten des Benutzers. Die Umrechnung von Klemmenwerten (*INT_VAR*) in native Werte(*REAL_VAR*) erfolgt über eine einfache Geradengleichung mit den Parameter *PARA_M* als Geradensteigung und *PARA_C* als y-Achsenabschnitt :

$$REAL_VAR = PARA_M \cdot INT_VAR + PARA_C; \quad (5.7)$$

? benutzt für die Umrechnung 5.7 die Funktion *FB_SPS_zu_Nativ_lin*. Die Parameter und die Geradengleichung werden in der Datenbank für die jeweilige Struktur hinterlegt. Für Eingangswerte werden die Strukturen *INPUT_VAR* und für Ausgangswerte *OUTPUT_VAR* eingeführt. Die Umrechnung von nativen Werten in Klemmenwerten erfolgt im Schritt *Schreiben*.

Statusmaschine: Leerlauf

Ist keine Transitionsvariable beim Start der SPS ausgewählt, so geht die SPS automatisch nach dem Status *Lesen* in den Status *Leerlauf* über. In diesem Status werden alle Komponenten der Kälteanlage spannungsfrei geschaltet und alle Regler auf nicht aktiv(FALSE) gesetzt. In diesem Status wird zu

Beginn jeder Messung das Wägesystem kalibriert werden. Danach kann der Benutzer zur Messung übergehen. Der genaue Kalibrierungsablauf ist in Abschnitt ?? beschrieben.

Befindet die Anlage sich im Kühl- bzw. Abtau-Modus und dieser wird manuell oder automatisch durch den Anlagenschutz abgebrochen bzw. beendet, so geht die Anlage in den sicheren Betriebsmodus *Leerlauf*.

Nach dem *Leerlauf* geht die SPS in den Status *Anlagenschutz* über.

Statusmaschine: Pumpdown

Der Status *Pumpdown* bewirkt ein Absaugen des Kältemittels aus dem Verdampfer, um mögliche Kältemittelverlagerungen während einer Stillstandsphase vorzubeugen (vgl. [Siemens Schweiz AG, 2007]). Das Kältemittel wird durch den Kompressor angesaugt, durch den Verflüssiger kondensiert und dann unter hohem Druck in den Sammler gedrückt. Damit kein weiteres Kältemittel aus dem Sammler in den Verdampfer nachströmt, bekommt das Expansionsventil per Modbus den Befehl zum Schließen. Das geschlossene Expansionsventil verhindert weiteres Eindringen des Kältemittels in den Verdampfer. Der Druck sinkt auf der Niedrigdruckseite und steigt auf der Hochdruckseite.

Der Pumpdown führt zu einem starken Temperaturabfall in dem Verdampfer und den Rohrleitungen, sodass Temperaturen bis zu -20 °C erreicht werden. Um zu starke Unterkühlungen zu verhindern, wird der Kompressor beim Pumpdown mit der niedrigsten Drehzahl bei 4 mA betrieben. Fällt der Niedrigdruck vor dem Kompressor unter 1,5 bar, so ist der Pumpdown abgeschlossen.

Für die Schaltung der Schaltschütze zur Spannungsfreigabe sowie die Schaltung der Magnetventile wurde der Funktionsbaustein *FB_Schuetzstellung* programmiert. Der Funktionsbaustein hat als Input-Variable *myStatus*, die vom TYPE *Status_Schuetzstellung* ist. Der TYPE *Status_Schuetzstellung* beinhaltet sechs verschiedene Schaltungssituationen:

- ▷ *KuehlenOben*
- ▷ *AnlagenPumpDown*
- ▷ *AnlagenPumpDown_rev*
- ▷ *AbtauenOben*
- ▷ *AbtauenUnten*
- ▷ *AbtauenElektrisch*

Dieser Funktionsbaustein ist als Globale Variable deklariert und kann so aus jedem Programm aufgerufen werden. Dies ermöglicht dem Benutzer, die Schaltung der elektrischen Bauteile ohne die genauen Schaltpläne nachvollzogen zu haben und vermeidet Fehler bei der Programmierung.

Um einen Pumpdown durchführen zu können, werden die Transitionsvariablen *bPumpDown* und *bPumpdown_rev* auf TRUE gesetzt. Die Statusmaschine durchläuft nun bei jedem Zyklus den Pumpdown-Status. Unterschreitet der Saugdruck die 1,5 bar, ist der Pumpdown erfolgreich abgeschlossen. Die Transitionsvariablen *bPumpdown* und *bPumpdown_rev* werden wieder auf FALSE gestellt und die Variable *bPumpDownAbgeschlossen* bzw. *bPumpDown_revAbgeschlossen* auf TRUE. Der Funktionsbaustein *Status_Schuetzstellung* schaltet automatisch alle Komponenten spannungsfrei. Die Anlage wird neu initialisiert, um die Sollwerte für den Kühlmodus wieder zu laden und an die lokalen Strukturen weiterzugeben.

Der Pumpdown kann bei normaler Strömungsrichtung durchgeführt werden, um den Verdampfer in der Klimakammer zu entleeren. Es ist aber auch ein umgekehrter Pumpdown (*AnlagenPumpDown_rev*) implementiert. Dieser erlaubt es, das Kältemittel der Hochdruckseite abzusaugen und in den Sammler über den Verdampfer in der Klimakammer zu pumpen. Der normale Pumpdown wird nach einer Vereisungsphase vor dem Abtauen, aber auch vor dem Ausschalten der Kälteanlage automatisch ausgeführt bzw. manuell betätigt.

Der umgekehrte Pumpdown kann in manchen Situation aktiviert werden, führt mitunter aber zu unerwünschten Betriebsbedingungen, siehe hierzu Abschnitt 6.

Der nächste Status ist *Anlagenschutz*.

Statusmaschine: Abtauen

Der Status *Abtauen* ruft zwei Programme auf: *Regelung()* und *Abtauung()*.

Das Abtauprogramm orientiert sich an der Empfehlung für den Abtauprozesses des Forschungsrates für Kältetechnik für die verschiedenen Abtaumethoden. Es hat die CASE-Struktur, um einen effizienteren Programmcode, aber auch die Verständlichkeit und Fehlersuche zu optimieren. Die CASE-Struktur ist in Teilschritte unterteilt, die ihren Programmcode ausführen und dann in den nächsten Teilschritt, soweit die Bedingungen dafür erfüllt sind, übergehen. Je nach Abtaumethode wird die CASE-Struktur anders durchlaufen. Gleich bei allen Vorgängen ist, dass zunächst ein PumpDown durchgeführt wird und dann die Abtaumethode für das Abtauen geregelt wird. Bei der elektrischen Abtauung ist das Kriterium für ein erfolgreiches Abtauen die Überschreitung von 10 °C vom Temperaturfühler im vereisten Verdampfer.

Bei der Heißgas-Abtauung ist die vorgegebene *Abtaudauer* entscheidend. Sie wird von dem Benutzer festgelegt und solange wird der Verdampfer mit Heißgas durchströmt. Ist die Zeit abgelaufen, wird der Kompressor ausgeschaltet und in den nächsten Teilschritt übergegangen.

Wurde der Abtauvorgang erfolgreich abgeschlossen oder durch den Benutzer abgebrochen, werden alle Bool-Variablen, Timer und Komponenten zurückgesetzt bzw. spannungsfrei geschaltet. Die gesamte Abtaudauer wird an die Variable *LetzteAbtaudauer* übergeben.

Der nächste Status ist der *Anlagenschutz*, es sei denn, der der Abtauvorgang wird durch die Transitionsvariable *bAbtauAbbrechen* abgebrochen. In diesem Falle werden alle Komponenten spannungsfrei geschaltet. Alle Abtau-Transitionsvariablen werden auf FALSE gestellt. Der nächste Status ist der *Leerlauf*.

Statusmaschine: Kühlen

Der Status *Kühlen* wird eingeschaltet, sobald die Transitionsvariable *bKuehlen* auf TRUE gesetzt worden ist. Im Kühlmodus findet die Vereisung des Verdampfers statt. Er besitzt 2 Modi. Der erste automatisch aktivierte Modus ist der *Vollautomatikmodus*; der zweite Modus ist der *Manueller Modus*. Im *Vollautomatikmodus* sind alle Regler *aktiv* sowie der Kompressor und die Ventilatoren von Verflüssiger und Verdampfer eingeschaltet. Im *Manuellen Modus* besteht die Möglichkeit Regler einzeln zu testen oder zu parametrieren. Alle Regler und Komponenten der Kälteanlage sind ausgeschaltet. Der Benutzer kann diese manuell einschalten und regeln. Außerdem hat er die Möglichkeit, den Anlagenschutz zu umgehen, indem er die Transitionsvariable *bAnlagenschutzModus* auf FALSE setzt. Initialisiert wird die Boolvariable jedoch mit TRUE. Der Anlagenschutz greift in diesem Falle nicht. Deshalb sollte diese Option mit äußerster Vorsicht bedient werden. Der nächste Status ist in diesem Falle *Schreiben*.

Im *Kuehlen*-Status wird nun auch die Transitionsvariable *bVollautomatikModus* auf TRUE gesetzt. In beiden Modi laufen zwei Hauptprogramme:

- ▷ Regelung()
- ▷ Vereisung()

Das *Regelung()*-Programm ist wie in den anderen Zuständen verantwortlich für die Regelung der PID-Regler, vgl 5.4.8. Das Programm *Vereisung()* stellt den Status des Funktionsbaustein *FB_Schuetzstellung* auf *Kuehlen* und startet den Timer *TimerVereisung* mit der *Vereisungszeit*, die vom Benutzer eingestellt wird. Nach Ablauf dieser *Vereisungszeit* wird der Vereisungsvorgang nicht beendet, sondern lediglich eine Meldung als STRING in die Variable *Mitteilung* geschrieben.

Statusmaschine: Anlagenschutz

Für den Betrieb einer Maschine, in diesem Fall einer Kälteanlage, ist ein Anlagenschutz unabdingbar. Er ist essentiell für die Sicherheit von Mensch und Maschine. Nach einer Risikomanagement-analyse werden verschiedene Szenarien entworfen und über Faktoren *Wahrscheinlichkeit* und *Schaden* das resultierende Risiko berechnet. Bei einem unvertretbar hohen Risiko müssen Maßnahmen zur Reduzierung getroffen werden. Diese Maßnahmen können sowohl hardware-technischer und

software-technischer Natur sein. Hier werden die Schutzfunktionen auf der Software-Seite aufgezeigt:

- ▷ Unter- und Überdruckschutz
 - Die Kälteanlage kann nur in einem Druckbereich von 1 bis 15 bar betrieben werden. Bei Unter- bzw. Überschreitung wird der Kompressor ausgeschaltet.
- ▷ Überhitzungsschutz für den Kompressor
 - Die Ausgangstemperatur beim Kompressor darf im Betrieb nicht die 90 °C überschreiten. Ist dies der Fall, so wird die Anlage gestoppt und in den *Leerlauf* versetzt.
- ▷ Überhitzungsschutz für den Verdampfer
 - Wird die Temperatur von 80 °C im Verdampfer überschritten, kann es zu Rohrissen im Wärmeübertrager kommen und Kältemittel austreten. Bei Überschreitung wird die Anlage in den *Leerlauf* versetzt und alle Komponenten werden ausgeschaltet.
- ▷ Sensorausfall
 - Fällt ein Drucksensor aus, so ist der Anlagenschutz nicht mehr garantiert, deshalb wird die Anlage gestoppt und in den *Leerlauf* versetzt. Ein Betrieb der Anlage ist nur möglich, wenn alle Sensoren einwandfrei funktionieren.
- ▷ Sensorschutz Waagen
 - Die Waagen sind bis zu einer Belastung von 10 kg ausgelegt. Eine Überlastung könnte zu einer Zerstörung des Dehnungsstreifens führen. Deshalb wird im Falle einer Vereisung eine elektrische Abtauung eingeleitet, um die Waagen zu entlasten.

Nach dem Anlagenschutz folgt der Status *Schreiben*.

Statusmaschine: Schreiben

Der Status *Schreiben* dient zur Übertragung des Prozessbildes nach dem Durchlaufen des Zykluses an die Ausgangsklemmen. Hierfür werden die nativen Werte wieder zurück in Integer-Klemmenwerte umgerechnet.

Die Gleichung 5.8 zeigt an dem Beispiel für die Umrechnung des Sollwertes für den Kompressor *Soll_KP*

$$Soll_KP.INT_VAR_Output = \frac{Soll_KP.REAL_VAR - Soll_KP.PARA_C}{Soll_KP.PARA_M}. \quad (5.8)$$

Für diese Berechnungsformel setzt NÜRENBERG die rekursive Funktion *FB_Nativ_zu_SPS_lin* ein. Die Umrechnung der Sollwerte erfolgt in den Programmen *SchreibeSollwerte()*. Der nächste Status ist *Lesen* bzw. *Initialisieren*.

5.4.3 TwinCAT 3

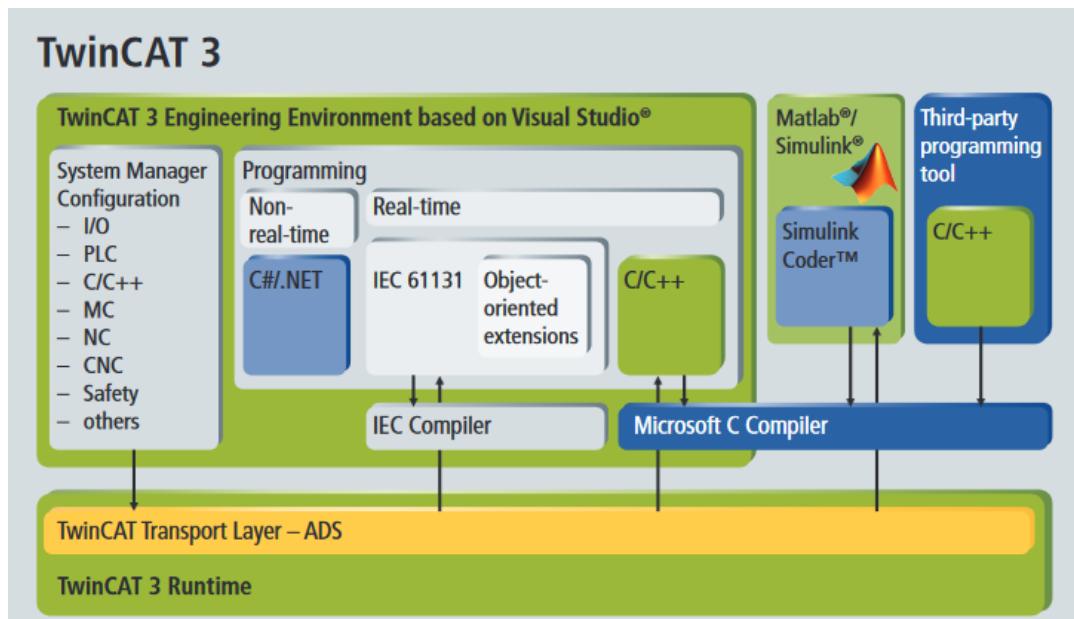


Abbildung 5.15: TwinCAT 3 [Bec, 2016b]

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellte Statusmaschine soll mittels einer SPS Programmierung umgesetzt werden. Zur informationstechnischen Umsetzung wurde die Automatisierungssoftware TwinCAT 3 der Fa. Beckhoff verwendet. TwinCAT ist die Abkürzung von *The Windows Control and Automation Technology* und ist in die Entwicklungssoftware von Microsofts Visual Studios integriert. Über das Visual Studios wird der Programm-Code kompiliert, debugged, ausgeführt und überwacht. Sie ermöglicht es, den lokalen PC mit der SPS zu verbinden.

TwinCAT 3 unterteilt sich hauptsächlich in zwei Unterpunkte:

- ▷ *eXtended Automation Engineering* (XAE)
- ▷ *eXtended Automation Runtime* (XAR).

Abbildung 5.15 zeigt den softwaretechnischen Aufbau von TwinCAT 3 sowie deren Schnittstellen und Unterstrukturen.

Das *eXtended Automation Engineering* (XAE) ermöglicht durch ihre Orientierung an der IEC 61131-3⁶ die Verwendung von folgenden Sprachen :

- ▷ Anweisungsliste (AWL)
- ▷ Kontaktplan (KOP)
- ▷ Funktionsbaustein-Sprache (FBS)
- ▷ Ablausprache (AS)
- ▷ Strukturierter Text (ST).

Über die Norm-Programmiersprachen hinaus ist es möglich, echtzeitfähige, externe C++- Programme als auch nicht echtzeitfähige Programme mit VB.NET als Programmiersprache in das Projekt einzubinden. Eine weitere Software-Schnittstelle erlaubt eine Verbindung zu Toolboxen wie *MATLAB* oder *Simulink*. Des Weiteren eignet sich diese Schnittstelle zur Herstellung von einer Verbindung zu Datenbank-Software wie z. B. *MySQL* oder *MariaDB*. Die erzeugten Objekte, auch Module genannt, können unabhängig von ihrer Programmiersprache, in der sie erzeugt wurden, Daten austauschen und sich gegenseitig aufrufen.

eXtended Automation Engineering beinhaltet das Daten-Analyse-Programm *Scope*. Wie auch TwinCAT selber ist *Scope* in Microsofts Visual Studios eingebunden. Das *Scope* unterteilt sich in *Scope View* und *Scope Server*. *Scope View* erlaubt die Echtzeitdarstellung von Messdaten. *Scope Server* ist für die eigentliche Aufnahme der Daten verantwortlich.

eXtended Automation Runtime (XAR) ist zuständig für die Kommunikation von allen angeschlossenen Geräten, Feldbussen und Busklemmen der SPS. Das (XAR) stellt einen Durchlauf des gesamten Programmcodes sowie das Empfangen und Senden einer Busklemme-Signals innerhalb eines Zyklus sicher. Auf einer SPS können mehrere Tasks laufen. Jedem Task wird eine Dauer und eine Priorität durch den Benutzer zugeteilt. Der Task mit der höchsten Priorität wird stets zuerst ausgeführt. Auf dem verwendeten CX-9020 können maximal 4 Task ausgeführt werden. Ein Task besteht aus einem oder mehreren Programmen, Funktionen und Funktionsbausteinen. Die Grundlage jeglicher Kommunikation ist das *Automation Device Specification* (ADS). Es stellt eine geräte- und feldbus-unabhängige Schnittstelle zwischen ADS-Teilnehmern dar.

5.4.4 Namensgebung der Variablen

Die Namensgebung ist ein wichtiger Teil der Software-Entwicklung. Einheitliche Namensgebung und Lesbarkeit erleichtern die Bedienung und das Arbeiten mit dem Programmcode. Für die Sen-

⁶IEC 61131-3: Europäische Norm die sich mit den Grundlagen Speicherprogrammierbarer Steuerungen bezüglich Programmiersprachen befasst,

soren wurde folgendes Schema verwendet: [Sensortyp]_[Zu bilanzierende Komponente]_[Ort: Ein- oder Ausgang]. Alle Abkürzungen sind in Tabelle 5.7 aufgeführt.

Tabelle 5.7: Abkürzungen-Übersicht

Abkürzung	Bedeutung	Abkürzung	Bedeutung
PT	Drucksensor	KP	Kompressor
Temp	Temperatursensor	VD	Verdampfer
Waage	Waage	VF	Verflüssiger
MSS	Massenstromsensor	EV	Expansionsventil
in/out	Ein- / Ausgang	rev	Strömungsumkehrung
defrost	Bei Abtauung aktiv	Soll	Sollwert/Führungsgröße
surface	Oberfläche		

Die *Ungarische Notation* ist ein System zur Benennung von Variablen in einem Programmcode. Sie soll der Lesbarkeit und Übersichtlichkeit des Programmcodes dienen. Es gibt zwei Auffassungen von der *Ungarischen Notation*. Bei der ersten ist eine Abkürzung für den Variablentyp vor den eigentlichen Variablennamen zu setzen. Ein *bBedingung* steht beispielsweise für eine BOOL-Variable, die TRUE oder FALSE sein kann, je nach dem, ob die Bedingung erfüllt ist oder nicht. Diese Verwendung führt nicht selten zu einer Verwirrung der Leser, da sich die Variablentypen mittels Funktionen in viele andere Typen umwandeln lassen. Der Compiler des Programmcodes weiß den Typ der Variable ohnehin und kann diesen jederzeit kontrollieren und abfragen. Aus diesem Grunde ist diese Art der Verwendung der *Ungarische Notation* unter Programmierern umstritten.

Die *ungarische Notation*, im Sinne von [Variablentyp]_[Variablenname], wird in dem erstellten Programmcode lediglich bei BOOL-Variablen benutzt. Der Grund hierfür war eine leichtere Unterscheidung zwischen den Transitionsvariablen und den Zuständen der Statusmaschine. Für andere Variablentypen wie zum Beispiel WORD oder BYTE ist die Verwendung der Notation nicht unbedingt erforderlich. In manchen Fällen ist es hilfreich direkt zu wissen, von welchem Variablentyp der Wert ist.

Für das Regelungsprogramm und dessen PID-Regler sowie für die Klemmenwert-Umrechnung wurde die Namensgebung von NÜRENBERG übernommen, die in Tabelle ?? aufgelistet ist.

Die ursprüngliche Idee der *Ungarischen Notation* besteht darin, der Variablen einen Namen zu geben, der im spezifischen Kontext mit seiner Applikation steht. Zum Beispiel: Eine Laufvariable für eine CASE-Struktur sollte in diesem Fall *counter*, *state* oder *schritt* heißen. Die Variable kann vom Type INTEGER(ganze Zahl) oder REAL(Kommazahl) sein; dies zu wissen ist für den Leser jedoch unerheblich. Um den Leser den Codetext möglichst einfach und übersichtlich darzustellen, wurden Variablenamen bezüglich ihrer Funktion vergeben.

Tabelle 5.8: Abkürzungen-Übersicht [Nürenberg, 2015]

Abkürzung	Bedeutung	Abkürzung	Bedeutung
INT	Variable vom Typ Integer	REAL	Variable vom Typ Real (Float)
VAR	Variabler Wert	PARA	(fester) Parameter
M	Steigung	C	Ordinatenabschnitt
maxWert	Oberer Wert einer Variable	minWert	Unterer Wert einer Variable

5.4.5 RS232-Kommunikation: Verarbeitung des Prozessabbildes

Die Kommunikation zwischen der SPS und den Waagen nimmt eine gewisse Sonderstellung zu den anderen benutzen Signalverarbeitungen ein. Die Kommunikation erfordert einen schnell laufenden TASK, um die Verarbeitung korrekt ausführen zu können. Deshalb läuft das Programm *Hintergrund*, zuständig für die Signalverarbeitung der RS232-Kommunikation, auf dem TASK *SerialComTask* mit einer Zykluszeit von 2 ms. Der Funktionsbaustein *SerialLineControl* schreibt den Datenstring in den Zwischenspeicher *RxBuffer*, vom Typ *ComBuffer*. Der Datenverkehr zwischen Datenpuffer und Hardware wird so mit maximaler Geschwindigkeit im Hintergrund abgewickelt.

Schickt die PLC-Anwendung einen Befehl, so wird dieser über den Funktionsbaustein *SendString* in den Zwischenspeicher *TxBuffer* geschrieben. Beide Zwischenspeicher müssen deklariert und mit den Funktionsbausteinen verbunden sein.

Wird kein Zwischenspeicher verwendet, so kommt es nach wenigen Sekunden zu einem *BufferFull*-Fehler seitens der Busklemme und die Kommunikation ist unterbrochen. Der Zwischenspeicher entkoppelt die zwei unterschiedlich schnell laufenden TASKs. Aus dem Zwischenspeicher *RxBuffer* wird mittels des Funktionsbausteins *ReceiveString* jeden Zyklus ein Datenstring in die Struktur einer Waage geschrieben. Dieser Funktionsbaustein läuft auf dem langsameren Standard TASK. Die Schreib- bzw. Abfrageprozess mittels Zwischenspeicher erfolgt *asynchron*.

In dem Fall von dem Datenverkehr zwischen Waage und SPS wird lediglich der *Rx-Buffer* beschrieben. Die SPS sendet keine Befehle an die Waage. Ein Sendaufforderung seitens der SPS ist denkbar, wurde aber aufgrund der Waageeinstellungen umgangen. Die Waagen senden kontinuierlich ihre Daten und eine Sendaufforderung ist hinfällig.

Der Datenstring des ASCII-Codes wird mittels OSCAT⁷-Funktionen in eine REAL-Variable umgeformt. Die String-Bearbeitung und der Funktionsbaustein *ReceiveString* wurde in dem Funktionsbaustein *FB_GewichtAuslesen* zusammengefasst.[OSC, 2016]

⁷OSCAT steht für *Open Source Community for Automation Technology* und baut seit 2006 Kommunikationsplattform für Automatisierung auf. Die Bibliothek ist frei zugänglich und umfasst mehr als 800 Funktionen und Funktionsbausteine.

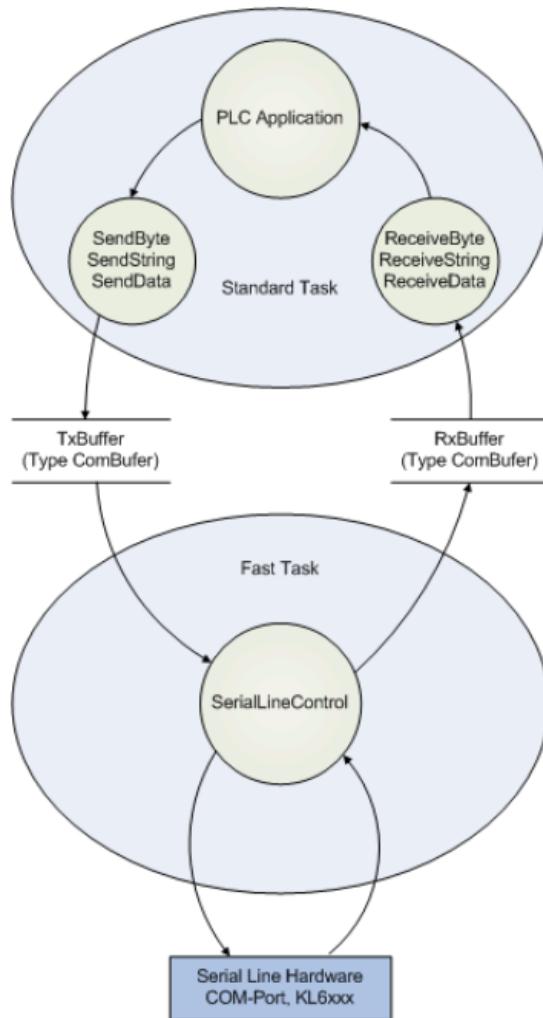


Abbildung 5.16: EL 6002: Kommunikation zwischen der PLC-Anwendungen und dem SerialLineControl [Bec, 2016a]

5.4.6 Regelung

Teil der Benutzeranforderungen an die SPS ist der Punkt *Steuern und Regeln*. Ein Kältekreis verfügt über mehrere Regelungen mit unterschiedlichen Stellgrößen. Die Regelung der Kälteanlage erfolgt über drei PID-Regler : Kompressor, Expansionsventil und Verflüssigungsventilator.

Ein PID-Regler besteht aus drei Anteilen: dem P-Glied, dem I-Glied und dem D-Glied. PID-Regler können sowohl in Reihen- als auch in Parallelstruktur eingesetzt werden. Für die Kälteanlage wurde eine Parallelstruktur für die PID-Regler ausgewählt. Abbild 5.17 stellt einen PID-Regler dar, der in einer Regelstrecke eine Führungsgröße regelt. Für die Regelung der Kälteanlage wurde der OSCAT-Funktionsbaustein *CTRL_PID* verwendet.

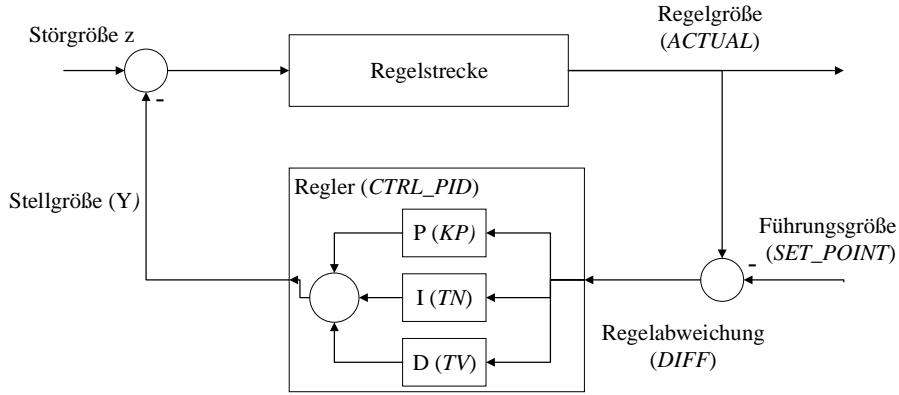


Abbildung 5.17: Regelstrecke mit PID-Regler und Regelgrößen

Die Führungsgröße kann eine Temperatur, ein Druck oder ähnliches sein. Die Führungsgröße, auch Sollwert genannt, wird im OSCAT-Funktionsbaustein für den PID-Regler *SET_POINT* genannt. Aus der Differenz von der Führungsgröße, die einen bestimmten Wert inne hat, und den Ist-Wert der Regelgröße wird die Regelabweichung berechnet. Der Ist-Wert der Regelgröße wird in OSCAT mit *ACTUAL* und die Regelabweichung *DIFF* bezeichnet. Um die Regelabweichung zu minimieren wirkt der Regler mittels der Stellgröße (*Y*) auf die Störgrößen *z* ein. Die Stellgröße ist im Falle der Kälteanlage ein analoges Signal, z. B. 4..20 mA oder 0..10 V. Die Störgröße *z* ist von der Regelstrecke und der Umgebung abhängig. Sie kann aus einer oder mehreren Größen bestehen. Die Veränderung der Stellgröße hängt von der Regelabweichung bzw. Fehler und den Einstellungen für die drei Regleranteile P,I und D. [OSCAT, 2016]

Der eingesetzte OSCAT-PID-Regler arbeitet nach der folgenden Formel:

$$Y = KP \cdot (DIFF + \frac{1}{TN} \cdot \text{INTEG}(DIFF) + TV \cdot \text{DERIV}(DIFF)) + \text{OFFSET} \quad (5.9)$$

In der Formel 5.9 entspricht *DIFF* = *SET_POINT* – *ACTUAL*. Die Addierung von einem zusätzlichen *OFFSET*-Wert dient der Kompensation von Störsignalen. Der Funktionsbaustein besitzt des Weiteren eine obere und untere Ausgangsbegrenzung (*LL* und *LH*). Diese Grenzen sind native Werte, angegeben in mA. Das Erreichen der Grenzen wird über die BOOL-Variablen *LIM* angegeben. Wird der Regler an den Grenzen betrieben, so wird automatisch ein *Anti Wind-Up* gestartet. Ein *Anti Wind-UP* friert den I-Anteil des Reglers beim Überschreiten der Grenzen auf den letzten Wert ein. Ändert sich der Fehler(*DIFF*) und der Regler wird wieder in seinen Grenzen betrieben, so kommt es zu keiner Verzögerung durch einen groß gewordenen, dominierenden I-Anteil im Regler. Ein manuelles Bedienen des Reglers ist über die BOOL-Variable *MAN* und den Eingangswert *M_I* möglich.

In diesem Fall entspricht das Stellsignal :

$$Y = MANUAL_IN + OFFSET. \quad (5.10)$$

Die PID-Regler von dem Kompressor und des Verflüssigungsventilator sind in dem Programm *Riegelung()* implementiert. In der Tabelle 6.1 sind die drei PID-Regler mit ihren Führungs- und Stellgrößen aufgelistet, sowie im Schaubild 5.18.

Tabelle 5.9: PID-Regler-Übersicht

Regler	Führungsgröße (SET_POINT)	Stellgröße Y
Kompressor	Saugdruck in bar	Drehzahl mit 4..20 mA Stellsignal
Expansionsventil	Überhitzung in K	Ventilöffnung in %
Verflüssigungsventilator	Unterkühlung in K, Verflüssigungsdruck in bar	Drehzahl mit 0..20 mA Stellsignal

Für die Parameter der PID-Regler wurden die schon existierenden Strukturen von NÜRENBERG verwendet. Die Werte für die Parameter wurden aus Übersichtsgründen in die Datenbank MySQL ausgelagert. Sollen Parameter-Werte für die Regler geändert werden, so geschieht dies zunächst in der Datenbank MySQL in der entsprechenden Tabelle. Die Datenbank MySQL arbeitet mit Kommata als Trennzeichen; TwinCAT 3 mit Punkt. Die Daten werden aus der Datenbank als STRING eingelesen und dann das Trennzeichen von Komma in Punkt gewandelt. Das geschieht mit Hilfe des Programms *PunktErsetztKomma*. Darauf folgt die Umrechnung in den Typ REAL.

Wird *Neuinitialisierung* nun auf TRUE gestellt, so werden die neuen Werte in die Strukturen der PID-Regler geschrieben und der Regler neugestartet. Dies funktioniert auch im laufenden Betrieb.

Bei der Kälteanlage und den eingesetzten PID-Regler gibt es eine Kopplung der Regeleffekte. In diesem Fall wird von einem Mehrgrößensystem gesprochen. Die meisten technischen System sind in der Regel Mehrgrößensysteme, da die physikalischen Größen mehr oder wenig stark von einander abhängig sind. In der Kälteanlage sinkt beispielsweise die Überhitzungstemperatur bei gleicher Ventilöffnung des Expansionsventils und sinkendem Verdampfungsdruck. Der Verdampfungsdruck wird durch die Saugdruckregelung des Kompressors bestimmt. Dreht der Kompressor also mal schneller oder langsamer, so zieht dies immer eine Regelabweichungsänderung für das Expansionsventil nach sich.

Abbildung 5.18 zeigt das Mehrgrößensystem der Kälteanlage. Zur Regelung eines Mehrgrößensystems als einen einzigen Regler, müssen alle Kopplungen im System bekannt sein. Für die Kälteanlage ist dies zur Zeit noch nicht der Fall. Ein alternatives Konzept ist die *Entkopplung* der einzelnen Reglerkreise. Grundsätzlich wird zunächst zwischen positiver und negativer Kopplung von Regelkreisen

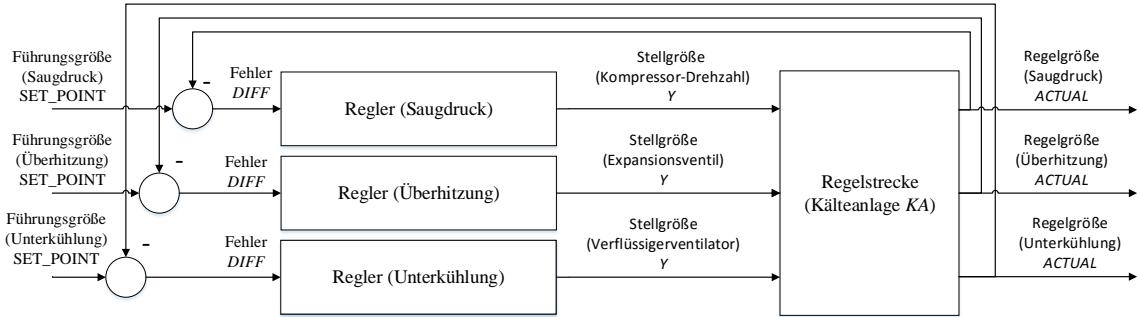


Abbildung 5.18: Mehrgrößensystem: Regelstrecke mit PID-Regler und Regelgrößen

unterschieden. Bei positiver Kopplung wird die Dämpfung der einzelnen Regelkreise erhöht, bei negativer Kopplung verringert, vgl. [Schwarz, 2013]. Im Kapitel 6 wird die Inbetriebnahme der Regler vorgestellt und besprochen.

5.4.7 Modbus RTU

Der Modbus RTU basiert auf einer Master-Slaves-Architektur. Ein Master kann mittels eines Befehls an den Slave Informationen schicken, worauf der Slave mit einer Antwort den Befehl ausführt, die Informationen verarbeitet und die erfragten Daten an den Master zurückschickt. In einem Modbus-RTU Netzwerk können bis zu 32 Teilnehmer implementiert werden.

Um den Ablauf des Programm-Codes des installierten Modbus-Systesm zu verstehen, wird zunächst die Befehls- und Datenstruktur erklärt. Dann wird ein Überblick über die Abfrage- bzw. Schreibbefehle gegeben. Zum Schluss wird ein Blick auf den Programmablauf geworfen.

Datenstruktur und Timing

Eine Modbus RTU-Nachricht besteht aus mehreren seriell Bytes (8 Bits). Jedem gesendeten Byte geht ein zusätzliches Stop-Bit voraus. Nach dem Byte gibt es mehrere Möglichkeiten, um das gesendete Byte zu beenden. Die meist genutzten Varianten ist zunächst ein Paritätsbit und ein Stopbit oder zwei Stopbits. Das Startbit, auch steigende Flanke genannt, gibt dem Slave das Signal, dass ein Byte kommt. Der Receiver von dem Slave wird aktiviert. Dann wird das Byte gelesen. Nach dem Byte kommen nun entweder 2 Stopbits oder ein Paritätsbit und ein Stopbit. Beide Arten signalisieren dem Slave-Receiver, dass der Byte zu Ende ist. Wird mit einem Paritätsbit gearbeitet, kann der Slave-Receive kontrollieren, ob die empfangenen 8 Bits des Bytes korrekt sind. Es gibt zwei Paritätsarten: *gerade* und *ungerade*. Wird die *gerade* Paritätsart verwendet, so wird das Paritätsbit 1, wenn

das Byte eine gerade Anzahl an Einsen hat. Ein Byte bestehend aus "0000 1111" würde das Paritätsbit auf "1" gesetzt; bei "0001 1111" wäre es "0". Die *ungerade* Parität funktioniert nach dem gleichen Prinzip, nur dass das Paritätsbit "1" ist bei einer ungeraden Anzahl "1" im gesendeten Byte. Die Hersteller als auch die MODBUS.ORG empfehlen die Verwendung einer Parität. Mit Startbit, Paritätsbit und Stopbit ist die Bit-Sequenz 11 Bits lang. Wird keine Parität verwendet, so wird anstatt des Paritätsbits ein weiteres Stopbit verwendet, um die Bit-Sequenz wieder 11 Bits lang zu machen. Das Stopbit bzw. Stopbits bestehen aus fallenden Flanken und schließt das Byte ab. Der Slave-Receiver wird ausgeschaltet. Abbild A.1 zeigt die zwei Bit-Sequenzen exemplarisch auf.

Alle Slaves und der Master müssen in einem Netzwerk die gleichen Einstellungen besitzen. Abweichende Einstellungen führen zu Kommunikationsfehlern. Eine weitere wichtige Eigenschaft eines Modbus-Systems ist die sogenannte *Baudrate*, ihre Einheit ist bps (*bauds per second*). Sie gibt die Geschwindigkeit der Datenübertragung an. Die diskreten Werte für die Geschwindigkeit können zwischen 1200..115200 bps liegen.

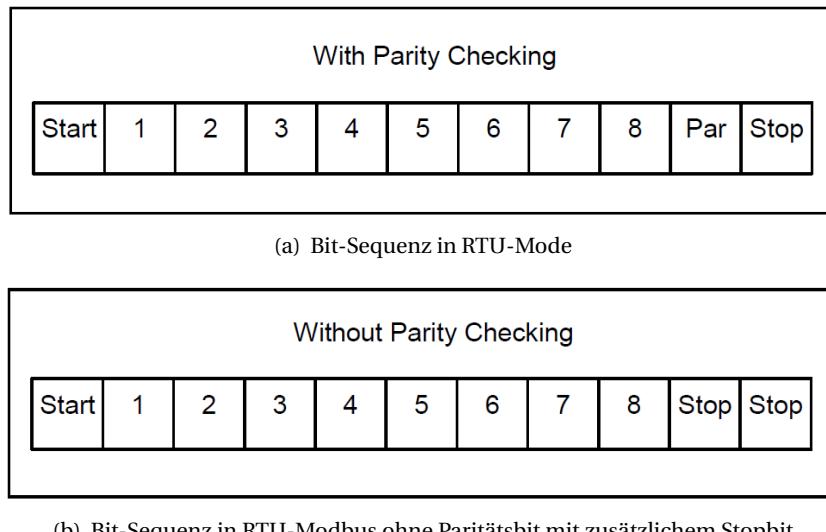


Abbildung 5.19: Verschiedene Bit-Sequenzen im RTU-Modus [MODBUS.ORG, 2002]

a Eine komplette Modbus RTU-Nachricht besteht aus einer Adresse, einer Funktion, Daten und einer CRC-Checksumme, welche alle wiederum aus Bytes bestehen. Die Adresse ist 8 bits groß, sprich einem Byte. Hier steht die Adresse des Slaves im Netzwerk für den Befehl gilt. Die Adresse darf im Bereich 1...247 liegen. Danach kommt die Modbus-Funktion bestehend aus 8 Bits. Es können nicht zwei Befehle simultan ausgeführt werden. Für zwei verschiedene Befehle müssen zwei Nachrichten geschickt werden. Dann folgen die Datenbytes. Diese bestehen aus mehreren aneinander gereihten Bytes. In einer Nachricht können Null bis 252 Datenbytes enthalten sein. Am Ende jeder Nachricht findet ein *Cyclical Redundancy Checking*-(CRC)-Test statt. Dieser Test kontrolliert die

ganze Modbus-Nachricht auf Fehler, unabhängig von den Paritätseinstellungen. Es besteht aus 2 Bytes. Vor und nach jeder Nachricht gibt es eine von der Baudrate abhängiges Timeout. Das Timeout entspricht $3,5 \cdot T_{char}$. Das Timeout verhindert eine zu hohe CPU-Auslastung auf der Masterseite. [MODBUS.ORG, 2002] [Schleicher, 2005]

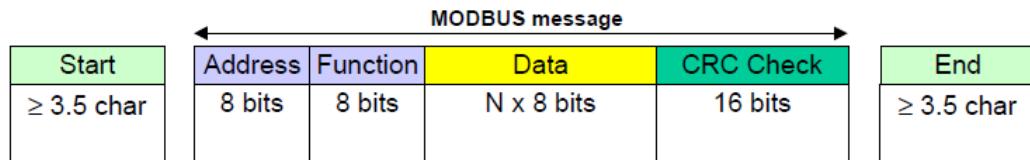


Abbildung 5.20: Aufbau und Timing einer Modbus RTU Nachricht [MODBUS.ORG, 2002]

Befehlsstruktur und Register-Adressen

Jeder Modbus-Slave hat Informationen oder schreibt Messdaten in seinen internen Speicher. Dieser interne Speicher kann aus vier Speichertypen bestehen: *Coils*, *Discrete Inputs*, *Input Registers* und *Holding Registers*. Je nach Slave sind diese Speicher vorhanden oder nicht. Jede Information besitzt eine eindeutige Adresse und hat Lese- bzw. Schreibrechte fest einprogrammiert. Die Zwischenspeichertypen mit ihren Adressbereichen und Zugriffsrechten sind in Tabelle 5.10 dargestellt.

Tabelle 5.10: Modbus-Register Adressen [KMG, 2013]

Adressbereich	Zwischenspeicher	Zugriffsrechten
0..9999	Coils	lesen + schreiben
10000..19999	Discrete Inputs	lesen
20000..39999	Input Registers	lesen
40000-65535	Holding Registers	lesen + schreiben

Möchte ein Master nun eine Information aus einem Zwischenspeicher lesen oder schreiben bzw. überschreiben, so benötigt er die passende Adresse und für den Zwischenspeicher passenden Befehlstyp. Alle von der MODBUS.ORG verwendeten Befehlstypen sind in Tabelle 5.11 aufgelistet.

In der Abbildung 5.21 ist beispielhaft eine Druckabfrage eines Drucktransmitters abgebildet. Der Drucktransmitter schreibt seinen Druck in das Register 2 und 3. Ein Register enthält ein Wert vom TYP DWORD. Ein DWORD sind zwei BYTES. Der Wert des gesamten Registers besteht folglich aus 4 Datenbytes, die zunächst in einen 32 Bit-String und dann in eine REAL-Zahl umgewandelt werden kann. Die Anfrage enthält die Startregister-Nummer und die Anzahl der abzufragenden Register. Der Slave antwortet auf den Befehl mit seiner Adresse, den Befehlstyp, die Anzahl der folgenden Datenbytes und mit den Datenbytes selber. Danach erfolgt ein CRC-Test. In grün eingezzeichnet sind die Datenbytes und der entsprechende REAL-Zahlenwert.

Tabelle 5.11: Modbus-Befehle mit ihrem Funktions-Code

Funktions-Code (in Dezimalsystem)	Befehl
01	Read Single Coil
02	Read Descrete Inputs
03	Read Holding Register
04	Read Input Register
05	Write Single Coil
08	Diagnostics
16	Write Multiple Register

**Abbildung 5.21:** Modbus-Nachrichten Beispiel: Druckabfrage vom Kanal P1. Links der Modbusbefehl (*request*) vom Master und rechts die Antwort (*response*)

Programm-Ablauf

5.4.8 Programme

EnthalpieBerechnen()

SchwerpunktEis()

Regelung()

Beide Sensoren hatte eine fest eingestellte Stopbit-Größe. Der Drucktransmitter hat einen Stopbit, das Expansionsventil zwei.

5.4.9 Grafical User Interface - GUI

Die Bedienung der Kälteanlagen-SPS ist über zwei Wege möglich. Die erste Möglichkeit bietet Twin-Cat 3, indem sich der Benutzer auf die SPS *einloggt* und die Codeausführen in Echtzeit nachvollziehen kann. Die Anlage lässt sich so steuern und überwachen. Es werden die Werte von Variablen-

bzw. Symbolwerte angezeigt. Auf diese Art und Weise kann der SPS-Code debugged werden. Des Weiteren kann der Benutzer diese Bedienungart bei einer Fehlersuche, Testen von Programmen oder Parametereinstellungen einsetzen. Eine Fehlbedienung, z. B. durch *Forcen* einer Variable auf einen Wert, kann unter Umständen zu Anlagenschäden führen.

Die zweite Bedienmöglichkeit der SPS ist ein *Grafical User Interface*(GUI). GUIs werden eingesetzt, um Prozessabläufe übersichtlicher darzustellen sowie Systemzustände schneller und effizienter interpretieren zu können. Die GUI wurde in Visual Studios in der Programmiersprache VB.NET erstellt. Grundlage für die GUI ist eine Instituts interne .DLL-Bibliothek. Diese Bibliothek umfasst Benutzersteuerelemente wie beispielsweise Temperatursensoren, Dezimalanzeigen oder Sollwert-Eingaben. Für nähere Informationen über den informationstechnischen Aufbau der Bibliothek und der Steuerelemente wird auf die Arbeit von [Nürenberg, 2015] verwiesen. Neben der Institutsbibliothek kann auf die in Visual Studios vorhandenen Elemente wie Textboxen, Panels oder Timer zurückgegriffen werden. Diese Elemente werden von .NET Framework bereitgestellt.

Uptown: RI-Fließbild

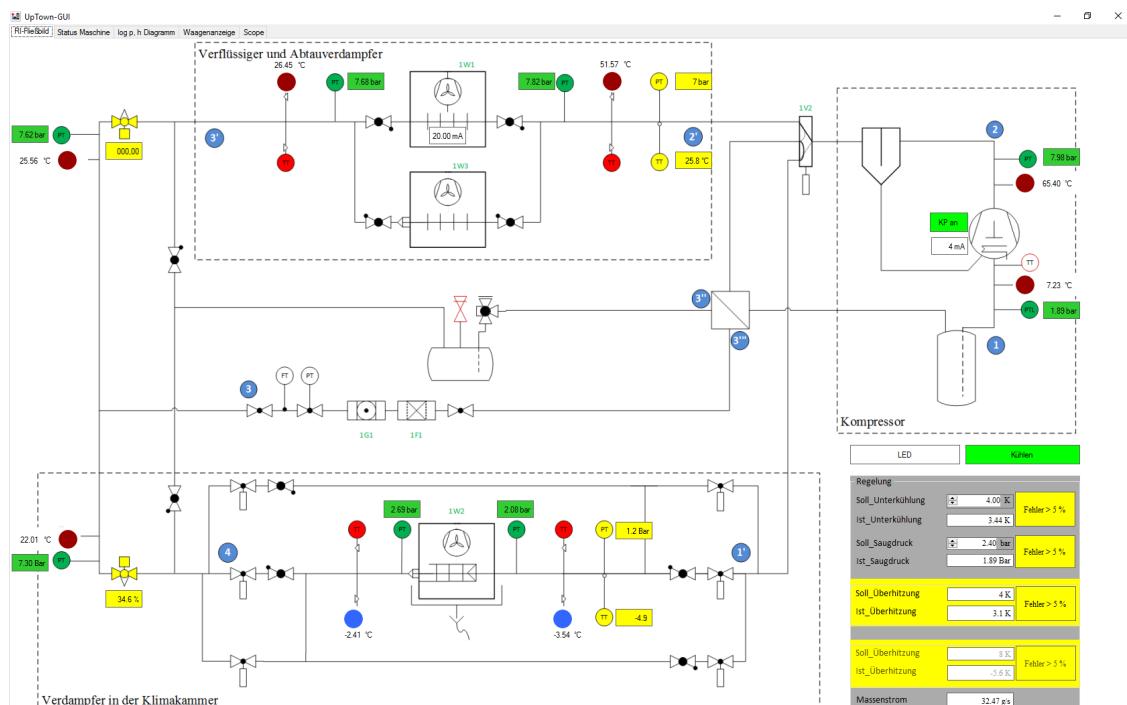


Abbildung 5.22: RI-Fließbild in der GUI

Der erste Reiter der GUI ist das RI-Fließbild mit allen angeschlossenen Sensoren. Es gibt dem Benutzer einen Überblick über den Maschinenzustand der Anlage. Alle Temperatursensoren haben neben

ihrer Dezimalanzeige einen roten, über 0 °C, bzw. blauen, unter 0 °C, Punkt. Die Drucksensoren sind alle grün dargestellt und die Expansionsventil-Sensoren jeweils in gelb. Neben dem Kompressor steht der aktuelle Steuerstrom. Ein LED rechts neben dem Kompressor gibt an, ob das Kompressor-Schütz an oder aus ist. Beim Verflüssiger wird ebenfalls der aktuelle Steuerstrom angezeigt.

Unten rechts im Reiter stehen die Istwerte und die Sollwerte der PID-Regler. Die Sollwerte lassen sich verändern. Der Soll-Unterkühlungswert der Expansionsventile lassen sich nicht per SPS einstellen. Änderungen für einen Parameter in den Einstellungen oder Sollwert-Änderung, deswegen müssen jegliche Änderungen am Expansionsdisplay händisch durchgeführt werden. Ist der Fehler eines PID-Regler kleiner als 5 % Abweichung, so wird das LED grün.

Uptown: Steuerung über Statusmaschine

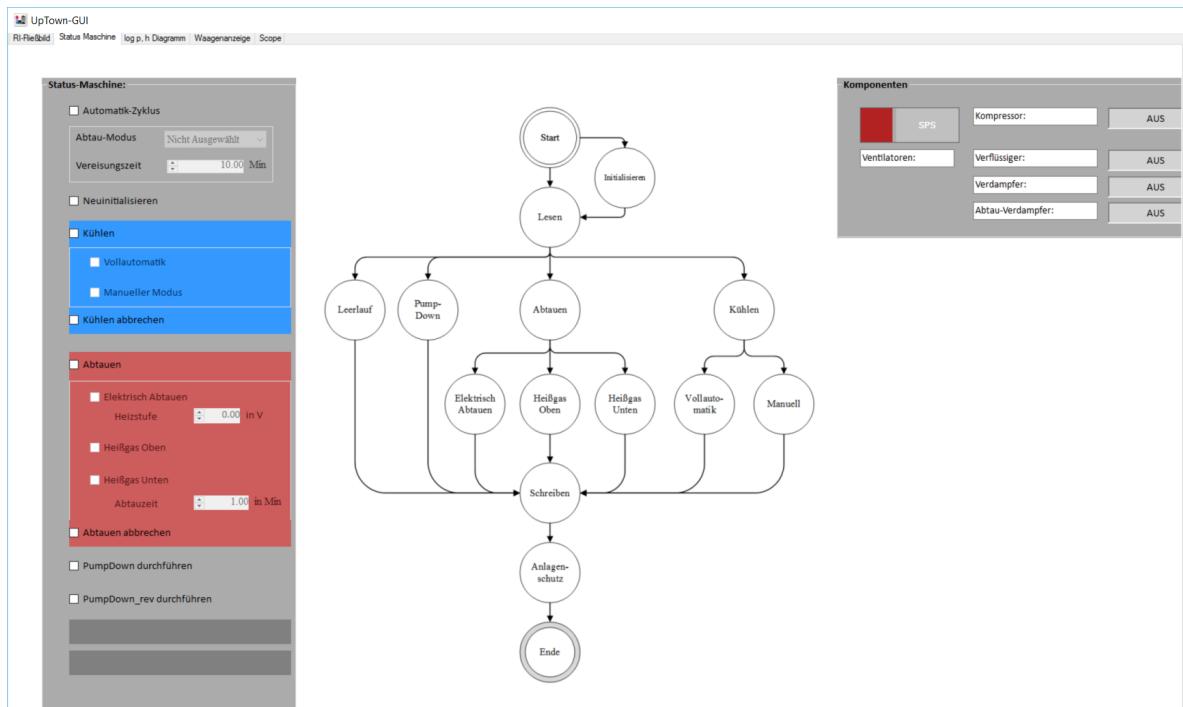


Abbildung 5.23: RI-Fließbild-Reiter in der GUI

Auf der zweiten Seite der GUI ist die Steuerung abgebildet. Hier lässt sich die KA starten, steuern und ausschalten. Links in der grauen Box sind die Transitionsvariablen für die Bedienung der Statusmaschine angebracht.

Die KA verfügt über einen *Automatik-Modus*. Für den Automatikmodus muss eine Vereisungszeit und eine Abtaumethode ausgewählt werden. Die Statusmaschine führt dann die Transitionen zwi-

schen Vereisung und Abtauen automatisch durch. Sind die zwei Parameter eingestellt, muss nur noch *Kühlen* aktiviert werden und die Statusmaschine führt die Messungen automatisch durch.

In dem blau hinterlegtem Feld beziehen sich auf den Kühlmodus; rot hinterlegt auf den Abtaumodus. Über *Kühlen* wird der Vereisungsvorgang gestartet und über *Kühlen abbrechen* wieder gestoppt. Wurde *Kühlen* aktiviert, so startet die KA automatisch mit dem Modus *Vollautomatik*. Der *Manueller Modus* ist nur für besondere Zweck in der Inbetriebnahme zu verwenden.

Über *Abtauen* lässt sich ein Abtaumodus starten. Ist *Abtauen* aktiviert, kann die beliebige Abtaumethode ausgewählt werden. Erst nach Auswahl der Abtaumethode startet der Abtauvorgang (vgl. 5.4.2: Statusmaschine: *Abtauen*). Soll der Abtauvorgang abgebrochen werden, so muss *Abtauen abbrechen* aktiviert werden. Im Modus *elektrisch Abtauen*, kann die Heizstufe geändert werden. Die Heizstufe muss zwischen 0 und 10 V liegen. Liegt sie außerhalb, so wird automatisch das obere oder untere Limit als Heizstufe gesetzt. Bei einer Heißgas-Abtauung kann zusätzlich die *Abtauzeit* eingestellt werden. Die *Abtauzeit* ist bestimmt die Dauer, die das Heißgas durch den vereisten Verdampfer strömt.

Die zwei untersten Checkfelder sind *PumpDown durchführen* und *PumpDown_rev durchführen*. Die zwei Vorgänge dienen der Kältemittlerückführung in den Sammler. Ein bis mehrere PumpDowns sollten vor dem Anlagenstillstand durchgeführt werden, um möglichst viel Kältemittel in den Sammler zu befördern.

In der Mitte befindet sich die Ablaufstruktur der Statusmaschine. Das Bild dient nur der gesamten Übersicht über den Prozess und den Ablauf. Im oberen rechten Teil sind die Komponenten des Kältekreislaufes aufgelistet. Die LEDs neben den Komponenten geben Auskunft darüber, ob die Komponenten an- oder ausgeschaltet sind. Über das Schaltfeld *SPS* wird die ADS-Verbindung zur SPS hergestellt. Bei "grün" ist eine Verbindung hergestellt und bei "rot" besteht keine Verbindung.

Uptown: Log p,h-Diagramm

Der dritte Reiter der GUI ist eine Darstellung der Zustandspunkte in einem log p,h-Diagramm. Jeder Zustandspunkt ist in einem magenta farbigen Punkt inklusive seiner Bezeichnung in dem Diagramm wiederzufinden. Die Darstellung gibt dem Benutzer sehr schnell Auskunft über den Zustand des Systems. Jeder Zustandspunkt wird jede Sekunde aktualisiert.

Zusätzlich sind die Zustandspunkte mit ihren zugehörigen Werten von Druck, Temperatur und Enthalpie im grauen Fenster hinterlegt. Für den Kompressor, Verflüssiger und den Verdampfer gibt die letzte Spalte den bilanzierten Wärmestrom jeder Komponente in kW an.

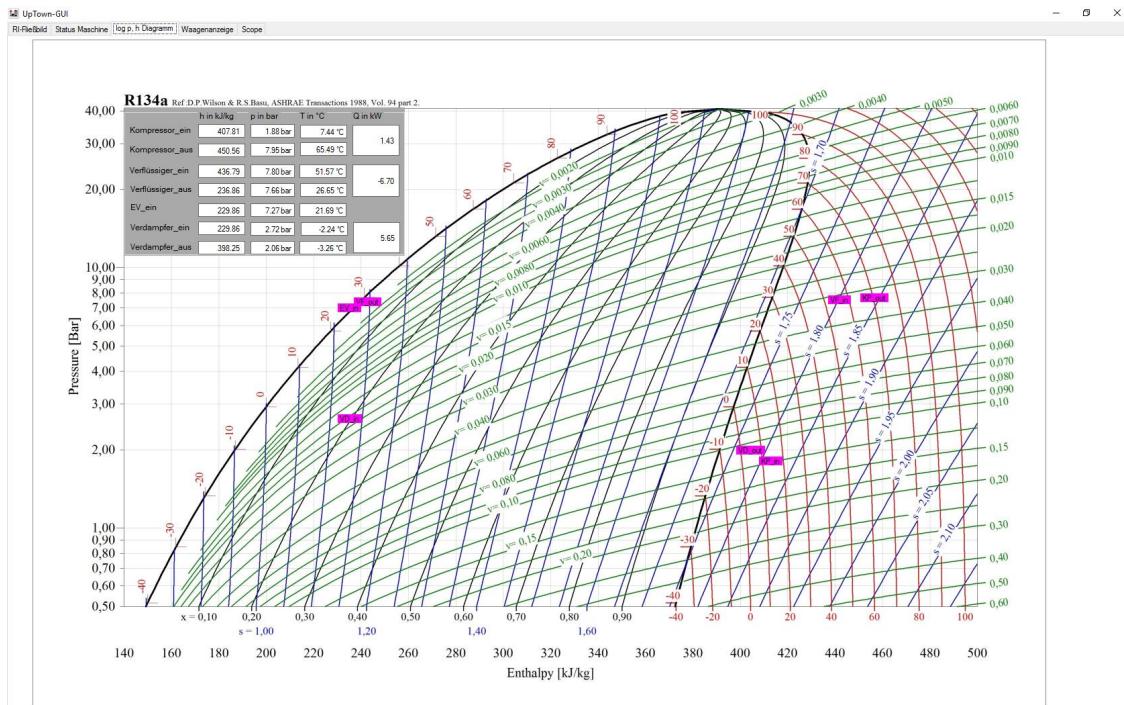


Abbildung 5.24: log p,h-Diagramm-Reiter in der GUI

Uptown: Wägesystem

Der Reiter des Wägesystems ist aufgeteilt in 3 Bereiche (markiert mit 1,2,3). Der erste Bereich, links, stellt den Luftkühler aus einer Vogelperspektive dar. Das ermittelte Gewicht der eingesetzten Waagen ist in unterschiedlichen Farben hinterlegt und befinden sich unter den Aufhängepunkten des Luftkühlers auf den Blattfedern. Die farblich hinterlegte Anzeige zeigt die Gewichtsanzeige nach dem "TAREBefehl". Die in grau hinterlegte Anzeige zeigt das tatsächliche, gemessene Gewicht der Waage.

Der mittlere Bereich(mit 2 markiert) zeigt den Luftkühler von der Seite. Hier sind 4 Oberflächentemperaturfühler am jeweils Eingang der Wärmeübertragerpacks. Der Verdampfer besteht aus vier solcher Wärmepacks. Neben den Oberflächentemperaturfühler sind auch noch der Ein- und Ausgang des Verdampfers mit einem Temperaturfühler versehen. Unter dem Luftkühler befindet sich die fünfte Waage, die das Schmelzwasser wiegt.

Der rechte Bereich (markiert mit 3) ist aufgeteilt in weitere Zwei Reiter:

- ▷ *Anleitung Kalibrierung*
- ▷ *Messwerte.*

Der Karteireiter *Messwerte* stellt verschiedene Messkurven dar. Die Messkurven entsprechen Mess-

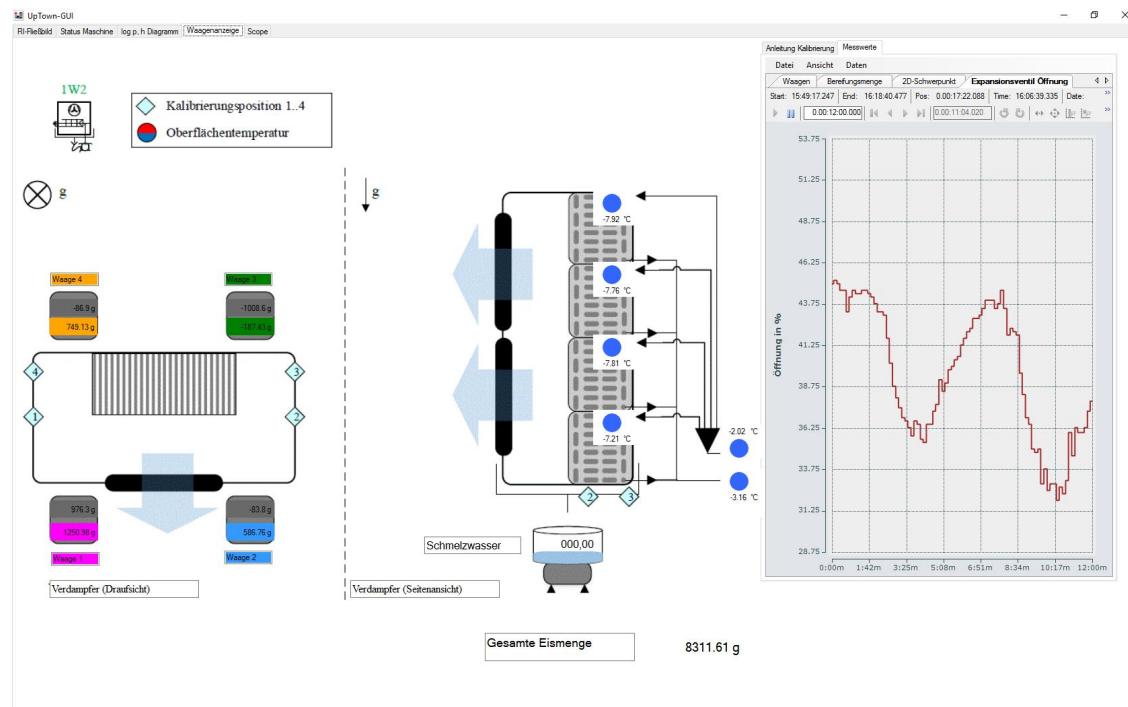


Abbildung 5.25: Wägesystem-Reiter in der GUI

projekten aus TwinCat und werden über ein Benutzerelement in die GUI integriert. Über die Bedienflächen lassen sich Messungen starten und stoppen und falls gewünscht auch als Scope-Datei exportieren. Zurzeit sind 4 Messkurven unter *Messwerte* hinterlegt:

- ▷ Waagen
- ▷ Bereifungsmenge
- ▷ 2D-Schwerpunkt
- ▷ Ventilöffnung vom Expansionsventil

In dem Reiter Waagen-Kalibrierung wird der Benutzer durch den Waagen-Kalibrierungsprozess geführt. Dieser besteht aus (a) Gewichts-Kalibrierung, (b) Ventilator-Kalibrierung und (c) Reset-Waagen, siehe Abbildung 5.26. Der gesamte Kalibrierungsprozess dauert 1 h, weiter Informationen siehe Abschnitt ??.

Uptown: Scope

Unter dem Karteireiter *Scope* sind alle Komponenten des Kältekreislaufes bilanziert. Für jede Komponente ist die Ein- und Ausgangstemperatur und -druck abgebildet. Für den Luftkühler sind zu-

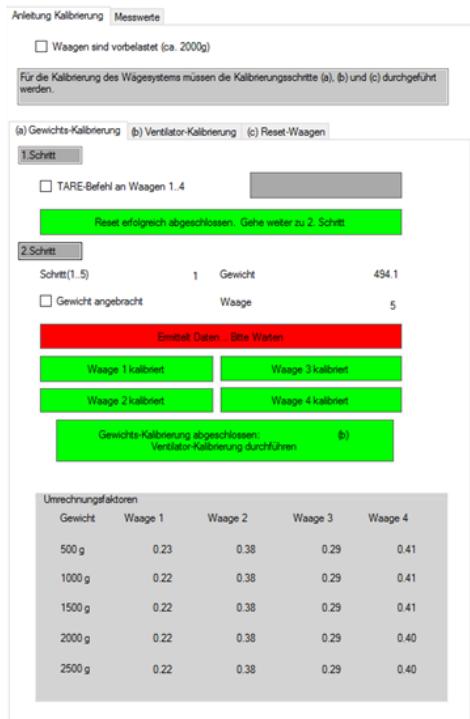


Abbildung 5.26: Karteireiter *Anleitung Kalibrierung*

sätzlich noch die 4 Oberflächentemperaturen bei den Temperaturen integriert. Nach dem die Graphen gestartet worden sind, lassen sie sich jeder Zeit per *Pausen*-Symbol anhalten und per Zoomfunktion genauer untersuchen. Aus Lizenzgründen lassen sich Prozesse maximal eine Stunde lang mit aufzeichnen. Unter "Datei → Datei laden" lassen sich beliebige Scope-Measurementprojekte in den Karteireiter laden und ausführen.

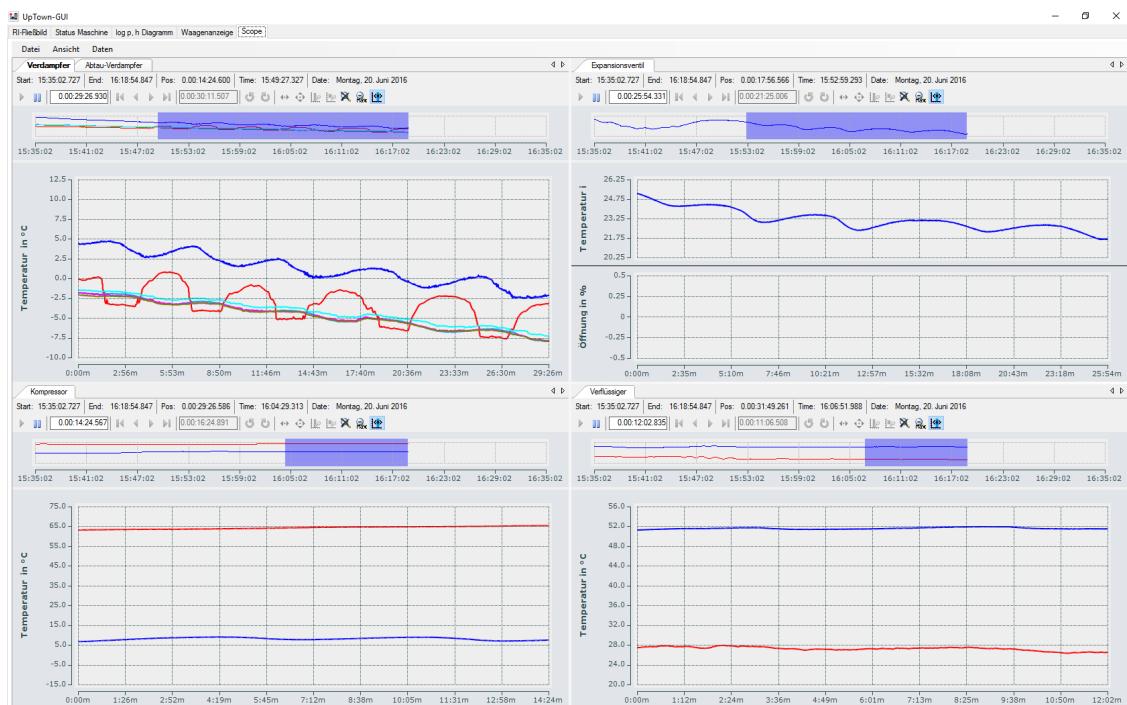


Abbildung 5.27: Scope-Reiter in der GUI

6 Inbetriebnahme

Die Entwicklung der Regelsoftware und die Inbetriebnahme der Kälteanlage gestaltet sich als ein kleinschrittiger, iterativer Prozess. Abbild 6.1 zeigt den Inbetriebnahmeprozess.

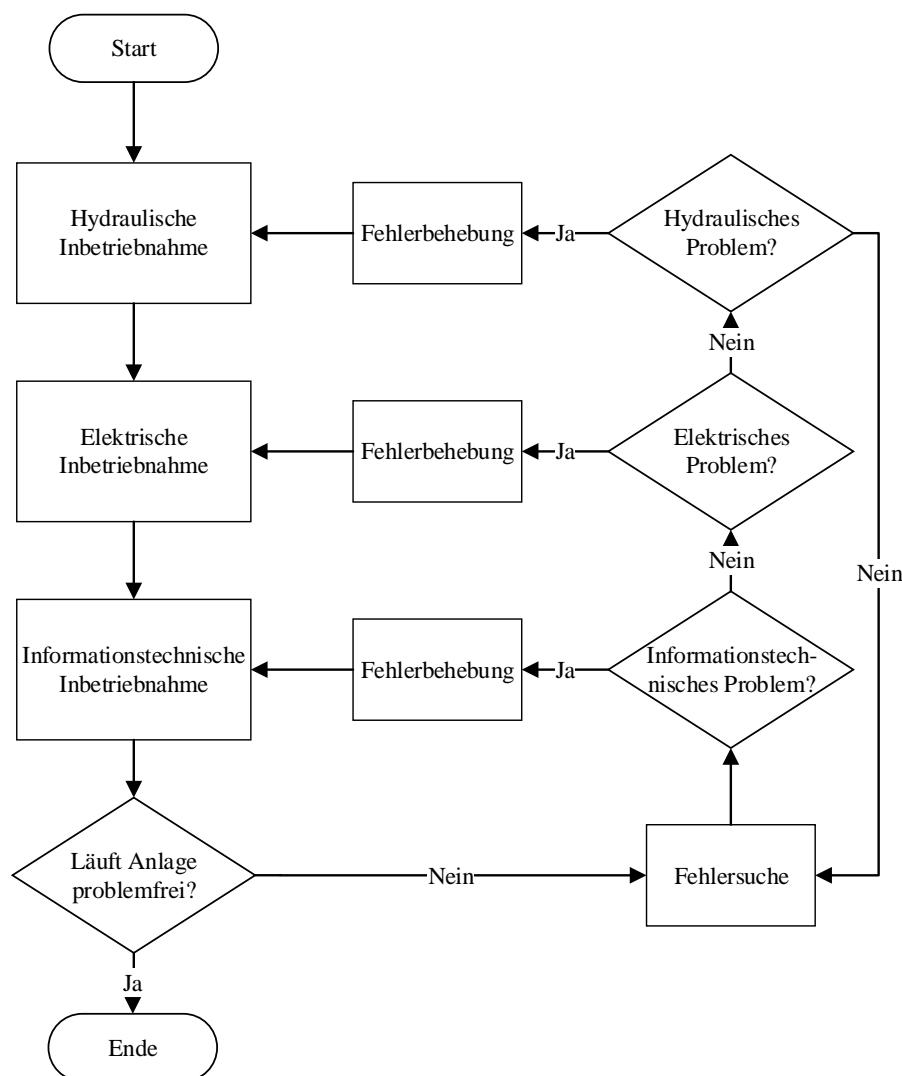


Abbildung 6.1: Inbetriebnahmeprozess mit Fehlersuche und -behebung

Durch die Erweiterung der Kälteanlage durch einen Abtauverdampfer, müssen auch die elektrischen Schaltschränke verlegt werden. Der Abtauverdampfer wird mittels einer Konstruktion genau über den Verflüssigungssatz montiert. Weitere Rückschlagventile und Sensorstellen werden im Rohrsystem vorgesehen. Zusätzlich wird die Versorgungsmimik für den Verdampfer um zwei weitere Magnetventile ergänzt. Nachdem die Kältefachfirma alle hydraulischen Arbeiten an der Kälteanlage abgeschlossen hat, werden die Rohrleitungen der Kälteanlage durch eine Vakuumpumpe evakuiert und auf Dichtheit geprüft.

6.1 Elektrische Inbetriebnahme

Aufgrund der Verlegung der Schaltschränke und Überarbeitung der Funktionen der Kälteanlage, müssen große Teile der Steuerungsschaltschränke erneuert und neue Kabel verlegt werden. Die elektrische Inbetriebnahme der elektrischen Steuerung der Kältemaschine erfolgt durch die Kältefachfirma noch im Manuellen Betrieb ohne die SPS. Hierbei stellt sich heraus, dass das Funktionsmodul des EFC-Frequenzumrichter defekt ist und dadurch der Bock-Kompressor keine Freigabe bekommt. Die Kältefachfirma umgeht diesen Defekt durch eine Spannungsfreigabe auf den Frequenzumrichter mit einem 26-V-Signal aus dem Schaltschrank. Mitgelieferte Sicherheitsfunktionen des Bock-Kompressors werden so außer Kraft gesetzt und müssen deshalb softwaretechnisch im Anlagenschutz implementiert werden. Die elektrische Seite der Kälteanlage wird in Betrieb genommen und die Steuerung kann nun Schritt für Schritt auf die SPS umgelegt werden.

Die Spannungsleitung für den Massenstromsensor wird von der Elektrowerkstatt verlegt und in Betrieb genommen. Zusätzlich werden die RS485-Netzwerke mit Knotenpunkten, Abschlusswiderstände, *Pull-up* and *Pull-Down* installiert. Alle Stecker für die Drucksensoren müssen, entsprechend des Handbuches, mit den Stichleitungen verlötet werden. Die Stichleitung jedes Sensors werden dann in einem Knotenpunkt an das Netzwerk angeschlossen. Für zukünftige Modbus RTU-Netzwerke werden RJ45-Stecker empfohlen. Diese beschleunigen die Inbetriebnahme und Auswechselung von Sensoren. Des Weiteren werden Kurzschlüsse ausgeschlossen, da es keine offenen Kabelenden gibt. Ein falscher Anschluss der Datenleitung an die Spannungsversorgung der Drucksensoren kann zur Zerstörung des Sensors führen. Spannungsfreies Arbeiten ist aus diesem Grund unbedingt einzuhalten. Die Sensoren können jetzt nacheinander in das RS485-Netzwerk integriert werden.

6.2 Informationstechnische Inbetriebnahme

Zunächst werden alle PT100-Temperatursensoren an die SPS angeschlossen und ausgelesen.

Danach wird das erste Modbus RTU-Netzwerk in Betrieb genommen. Wichtig hierfür ist, dass alle Sensoren in einem Netzwerk die gleichen Kommunikationseinstellungen haben. Die Drucktrans-

mitter werden über ein *Write Single Register*-Befehl adressiert. Im Auslieferungszustand hat jeder Drucktransmitter die Adresse "1". Nachdem die neue Adresse in das Adressregister geschrieben worden ist, muss der Drucktransmitter neu gestartet werden. Jetzt kann er unter der neuen Adresse Befehle empfangen. Die Drucktransmitter werden nach einander adressiert und in das Netzwerk integriert.

Die Expansionsventile und der Massenstromsensor werden manuell über ihr Bediendisplay eingestellt. Dann werden auch sie in das Netzwerk integriert.

Durch System Manager, der in TwinCAT 3 integriert ist, können die Busklemmen manuell gesteuert werden. Diese Funktion wird genutzt, um die ausgegebene Klemmenspannung bzw. -strom zu prüfen, als auch den korrekten Betrieb der übrigen Komponenten zu prüfen. Nach korrekter Signalverarbeitung über den System Manager kann die Komponente an die SPS angeschlossen werden. Dann wird getestet, ob die Funktionen in dem Programm-Code korrekt das Prozessabbild an die Ausgangsklemme gegeben wird.

Die Implementierung des Anlagenschutzes folgt. Alle software-seitigen Schutzfunktionen, die zur Sicherheit der Anlage und des Personals dienen und aus der Risikoanalyse hervorgegangen sind, werden getestet.

Die Regelung der Kälteanlage kann in Betrieb genommen werden. Die Reihenfolge der Inbetriebnahme der Stellsignale war folgende:

- ▷ Anschluss der Heizelemente an die SPS
- ▷ Anschluss des Drehzahlreglers des Verflüssigungsventilators an die SPS
- ▷ Anschluss der Schützschalter an die SPS zur Spannungsfreigabe vom Kompressor, Verflüssigungs-, Verdampfer- und Abtauverdampferventilator und Schaltung der Magnetventile und des Vierwegeventils
- ▷ Überspielung der Kompressor-Software mit Software für ein externes 4...20 mA-Stellsignal.
Dann folgt der Anschluss an die SPS und manuelle Tests per System Manager

Bei der Regelung-Inbetriebnahme wurden zunächst die nativen Grenzen für den PID-Regler begrenzt und in kleinen Schritten vergrößert. z. B. bei der Kompressor-Regelung wurde zunächst sowohl das höchste Stellsignal auf 8 mA festgelegt und dann in 2 mA-Schritten bis 20 mA erhöht. Bei dem Kompressor wurde zusätzlich die höchste Frequenz auf 50 Hz begrenzt und erst nach der kältetechnischen Inbetriebnahme (siehe ??) auf die maximalen 70 Hz erhöht.

Dieses Vorgehen wurde auch beim PID-Regler für den Verflüssigungsventilator angewandt.

Zu guter Letzt wurde die Benutzeroberfläche der Kälteanlage in Betrieb genommen, angepasst und optimiert.

6.3 Fehlersuche

Nach der gesamten Inbetriebnahme wird der stationäre Kühlbetrieb und die Funktionalität der Abtaumethoden getestet. Weißt das Anlagenverhalten Unregelmäßigkeiten auf, so muss eine Fehler suche vorgenommen werden. Zunächst wird der mögliche Fehler in dem Programm-Code gesucht, dann auf der elektrischen Ebene und zu guter letzt auf der der hydraulischen Ebene. Eine Fehlerbe hebung auf informationstechnischer Ebene ist meist schnell durchgeführt und ein möglicher Fehler durch Code-Anpassung schnell behoben. Elektrische Fehlersuche kann die Unterstützung von elektrischen Fachpersonal erfordern und hydraulische Fehlerbehebung nur durch Kältetechnik- Fachpersonal durchgeführt werden. Im Folgenden werden die Phäno me, die Ursachen und die Be hebung der folgenden Probleme erläutert:

- ▷ Ungewollte Kältemittelbewegung im Anlagenstillstand und Kühlbetrieb
- ▷ Kälteleistungsminderung durch Kältemittelmangel und *Flashgas*
- ▷ Schwingender Regelkreislauf

Ungewollte Kältemittelbewegung im Anlagenstillstand und Kühlbetrieb

Vor einem Anlagenstillstand wird ein PumpDown (siehe 5.4.2) durchgeführt. Das schützt den Kom pressor beim Wiederanlaufen vor einer starken Unterkühlung und mögliche Tropfenschläge am Kompressoreingang. Im Sammler ist der Großteil des Kältemittels gelagert und verlässt diesen im Normalfall erst wieder im Betriebsfall. In der aktuellen Anlagenkonfiguration wird das Entweichen des flüssigen Kältemittels durch zwei Rückschlagventile und die zwei Expansionsventile sicherge stellt, dargestellt in Abbildung 6.2. Es wurde festgestellt, dass die Expansionsventile nicht für diese Funktion geeignet sind. Über einen Stillstand von 12 h findet ein Druckausgleich in der ganzen An lage statt und das Kältemittel verteilt sich im ganzen Kreislauf.

Die Problem wurde kurzfristig durch das manuelle Schließen der Absperrventile nach dem Massenstromsensor im Anlagenstillstand behoben. Für eine längerfristige Lösung sollte die Installation eine zusätzlichen Magnetventil in die Einspritzleitung geprüft werden.

Neben der Kältemittelbewegung im Anlagenstillstand, wurde auch eine Kältemittelbewegung im Kühlmodus festgestellt. Läuft die Anlage im Kühlmodus, so ist nach dem Verflüssiger flüssiges Käl temittel anzutreffen. Das flüssige Kältemittel wird nun über die Druckdifferenz in den Abtauver dampfer gedrückt und sammelt sich dort. Dem Kältemittelkreislauf wird so im Kühlbetrieb Kältemittel entzogen. Der Sammler ist nicht mehr gefüllt und es kann zu Massenstromschwankungen kommen, die wiederum in Kälteleistungsschwankungen münden. Auch hier könnte die zusätzliche Installation von Magnetventile Abhilfe schaffen. Weitere Lösungs- und Optimierungsvorschläge sind in Abschnitt 7 zusammengetragen.

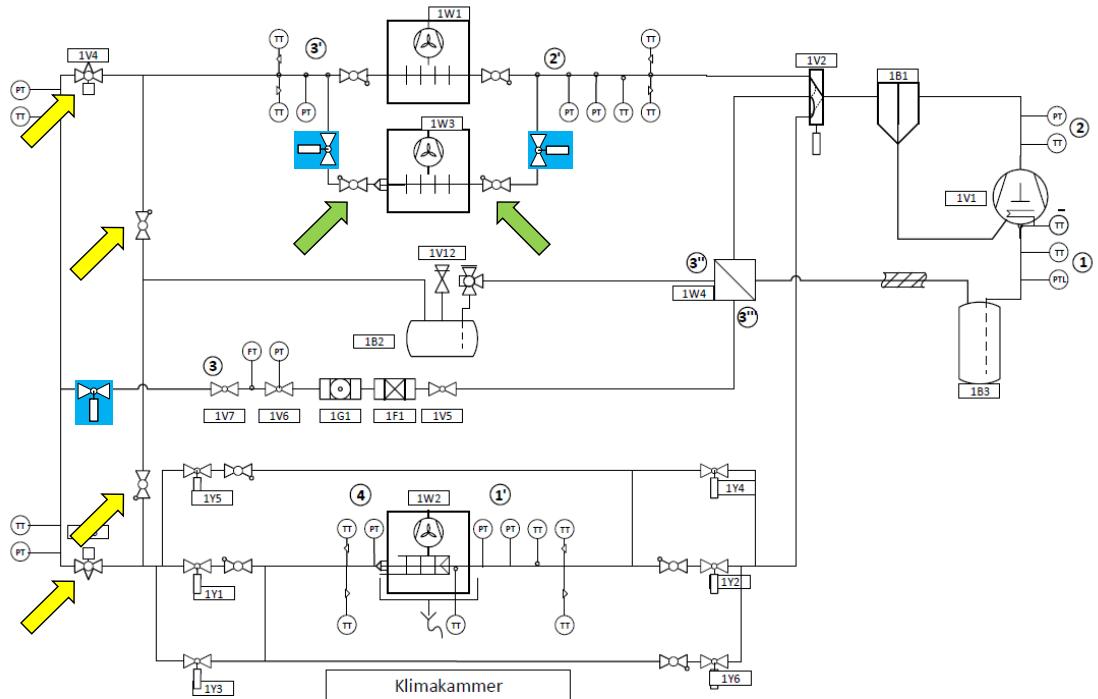


Abbildung 6.2: Kältemittelbewegungen im Anlagenstillstand (gelb markierte Ventile). Kältemittelbewegung im Kühlbetrieb in Richtung Abtauverdampfer (grün markierte Ventile). In blau hinterlegte Magnetventile sind mögliche Lösungsvorschläge zur Problembehandlung.

Geringe Kälteleistung des Luftkühlers

Im Kühlbetrieb im stationären Zustand sind folgende Punkte aufgefallen:

- ▷ Hohe Kältemittel-Überhitzung am Ausgang des Verdampfers (20-30 K)
- ▷ Vollständig geöffnetes Expansionsventil
- ▷ Schnelle Vereisung der ersten Rohrlängen im Verdampfer-Wärmeübertrager
- ▷ hoher Druckverlust zwischen Verflüssiger-Ausgang und Expansionsventil-Eingang
- ▷ geringer Massenstrom (20-30 g/s)

Mögliche Gründe für dieses abnormale Anlagenverhalten waren :

- ▷ Kältemittelmangel
- ▷ falsch dimensioniertes Expansionsventil

▷ *Flash-Gas* vor dem Expansionsventil

Zunächst werden 4 kg zusätzliches Kältemittel nachgefüllt. Die gesamte Kältemittelmenge liegt jetzt bei insgesamt 18 kg. Nach einer Überschlagung der Druckverluste zwischen Expansionsventil und Verflüssiger, konnte der Druckverlust als deutlich zu hoch eingestuft werden. Kondensiertes Wasser auf den Rohrleitungen nach dem Trockner, sowie Bläsen im Schauglas wiesen auf *Flash-Gas* hin, vgl. [?]. Durch einen zu hohen Druckverlust kommt es zur Verdampfung des Kältemittel bevor es durch das Expansionsventil entspannt wird. Durch die Gasbläschen erhöht sich das spezifische Kältemittel-Volumen und verringern gleichzeitig den Massenstrom durch das Expansionsventil. Das Expansionsventil versucht die Überhitzung zu senken, indem es sich öffnet. In diesem Fall versucht das Expansionsventil durch eine vollständige Öffnung einen höheren Massenstrom zu erwirken. Abbildung 6.3 zeigt die Zustandspunkte der Anlage im log p,h-Diagramm. Im Diagramm sind der hohe Druckverlust und die hohe Überhitzung mit gelben Pfeilen gekennzeichnet.

Das Problem konnte durch das Austauschen des Trockners behoben werden. Der Druckverlust zwischen Expansionsventil und Verflüssiger-Austritt verringerte sich von knappen 3 bar auf 0,5 bar. Das Expansionsventil regelte nun mit einer Öffnung von 50-55 % auf die vorgegebene Überhitzung von 6 K.

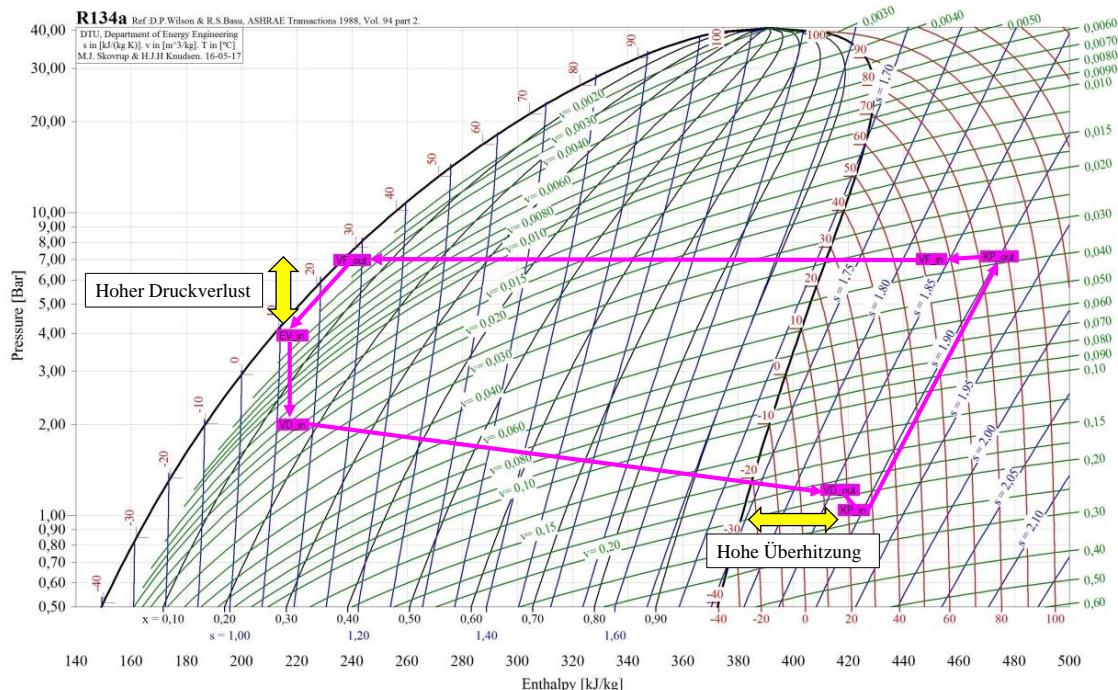


Abbildung 6.3: Hohe Kältemittel-Überhitzung nach Verdampfer und hoher Druckverlust zwischen Expansionsventil und Verflüssiger dargestellt im log p,h-Diagramm

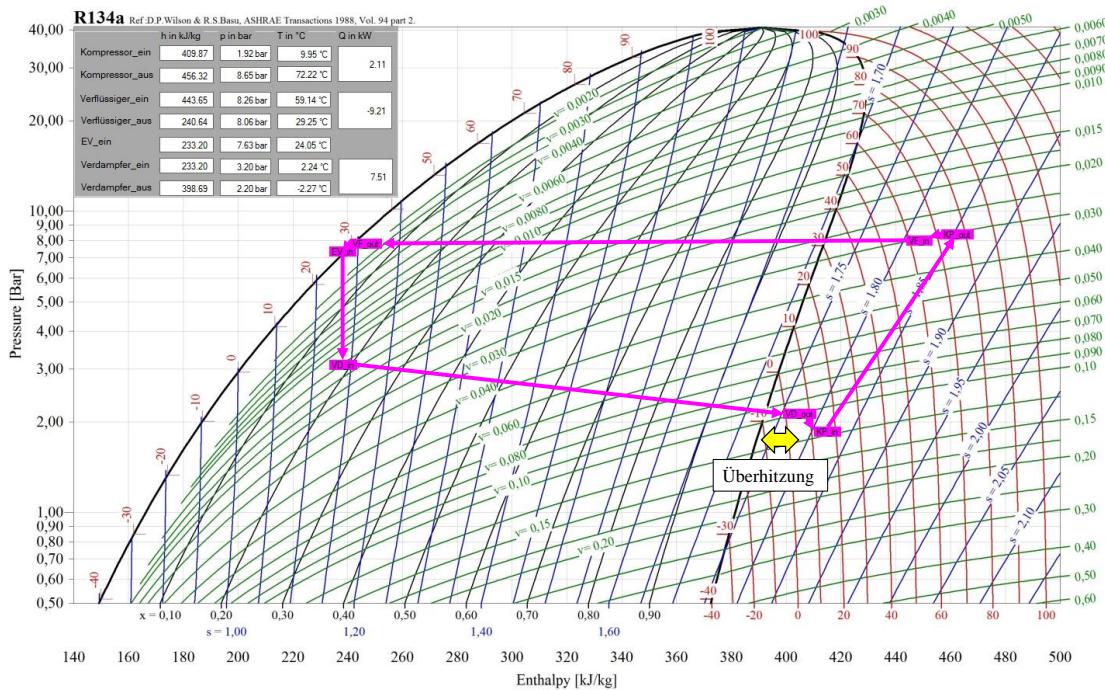


Abbildung 6.4: Zustandspunkte der Kältemaschine nach Fehlerbehebung dargestellt im log p,h-Diagramm

Schwingender Regelkreislauf

Da die Expansionsventile nur durch den Modbus RTU ausgelesen werden und nicht gesteuert, können sie nur mit einer PID-Parametereinstellung betrieben werden. Mit den Auslieferungsparametern für den CAREL-PID-Regler wurde im Kühlbetrieb eine Schwingung um den Sollwert der Überhitzung (± 4 K) festgestellt.

Der Grund hierfür ist der örtliche Abstand zwischen Verdampfer-Ausgang und Position des Druck- und Temperaturfühlers vom Expansionsventil (ca. 3 m). Der Temperaturfühler ist, wie in der Praxis üblich, nur ein Oberflächensensor. Der Temperaturfühler erfasst die Temperaturänderung, ausgelöst durch eine Ventilöffnungsänderung, erst mit einer Verzögerung von 90-120 s. Ein anderes PT100-Element (*Temp_VD_out*), angebracht unmittelbar am Verdampfer-Ausgang, misst eine Temperaturänderung nach einer Ventilöffnungsänderung bereits nach 10-15 s.

Eine kurzfristige Lösung des Problems war die Veränderung der Regelparameter des Expansionsventil nach dem Einschwingvorgang bzw. Herunterkühlen der Klimakammer ($t = 20$ min). Um einen schwingenden Regelkreis im stationären Zustand zu vermeiden, wurden die Parameter manuell umgestellt.

Tabelle 6.1: Werte für CAREL-PID-Regler für Einschwingvorgang und stationärer Betrieb

PID-Parameter	Einschwingvorgang	Stationärer Betrieb
KP	15	5
Integralzeit	150 ms	490 ms
Differentialzeit	5 s	5 s

6.4 Kalibrierung Wägesystem

Wie schon im Abschnitt 6.4 erwähnt worden ist, muss das Wägesystem vor jeder Messung kalibriert werden. Für die Kalibrierung sind folgende Schritte notwendig:

- ▷ Waagen mit 2 kg vorbelasten
- ▷ Gewichtskalibrierung mit in 500 g Schritten von 500 g bis 2500 g. Anleitung ist in der GUI implementiert
- ▷ Ventilatorkalibrierung

6.5 Versuche

Nach der Inbetriebnahme und Behebung der aufgelisteten Defizite werden erste Vereisungs- und Abtauversuche durchgeführt. Der Luftkühler befindet sich in der Klimakammer, die auf 2 °C und 90 % Luftfeuchtigkeit eingestellt ist und somit als Wärmequelle dient. Nachdem der Luftkühler 1 h vereist worden ist, wird er wieder abgetaut. Hierzu wurde ein Mal die Abtaumethode *elektrisch* und zwei Mal über *Heißgas oben* verwendet. Die Ergebnisse für die Vereisungs- und Abtauphase werden im Folgenden dargestellt und diskutiert. In Tabelle 6.2 sind die drei Versuchsreihen mit den dazugehörigen Vereisungszeiten und gewählten Abtaumethoden.

Tabelle 6.2: Versuchsreihen

Versuchsreihe	Vereisungszeit	Abtaumethode	Position der vier Oberflächen-PT100
I	47 min	Heißgas-Oben	Stack-Eingang
II	53 min	Heißgas-Oben	Verteilt über unterstes Stack
III	59 min	Elektrisch	Stack-Eingang

Versuchsreihe I: Vereisen

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Temperatur- und Druckverläufe am Luftkühler dargestellt. Das Diagramm 6.5 stellt die Verläufe für die Versuchsreihe I dar. Die Druckverläufe von Ein-

und Ausgang zeigen einen schwingenden Verlauf mit einer Periodendauer von der gesamten Vereisungszeit. Der Druck am Eingang beträgt durchschnittlich 3,7 bar; am Ausgang durchschnittlich 2,2 bar. Der Druckabfall über den Venturiverteiler und Wärmeübertrager beträgt konstante 1,5 bar über die Vereisungszeit.

Die Temperaturverläufe sind am Eingang und an den Oberflächensensoren weitgehend konstant und führen wie die Druckverläufe eine Schwingung mit der Periodendauer von ca. 2200 s durch. Am Eingang schwankt die Temperatur in dieser Zeit zwischen 5,9 °C und 7,8 °C. Im Durchschnitt liegt sie bei 7,1 °C. Die Oberflächensensoren betragen im Durchschnitt - 6 °C. Auffällig ist die Temperaturspreizung zwischen den Oberflächensensoren. Zwischen dem Eingang des obersten Einspritzungsrohr (*TEMP_VD_surface_6*) und dem untersten Einspritzungsrohr (*TEMP_VD_surface_2*) beträgt zu jedem Zeitpunkt ca. 1 K.

Die Eingangstemperatur, die noch vor dem Venturiverteiler gemessen wird, verzeichnet starke periodische Schwankungen in einem kurzen Zeitraum um mehrere Kelvin. Die Schwankungen werden ausgelöst durch die Expansionsventilöffnungsänderung, sprich die Überhitzungsregelung. Die Schwankungen gilt es zu vermeiden und werden im Abschnitt *Expansionsventil: PID-Parameter-Vergleich* näher diskutiert.

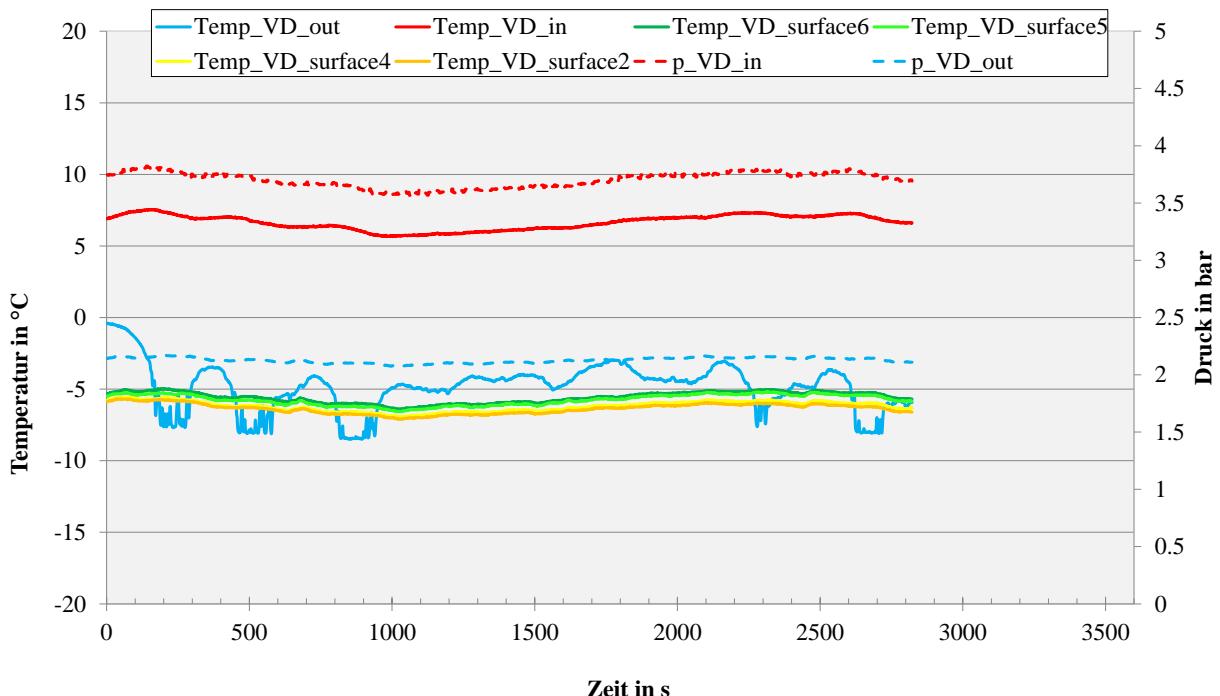


Abbildung 6.5: Versuchsreihe I: Temperaturverläufe am Luftkühler (VD) während Vereisungszeit

Versuchsreihe II: Vereisen

Die Versuchsreihe II zeigt von Versuchsreihe I unterschiedlichen Temperatur- und Druckverlauf. Der Druckverlauf am Ein- und Ausgang zeigt einen instationären Verlauf bis zur Zeit von 2200 s. Danach ist ein stationärer Zustand erreicht. Im stationären Zustand werden Druckwerte wie in der Versuchsreihe I erreicht. Der instationäre Verlauf spiegelt sich auch in den Temperaturverläufen wieder. Die Instationarität wird hervorgerufen durch ein sehr langsam schließendes Expansionsventil. Die Regler der Überhitzungsregelung ist in dieser Versuchsreihe deutlich träger eingestellt als noch bei der Versuchsreihe I.

Ab 750 s sind sprunghafte Temperaturänderungen an den Oberflächensensoren zu erkennen. Mögliche Ursachen hierfür ist die einsetzende Abtauung der Klimakammer und Türöffnungen während des Versuchs und sind bei zukünftigen Versuchen zu vermeiden. Zum Ende der Vereisungsphase, im stationären Zustand, treten im Verdampfereingang erneut periodische Temperaturschwankungen auf.

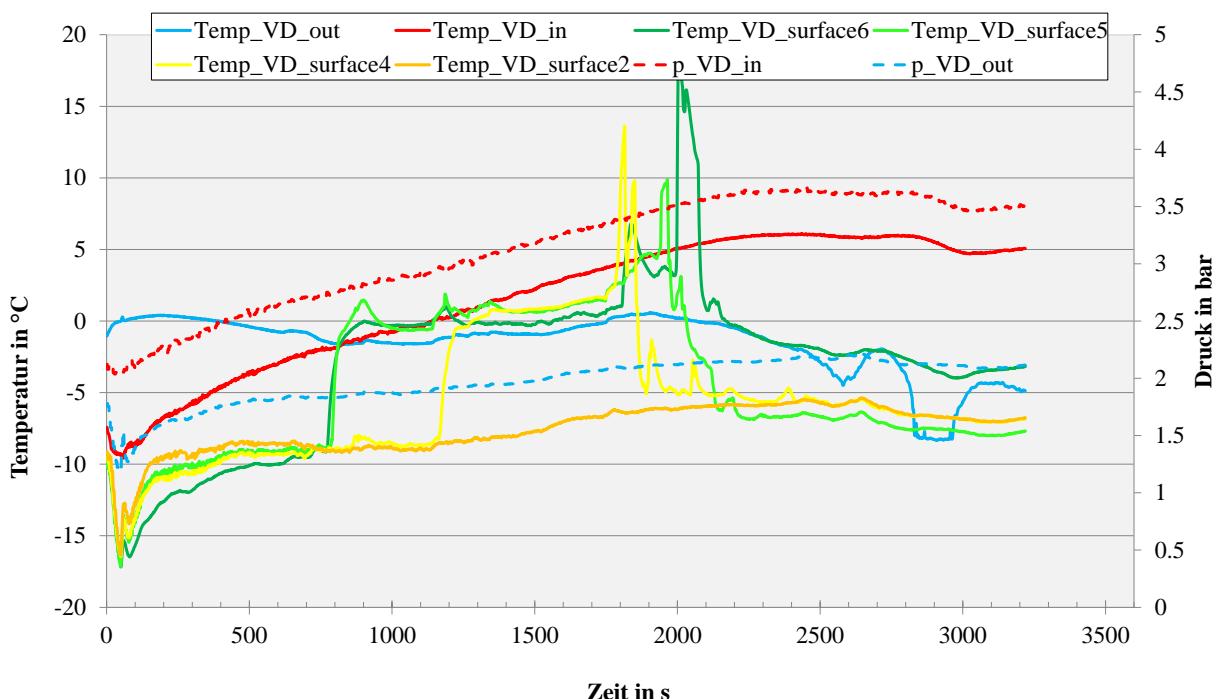


Abbildung 6.6: Versuchsreihe II: Temperaturverläufe am Luftkühler (VD) während Vereisungszeit

Versuchsreihe III: Vereisen

Die Versuchsreihe III zeigt wie schon Versuchsreihe II zunächst einen instationären und später, ab 1800 s, einen stationären Verlauf. Erneut ist ein träge eingestellter PID-Regler für die Überhitzungsregelung der Grund für dieses Verhalten. Die Oberflächensensoren messen im Durchschnitt -5,5 °C. Die Eingangs- und Ausgangstemperatur liegen im Durchschnitt für die stationäre Phase bei 7 °C und -3,5 °C. Der Druck am Eingang beträgt 3,7 bar im Durchschnitt und der Ausgangsdruck liegt im Durchschnitt 2,2 bar.

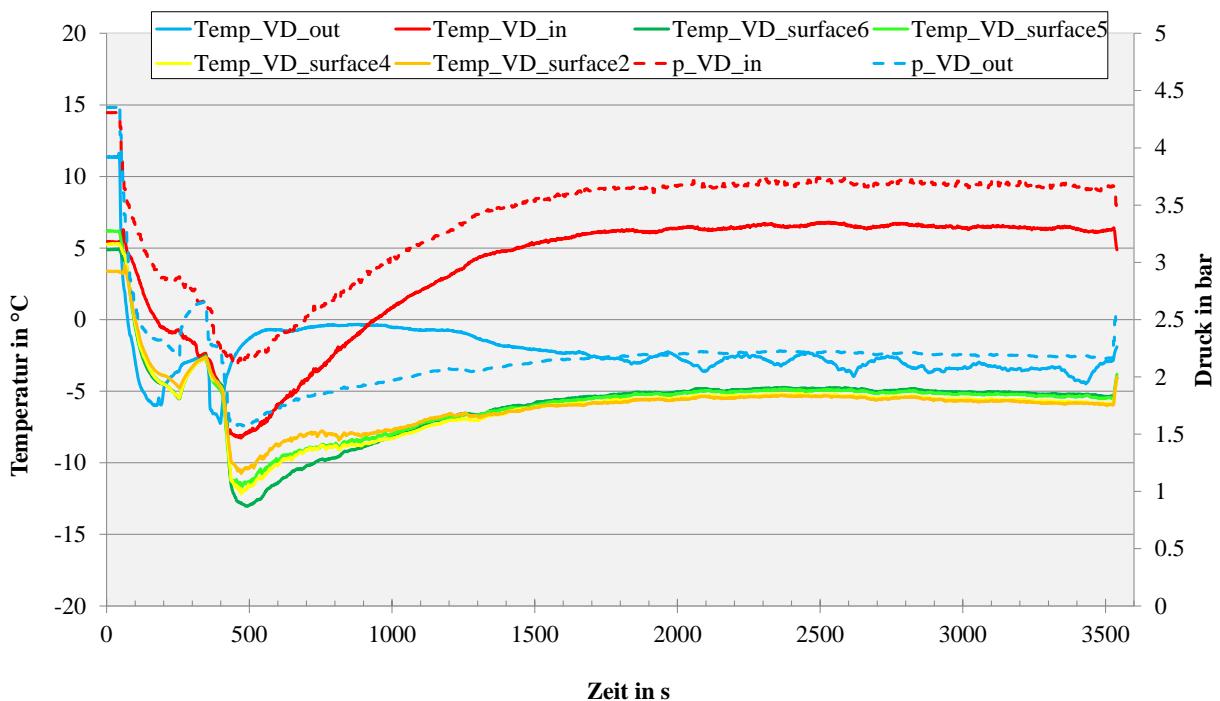


Abbildung 6.7: Versuchsreihe III: Temperaturverläufe am Luftkühler (VD) während Vereisungszeit

Versuchsreihe I: Abtauen mittels *Heißgas-Oben*

Das Diagramm 6.8(a) zeigt den Verlauf der Temperatursensoren am Luftkühler über die Abtauzeit. Zu Beginn des Abtaus wird ein Pumpdown durchgeführt. Dann wird das Vierwegeventil geschaltet, der Kompressor läuft an und heißes Gas fängt an durch den Verdampfer zu strömen. Alle Temperaturen steigen in der Abtauzeit von 2 min simultan an. Die maximale Temperatur von 43,3 °C werden am Ende der Abtauzeit am Ein- und Ausgang des Verdampfers erreicht. Am Eingang der Wärmetauscherstacks werden maximal 34,8 °C erreicht. Am obersten Stackeingang (*Temp_VD_surface6*) werden nur 29,5 °C erreicht.

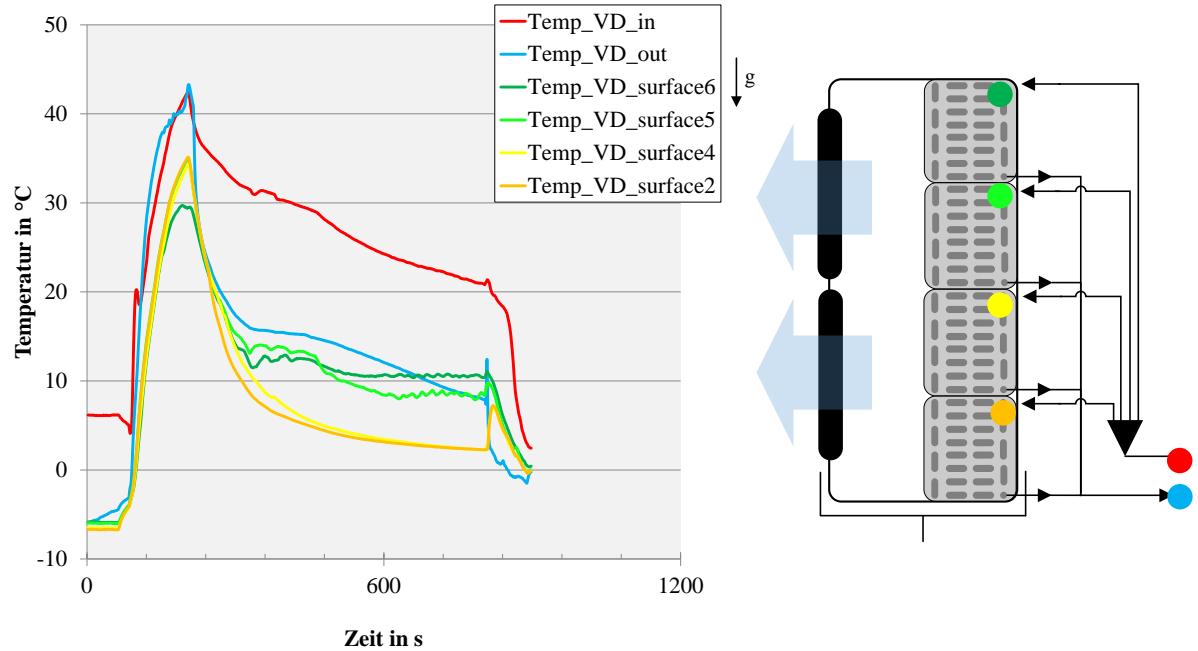
Nach der Abtauzeit folgt die Abtropfzeit von 10 min. Alle Temperaturen fallen über diesen Zeitraum. Die höchste Temperatur ist am Eingang des Verdampfers zu verzeichnen. Die Oberflächentemperaturänderung werden kleiner und die Temperaturen streben gegen einen Grenzwert. (*Temp_VD_surface6*), positioniert am obersten Wärmeübertrager-Eingang, bleibt nach 550 s bei konstanten 10,5 °C. Ein möglicher Grund hierfür ist die natürliche Konvektion innerhalb des Wärmeübertrager während der Abtropfzeit. Die abgegebene Wärme steigt nach oben und führt so zu einer Temperaturschichtung. Die unteren zwei Oberflächensensoren (*Temp_VD_surface2* und *Temp_VD_surface4*) messen am Ende der Abtropfzeit, bei 810 s, eine Temperatur von 2,3 °C. Zwischen dem obersten und untersten Oberflächentemperatursensor ist eine Temperaturspreizung von 8 K zu verzeichnen.

6.8(b) zeigt die Massenverläufe und die Öffnung der Expansionsventils über die gesamte Abtauphase. Mit dem PumpDown sinkt die Masse des Verdampfers, weil das noch vorhandene Kältemittel abgesaugt wird und der Verdampfer an Gewicht verliert. Mit Beginn der Abtauung durch Heißgas steigt sofort die Masse des Verdampfers. Innerhalb der 2 min steigt die Verdampfermasse um ca. 3,8 kg an. Nach dem Beginn der Abtropfphase sinkt die Verdampfermasse erneut, da das Eis geschmolzen ist und nun über den Abfluss abgeführt wird. Die Abtropfmasse steigt nun stetig an und der Verdampfer wird wieder leichter. In der Abtropfphase wird der Verdampfer um 910 g leichter. Die gesamte Abtropfmasse beträgt 2456 g.

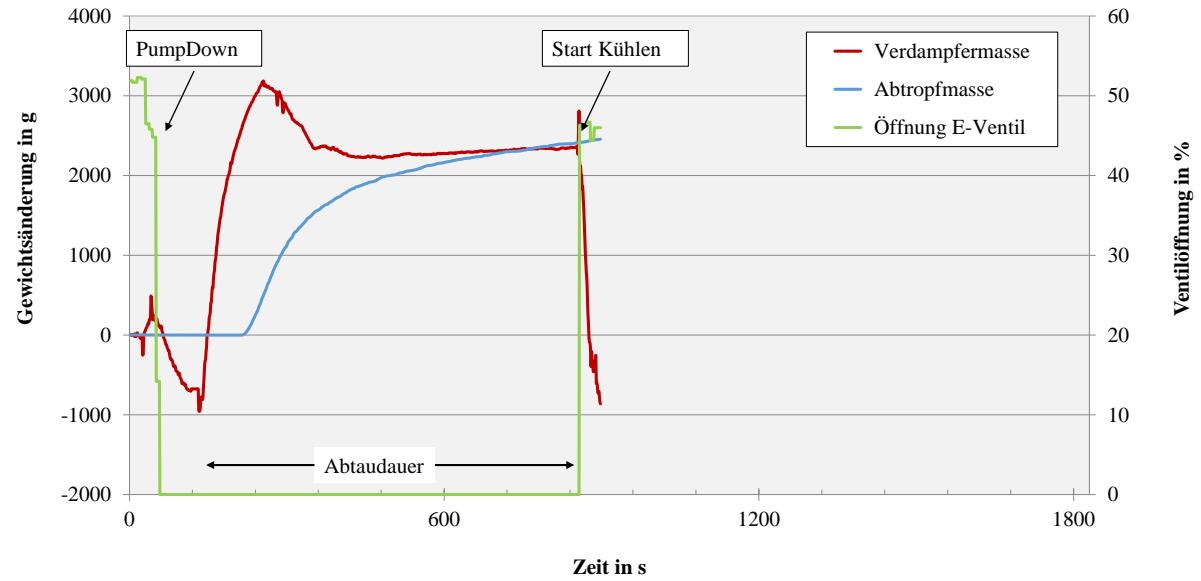
Nach 600 s Abtropfzeit beginnt die Kälteanlage wieder mit dem Kühlmodus. Alle Temperatur sinken, der Zyklus beginnt erneut.

Versuchsreihe II: Abtauen mittels *Heißgas-Oben*

In der Versuchsreihe II wird erneut mittels *Heißgas-Oben* abgetaut. Die Oberflächentemperatursensoren werden für diese Messung an nur einem Wärmeübertragungsrack angebracht. Die Oberflächentemperatursensoren sind PT100-Elemente. Ein Rack besteht aus 6 x 6 Rohrleitungen, durch die das Kältemittel geführt wird und Wärme aus der Umgebung aufnimmt. Die Oberflächensensoren sind an folgenden Rohren angebracht: 1. Rohr(Einspritzrohr, *Temp_VD_surfaceX12*), 12. Rohr (*Temp_VD_surfaceX12*), 25. Rohr (*Temp_VD_surfaceX25*) und 36. Rohr ((*Temp_VD_surfaceX36*)).



(a) Temperaturverläufe am Luftkühler. Oberflächen-Temperatursensoren(*surface*) sind angebracht am Einspritzrohr



(b) Verläufe von der Abtropfmasse und Verdampfermasse, Öffnung des Expansionsventils aufgetragen über die Zeit

Abbildung 6.8: Versuchsreihe I: Abtauen mittels *Heißgas-Oben*

Die höchste Temperatur wird am Verdampfereingang mit 43,9 °C erreicht. Die Temperaturverläufe zeigen ähnliche Charakteristika wie die Temperaturverläufe aus der Versuchsreihe I. Nachdem das Heißgas 2 min durch den vereisten Wärmeübertrager geströmt ist, misst jeder Sensor die örtliche maximale Temperatur. Danach fallen alle Temperaturwerte mit ähnlicher Geschwindigkeit wie sie zuvor gestiegen waren. Nach 2 min flachen die Temperaturkurven ab und sinken mit geringer Geschwindigkeit während der Abtropfphase weiter. Die Temperaturspreizung zwischen den Oberflächentemperaturen beträgt ca. 1,5 K. Die Oberflächentemperatur am 36. Rohr ist die wärmste und die anderen drei Oberflächentemperaturen sind nahezu gleich. Die Oberflächentemperatur am 12. Rohr *Temp_VD_surfaceX12* steigt nach Beginn der Heißgas-Abtauung, jedoch nicht so stark wie die anderen Oberflächentemperaturen. Die maximale Temperatur wird 60 s nach dem Ende des Abtauvorgangs, bei 310 s, mit 8 °C erreicht. Der Oberflächensensor hat

Nach der Abtropfdauer startet der Kühlmodus und die Temperaturen fallen wieder.

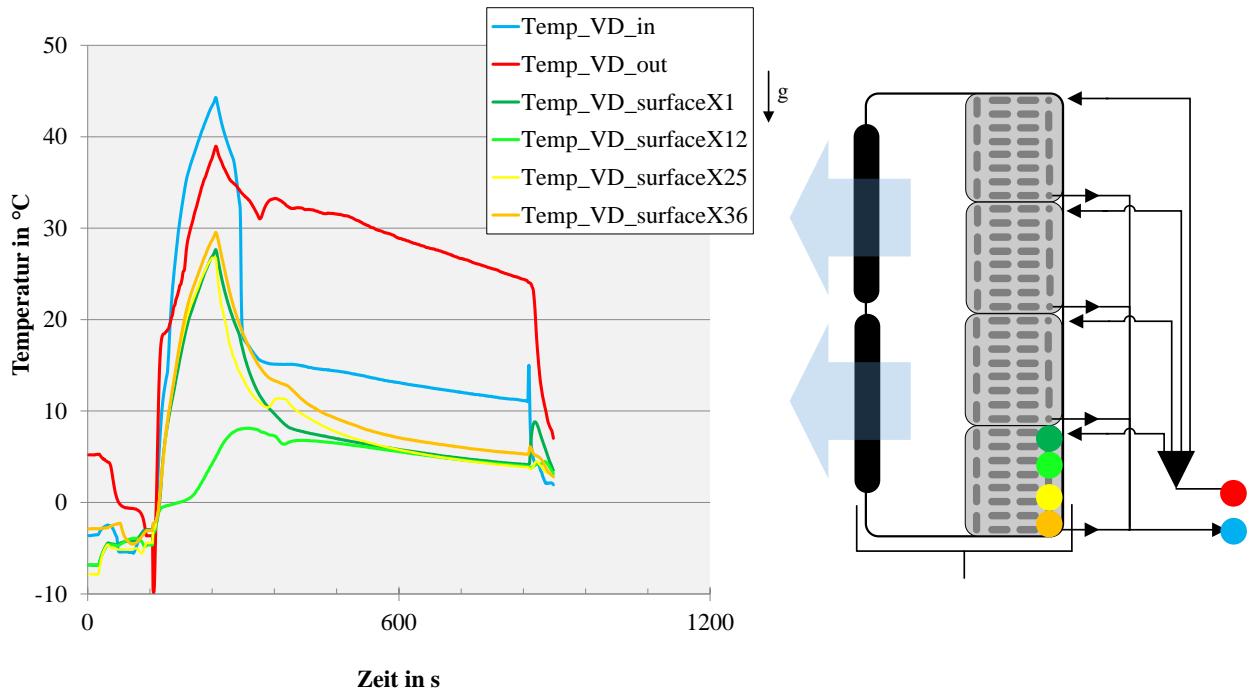


Abbildung 6.9: II: Abtauen mittels *Heißgas-Oben*

Versuchsreihe III: *Elektrisches Abtauen*

Nachdem der Verdampfer vereist worden ist, wird der Verdampfer mittels einer elektrischen Heizung abgetaut. Die elektrische Heizung umfasst 20 Heizstäbe, die in dem Wärmeübertrager integriert sind. Ein Heizstab hat eine maximale Leistung von 220 W. Die Bodenplatte des Luftkühlers ist

mit 3 Heizstäben á 625 W ausgestattet. Die gesamte elektrische Abtauleistung beträgt 6,275 kW. Die Heizelemente sind stufenlos zwischen 0...10 V regelbar.

In diesem Versuch wurde mit der maximalen Leistung, sprich 6,275 kW, abgetaut. Abbildung 6.10 zeigt die Temperatursensoren des Luftkühlers dar.

Wie auch bei den Versuchsreihen I und II wird auch hier zunächst ein Pumpdown durchgeführt. Danach fängt die Abtauphase an und die Temperaturen steigen.

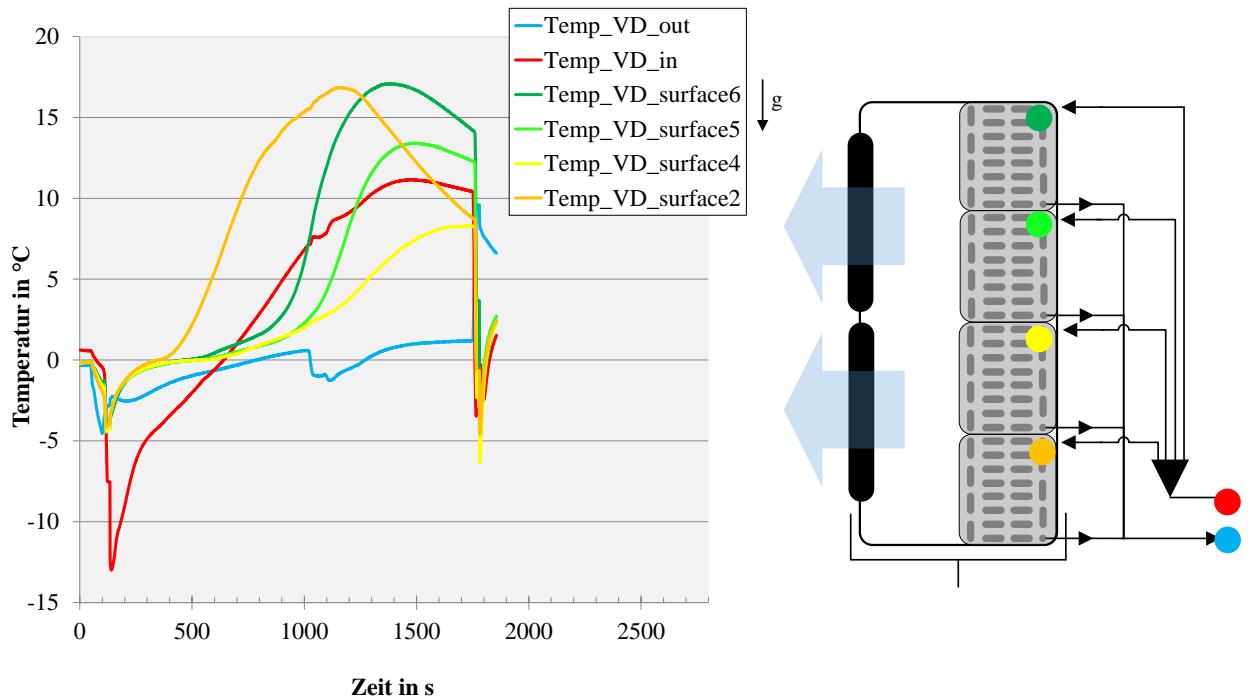


Abbildung 6.10: III: Elektrisch Abtauen mit 6,2 kW Heizleistung

Expansionsventil: PID-Parameter-Vergleich

Für eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuche ist ein stationärer Zustand nötig. Ein instationäres System verringert die Aussagekraft über die späteren Versuchsergebnisse. Das Expansionsventil hat großen Einfluss auf die angestrebte Stationarität der Kälteanlage. Aus diesem Grund ist der Verlauf der Überhitzung über die Zeit für alle drei Versuchsreihen aufgezeichnet.

Das Expansionsventil kann zu entweder mit den PID-Parameter für den stationären Betrieb oder für den Einschwingvorgang programmiert sein. Regelt das Expansionsventil von Beginn an mit stationären PID-Parameter, so hat dies einen sehr langen Einschwingvorgang zur Folge (siehe Kurve *Stationäre PID-Parameter* im Diagramm 6.11).

Ist das Expansionsventil mit den Einschwing-PID-Parameter programmiert, wird der Sollwert schnell erreicht, jedoch schwankt die Überhitzung periodisch um den Sollwert mit Abweichungen um ± 3 K (siehe Kurve *Einschwing-PID-Parameter* im Diagramm 6.11).

Werden die PID-Parameter nach Erreichen des Sollwertes geändert, so verkürzt sich die Einschwingphase und die Schwingungsamplitude im stationären Zustand (siehe Kurve *Einschwing + Stationäre PID-Parameter* im Diagramm 6.11). Für zukünftige Versuche wird im Abschnitt 7 Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt.

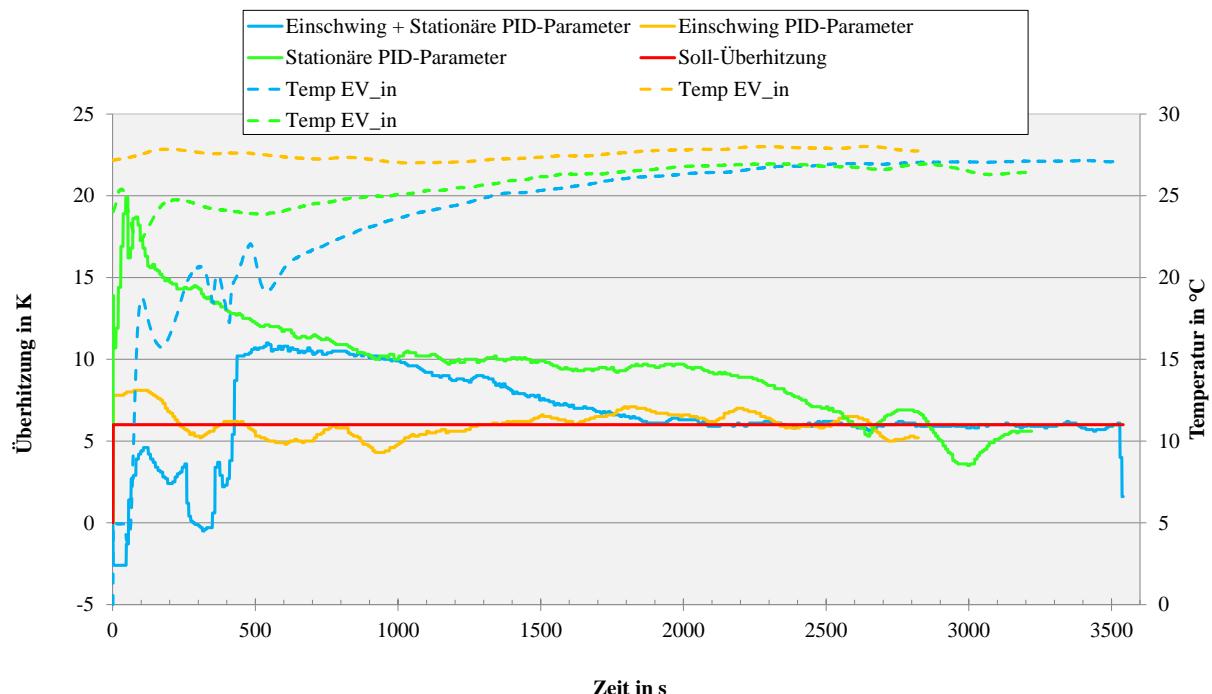


Abbildung 6.11:

6.5.1 Fehlerabschätzung

7 Ausblick und Optimierungsvorschläge

Die Anlage wurde erfolgreich in Betrieb genommen und erste Vereisungs- und Abtauversuche wurden durchgeführt. Während der Versuche wurden weitere vier Oberflächentemperaturen an unterschiedlichen Positionen auf dem Wärmeübertrager gemessen. Das System lässt sich mittels der SPS steuern und regeln.

Um qualitative Aussagen bezüglich der Abtaueffizienz und -geschwindigkeit treffen zu können, werden weitere Messungen durchzuführen sein. Zunächst wird vorgeschlagen, den Referenzumgebungs-punkt bei 2 °C und 90% Luftfeuchtigkeit zu belassen und mit einer Vereisungszeit von 1 h alle Abtaumethoden hinreichend oft zu vermessen. Erst dann wird ein Vergleich der Abtaumethoden mittels der gewonnenen Daten möglich sein.

Um die Performance der Kälteanlage als auch der SPS und des Wägesystems weiter zu optimieren, wurde eine Liste von Punkten zusammengetragen, die zu einer Verbesserung des gesamten Prüfstands führen sollen. Bei den aufgeführten Punkten und Unterpunkten handelt es sich lediglich um eine Empfehlung des Verfassers. Die Punkte haben sich während der Inbetriebnahme und bei der Durchführung der ersten Messungen ergeben. Die Optimierungsmaßnahmen haben unterschiedlich hohe Prioritäten und werden unterschiedlich stark zur Verbesserung des Prüfstandes führen. Jeder Vorschlag ist mit einer subjektiven Prioritätseinschätzung seitens des Autors versehen. Die Priorität (P) und der Aufwandes (A) jedes Vorschlages wurde nach Schema, aufgezeigt in der Tabelle 7.1, eingestuft.

Tabelle 7.1: Aufwands- und Prioritätsschlüssel

Markierung	Priorität (P) / Aufwand (A)
(+)	hoch
(0)	mittel
(-)	niedrig

Die Priorität bezieht sich auf Sicherheit, Funktionalität und Messerfassung der Kälteanlage. Der Aufwand betrachtet Arbeitsstunden, Einarbeitungszeit und Kosten der Maßnahmen. Alle Einschätzungen sind subjektiv und bedürfen die Absprache mit dem Anlagenbetreiber.

Kältemaschine

- ▷ die Wiederinbetriebnahme der mechanischen Sicherheitskette des Bock-Kompressors durch Austausch des Funktionsmoduls am EFC-Frequenzumrichter. Weitere Hardware-Sicherheitsorgane wie mechanische Druckschalter erhöhen das Sicherheitsniveau der Anlage. A → 0, P → +

Expansionsventil: Verbesserung der Regelperformance und Düsenaustausch:

- ▷ Den Temperatursensor näher an den Verdampfer-Austritt positionieren und/oder externes analoges Signal für Druck- und Temperaturwerte verwenden. Hierfür CAREL-Sensoreingangskanäle S3 und S4 benutzen, da diese noch nicht belegt sind. Analoge Ausgangsklemmen, EL 4024 für 4-20 mA oder EL 4008 für 0-10 V, von der SPS besitzen noch unbenutzte Kanäle. CAREL-Druck und Temperatursensoren (auf Anschlüssen S1 und S2) als *Back-up*-Regelung konfigurieren. A → 0, P → +
- ▷ Die Reglerparameter sollten optimiert werden. Entweder kann hierfür das *Autotuning*-Verfahren von CAREL benutzt werden oder das Ziegler-Nichols-Verfahren, dass per SPS ausführt werden kann. Für das Ziegler-Nichols-Verfahren gibt es in der OSCAT-Bibliothek die Funktionsbausteine *CONTROL_SET1* oder *CONTROL_SET2*. Die Funktionsbausteine, führen nach Eingabe der kritischen Verstärkung und Periodendauer, das Verfahren automatisiert durch. A → -, P → +
- ▷ Die Einspritzdüse tauschen oder weiteres Magnetventil installieren, um einen Druckausgleich im Anlagenstillstand zu verhindern. Nach einem PumpDown bleibt das flüssige Kältemittel im Sammler. A → +, P → +

Abtauverdampfer: Verhindern von Einschluss von flüssigem Kältemittel im Abtauverdampfer durch Heizstäbe, Umleitung der Verflüssiger-Abluft oder Magnetventile.

- ▷ Heizstäbe
 - Das flüssig, im Abtauverdampfer gefangene Kältemittel wird bei T= 35 °C verdampfen und der Druck sich auf ca. 9 bar erhöhen. Das Kältemittel wird zum Austritt über die Rückstoßventile aus dem Verdampfer gezwungen und kein flüssiges Kältemittel sammelt sich im Kühlbetrieb im Abtauverdampfer. A → 0, P → 0
- ▷ Magnetventile
 - Rückschlagventile durch Magnetventile ersetzen und über ein Schaltschütz öffnen und schließen. Schaltschütz könnte über ein digitales Ausgangssignal über die SPS geschalten werden. Zusätzliches Signal in die Statusmaschine implementieren. A → +, P → 0
- ▷ Umlenkung der warmen Verflüssiger-Abluft

Ausblick und Optimierungsvorschläge

- Verflüssiger-Ventilator mit niedrigeren Drehzahlen betreiben und Umlenkung der warmen Luft in den Wärmeübertrager des Abtauverdampfers. Erhöhung der Temperatur führt zum Verdampfen des flüssigen, eingeschlossenen Kältemittels. A→ -, P → 0

Modbus RTU

- ▷ Baudrate von *Modbus COM* auf 115200 bps hochstellen. Dies ermöglicht eine schnellere Abfrage der Slaves. Bisher dauert ein Datenerfassungszyklus 2-4 s lang. Anpassung der Baudraten führt zu einer Verringerung des Datenerfassungszyklus auf unter 1 s. Achtung: Störsignale werden höher auf der Datenleitung. Es wird empfohlen die Timeout zwischen Modbus-*Request* und -*Response* hochzustellen. A→ 0, P → 0

Informationstechnik

Optimierung des Programmcodes und Implementierung weiterer *Features*.

- ▷ Datenspeicherung der Globalen Variablen per .CSV- Datei oder direkte Übermittlung der Daten in die Datenbank MySQL programmieren. A→ 0, P → +
- ▷ Meldungslog einbauen, indem Fehler und aktuelle Statusmeldungen geschrieben werden können. Erleichtert die Überwachung und Auswertung der Messdaten. A→ 0, P → -
- ▷ Abtauablauf: Einschalten der Bodenheizung mittels TIMER verzögern. Bei Heißgasabtauung die Abtaudauer optimieren bzw. an die vorhandene Eismenge anpassen. A→ -, P → -

GUI

Zur Verbesserung der Funktionalität und Übersicht der GUI werden folgende Punkte vorgeschlagen:

- ▷ Erweiterung der Steuerungselemente-Bibliothek um folgende Kältekomponenten: Wärmeübertrager, Magnetventil, Vierwegeventil, Kompressor. Übersichtlichere und eine intuitiv verständlichere Benutzeroberfläche wäre das Ergebnis. A→ 0, P → -
- ▷ Messdaten-Aufzeichnungsfeld in die Benutzeroberfläche integrieren, siehe Konzept von HIL2-Benutzeroberfläche in NÜRENBERG. A→ 0, P → +

Regelung

- ▷ Nach Optimierung der Regelperformance des Expansionsventils kann die gesamte Regelung der Kälteanlage optimiert werden. Hierzu die gängigen empirischen Optimierungsverfahren

Ausblick und Optimierungsvorschläge

(*Ziegler-Nichols-Verfahren*) anwenden, um bessere Regelparameter für die PID-Regler zu ermitteln. Die Standardabweichung wird gesenkt und dadurch eine geringere Abweichung von den gewünschten Oberflächentemperaturen im Verdampfer erreicht. $A \rightarrow 0$, $P \rightarrow 0$

Wägesystem

- ▷ Reduzierung der Waagenanzahl auf drei Waagen. Durch Fixierung von der linken Seite wird es kein Kippmoment bei Betrieb der Ventilatoren und Klimakammer geben. Ein Wägesystem mit drei Waagen hat weniger Freiheitsgrade als ein System mit vier Waagen. $A \rightarrow 0$, $P \rightarrow +$
- ▷ Optimierung der Schmelzwasser-Wägung bzw. des -Ablaufes für den automatisierten Vereisungs- und Abtauungsprozess. Zurzeit ist manuelles Leeren nach jeder Messreihe nötig. $A \rightarrow -$, $P \rightarrow -$
- ▷ Kältemittel-Gewichtserfassung: Berechnung oder praktische Erfassung der Kältemittelmasse im Luftkühler, um errechnete Eis-Summe von Öffnung des Expansionsventiles zu entkoppeln. $A \rightarrow 0$, $P \rightarrow +$

8 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Prüfstandsaufbau für die Untersuchung von Vereisungs- und Abtauvorgänge von Luftkühler optimiert. Der Prüfstandsaufbau sollte alle kältetechnischen Komponenten bilanzieren können und den zeitlichen Verlauf der entstehenden Eismenge bestimmen. Es wurde in vier Phasen unterteilt.

In der ersten Phase wurde ein Wägesystem zur Messung der Eismenge und dessen 2D-Schwerpunktes in einem Luftkühler konzipiert und gebaut. Das Wägesystem besteht aus vier Auflagerpunkten jeweils versehen mit einer Blattfeder. Die Blattfeder fungiert mit einer Waage in einer Parallelschaltung. Ein Kalibrierungsverfahren wurde entwickelt, um vom gemessenen Waagengewicht auf die tatsächliche Belastung im Luftkühler schließen zu können. Die vier Waagen messen im Verbund und ermitteln die gesamte Gewichtsänderungen im Luftkühler in Echtzeit.

In der zweiten Phase wurde mittels einer SPS der Fa. Beckhoff und der Software TwinCat 3 ein Programm-Code zur Steuerung der Prüfstandes und Auslesung aller installierten Sensoren entworfen. Der Programm-Code ist nach dem Konzept einer Statusmaschine entwickelt worden. Die Waagen werden über eine RS232-Kommunikation ausgelesen. Zwei Modbus RTU- System kommunizieren mit acht Drucksensoren, zwei Expansionsventile und einem Massenstromsensor über zwei RS485-Netzwerke. Mit zwölf PT100-Elementen und den Messdaten der anderen Sensoren ist eine komplette energetische Bilanzierung der Kältetechnikkomponenten in Echtzeit möglich. Die Statusmaschine wird mittels Transitionsvariablen in Kühl-, Abtau-, Leerlauf oder Pumpdown-Modus versetzt. Ein soft- und hardwareseitiger Anlagenschutz sorgt für Sicherheit für Benutzer und Maschine.

In der dritten Phase wurde die Kälteanlage inklusive ihres Regelkonzeptes in Betrieb genommen. In dieser Phase wurden mehrere Mängel festgestellt und behoben. Dem Expansionsventil war es nicht möglich trotz kompletter Öffnung die Überhitzung nach dem Verdampfer zu senken. Ein niedriger Massenstrom von ca. 20-30 g/s führte im Betrieb nicht zur erwünschten Kälteleistung des Luftkühlers (Auslegungsmassenstrom 77 g/s). Mehrere Maßnahmen wurden durchgeführt, um die Kälteleistung des Luftkühlers zu steigern. 4 kg Kältemittel wurden nachgefüllt und die Kältemittelpipetten mit Isolierung versehen. Dann wurde der Kältemitteltrockner ausgetauscht. Der alte, verstopfte Trockner hatte zu einem *Flashgas*-Phänomen in der Einspritzleitung geführt. Verstopfte Poren führten zu einem Druckverlust von 4 bar. Spontane Verdampfung führte nach dem Trockner zur Gasbildung und verringerte den Massendurchfluss durch das Expansionsventil.

Zusammenfassung

In der letzten und vierten Phase der Arbeit wurde eine Bedienoberfläche zur Steuerung der Kälteanlage entworfen, eine Optimierung der Regelparameter und die ersten Abtauversuchen durchgeführt. Die Bedienoberfläche ermöglicht eine sicher Bedienung der Kälteanlage durch einen Benutzer. Die Optimierung der Regelparameter führte zu der Erkenntnis, dass die Sensoren für das Expansionsventile örtlich zu weit von dem Ausgang des Verdampfers entfernt sind. Damit haben die Expansionsventile eine sehr hohe Reaktionszeit, welche zu Schwingungen in der gesamten Kälteanlage führte. Eine Änderung der PID-Paramter des Expansionsventils auf KP = 5, TN = 490 ms und TV = 5 s wurde die regelungstechnische Dämpfung der Kälteanlage erhöht. Diese Einstellungen führen zu einem langsameren Einschwingprozess, verhindern jedoch einen schwingenden Regelkreis.

Erste Vereisungsversuche, mit einer Dauer von 1 h, wurden in einer Klimakammer durchgeführt. Die Umgebungsbedinungen wurden auf 2 °C und 90 % Luftfeuchtigkeit gesetzt. Die Ergebnisse der ersten Versuche offenbaren weitere Optimierungsmöglichkeiten. Die direkte Steuerung der Expansionsventile durch die SPS mittels analogen Ausgangssignalen ist zu prüfen. Eine Implementierung zweier Reglereinstellungen für "Einschwingvorgang" und "Stationärer Kühlbetrieb" für das Expansionsventil wird empfohlen und zu prüfen sein.

Literaturverzeichnis

- [KMG 2013] MFC 400: *Description of Modbus interface.* : MFC 400: *Description of Modbus interface*, 2013
- [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 2015] EL600x, EL602x- Serielle Schnittstellenklemmen. : EL600x, EL602x- Serielle Schnittstellenklemmen. 4.2, 2015. https://download.beckhoff.com/download/document/io/ethercat-terminals/el600x_el602xde.pdf
- [Bec 2016a] BECKHOFF AUTOMATION GMBH & CO. KG (Hrsg.): *Kommunikationskonzept-Hintergrundkommunikation.* http://infosys.beckhoff.de/content/1031/tcplclibserialcom/html/TcPlcLibSerCom_Concept.htm. Version: 2016
- [OSCAT 2016] OSCAT LIBRARY Dokumentation. : OSCAT LIBRARY Dokumentation. 3.20, 2016. http://plc4good.org.ua/files/02_materials/oscat/oscat_de320.pdf
- [Bec 2016b] 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] ETTEMAYER, 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=00000008172.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
- [KERN PCB-Betriebsanleitung Präzisionswaage 2006] KERN PCB-BETRIEBSANLEITUNG PRÄZISIONSWAAGE: 1.0, 2006

- [MicroNova AG 2011] MICRONOVA AG: *DREHZAHL - KONDENSATORD RUCKREGLER ADR 80 / 230.* Ausgabe 5.08, 2011. http://www.ries-gmbh.de/temp/explorer/files/import/kataloge/Regeltechnik/Micronova/Installation/adr80_230.pdf
- [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
- [Neumann 2007] NEUMANN, Carola: *User Centered Design oder Benutzerzentrierte Softwareentwicklung.* Version: 2007. http://users.informatik.haw-hamburg.de/~use-lab/papers/studienarbeit_ucd_Neumann.pdf
- [Normung 2010] NORMUNG, Deutsches Institut f.: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2010) : Deutsche Fassung EN ISO 9241-210:2010 : part 2010: Human-centred design for interactive systems (ISO 9241-210:2010).* DIN Deutsches Institut für Normung, 2010
- [Nürnberg 2015] NÜRENBERG, Markus: *Entwicklung und Inbetriebnahme der Mess-, Regel und Datenverwaltungsfunktionen für einen Hardware-in-the-Loop Prüfstand.* 2015
- [Preim 2013] PREIM, Bernhard: *Entwicklung interaktiver Systeme - Grundlagen, Fallbeispiele und innovative Anwendungsfelder.* 1. Aufl. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978-3-662-07054-3
- [Preuß 2011] PREUSS, G. ; VDMA (Hrsg.): *Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland: Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik in Deutschland nach Einsatzgebieten.* 2011
- [Schleicher 2005] SCHLEICHER, Manfred: *Digitale Schnittstellen und Bussysteme - Grundlagen und praktische Hinweise zur Anbindung von Feldgeräten an Modbus, PROFIBUS-DP, ETHERNET, CANopen und HART.* Fulda : JUMO, 2005. – ISBN 978-3-935-74202-3
- [Schwarz 2013] SCHWARZ, Helmut: *Mehrfachregelungen. Grundlagen einer Systemtheorie - Zweiter Band.* Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978-3-642-93004-1
- [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: *Regeltechnik.* Version: Januar 2007. <https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&id1=8360>

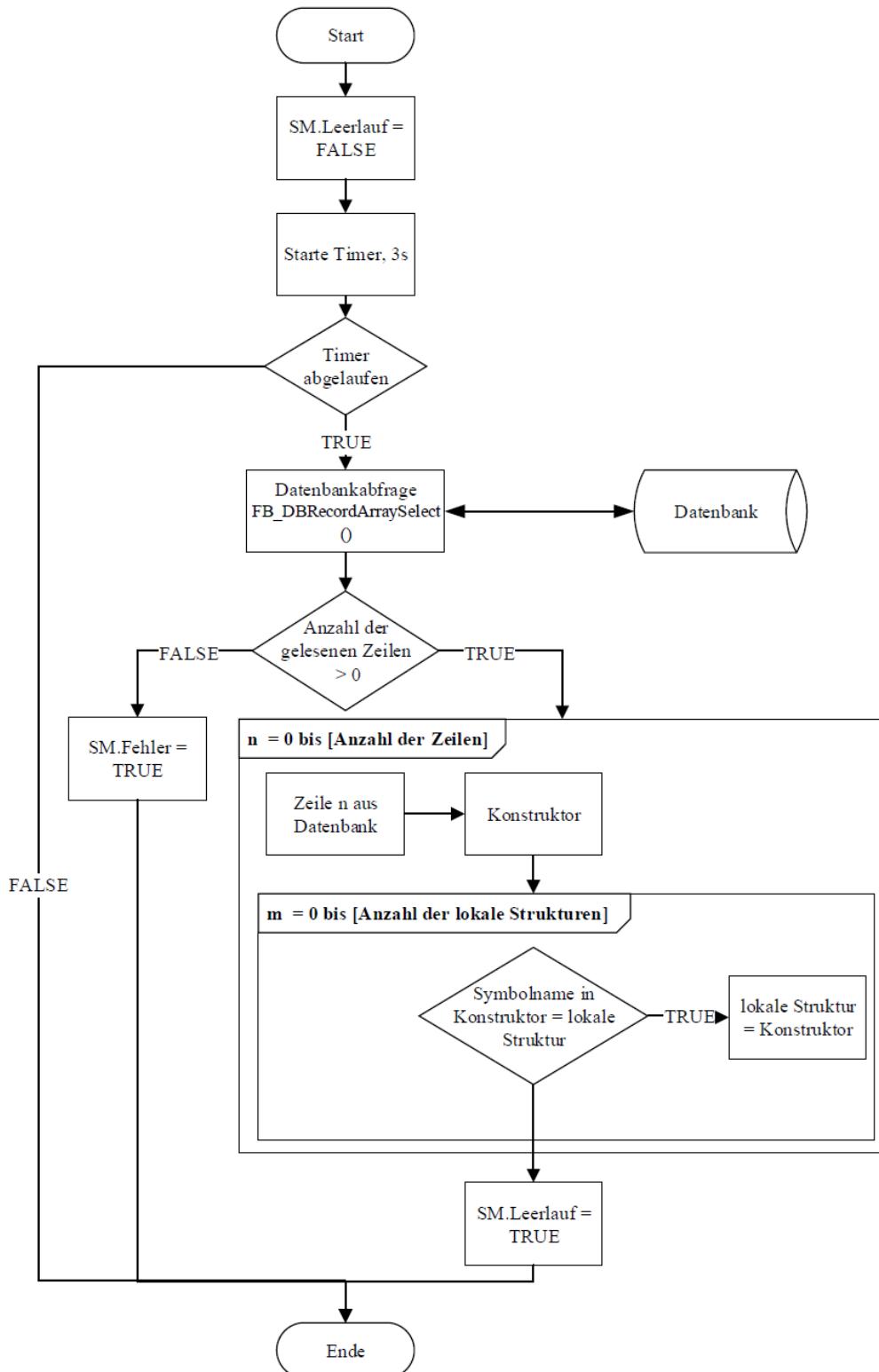
[Wittel u. a. 2011] WITTEL, Herbert ; MUHS, Dieter ; JANNASCH, Dieter ; VOSSIEK, Joachim: *Röloff/Matek Maschinenelemente - Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch.* 20. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – 301–310 S. – ISBN 978-3-834-81454-8

Anhang

A Datenbank lesen

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

A.1 Die Versalien

**Abbildung A.1:** Initialisieren nach [Nürnberg, 2015]

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 4. Juli 2016

Name hier bitte einfügen