



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Lennart Mehlaus

Experimentelle Untersuchungen an einer Wasser- Lithiumbromid-Absorptionskältemaschine und Weiterentwicklung der Anlagensoftware

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Lennart Mehlaus

**Experimentelle Untersuchungen an einer Wasser-
Lithiumbromid-Absorptionskältemaschine und
Weiterentwicklung der Anlagensoftware**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/ Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüferin: Frau Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell
Zweitprüfer: Herr Dipl. -Ing. Alexander von Stryk

Abgabedatum: 04.03.2022

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Lennart Mehlaus

Thema der Bachelorthesis

Experimentelle Untersuchungen an einer Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskältemaschine und Weiterentwicklung der Anlagensoftware

Stichworte

Absorptionskältemaschine, Kältetechnik, LabVIEW, Kältegewinnung, Wärmenutzung

Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden experimentelle Untersuchungen an einer Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskältemaschine durchgeführt, um das Betriebsverhalten mit unterschiedlichen Parametern zu analysieren. Stoffdaten für die Lithiumbromid-Lösung und das Kaltwassergemisch werden aus der Literatur ermittelt, um die Massen- und Wärmeströme der Kreisläufe im Betrieb zu berechnen. Gleichungen aus der Literatur werden erläutert und Näherungsgleichungen aufgestellt. Eine Wärmebilanzierung wird vorgenommen und die Ergebnisse werden kritisch analysiert. Mit dem Programmiersystem LabVIEW wird ein Programm erstellt, um die gemessenen und berechneten Werte zu visualisieren.

Name of Student

Lennart Mehlaus

Title of the paper

Experimental study of a water-lithium bromide-absorption chiller and further development of the system software.

Keywords

Absorption chiller, refrigeration technology, LabVIEW, refrigeration, heat utilization

Abstract

Inside this report experimental investigations are carried out on a water-lithium bromide absorption chiller in order to analyze the operating behavior with different parameters. Material data are determined from the literature for the lithium bromide solution and the cold water mixture in order to calculate the mass and heat flows of the circuits during operation. Equations from the literature are explained and approximate equations are set up. A heat balance is carried out and the results are critically analyzed. A program is created using the LabVIEW programming system to visualize the measured and calculated values.

Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Herrn: **Lennart Mehlaus**

Matrikel-Nummer: XXXXXXXXXX

Thema: **Experimentelle Untersuchungen an einer Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskältemaschine und Weiterentwicklung der Anlagensoftware**

Schwerpunkte:

Das Bereitstellen gekühlter Räume ist sowohl in der Gebäudetechnik als auch in der Produktion und Logistik von großer Bedeutung. Um den Verbrauch der fossilen Primärenergien in diesem Bereich zu verringern, werden zunehmend Konzepte verwirklicht, in denen Sonnenenergie genutzt wird, um Räume zu kühlen. Eine Möglichkeit besteht darin, thermische Solarenergie zum Antrieb von Absorptionskälteanlagen zu nutzen. Im Zentrum für Energietechnik des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen der HAW wird eine Absorptionskälteanlage betrieben, die im Rahmen der vorliegenden Bachelorthesis überarbeitet werden soll.

Im Rahmen dieser Arbeit sind folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

- Literaturrecherche
- Konzeption, Durchführung und Auswertung von experimentellen Untersuchungen
- Literaturrecherche zu den Stoffdaten
- Berechnung der Dichte und der spezifischen Wärmekapazitäten mit Werten aus der Literatur
- Wärmebilanzierung
- Weiterentwicklung der Anlagensoftware für eine Absorptionskältemaschine mit dem grafischen Programmierungssystem LabVIEW, insbesondere
 - Visualisierung der Messdaten
 - Darstellung der Messdaten im Van't Hoff-Diagramm

Am Ende der Arbeit sind die Ergebnisse kritisch zu bewerten. Die Ergebnisse der Arbeit sind in entsprechender Schriftform darzustellen und zu dokumentieren. Der Fortgang der Arbeit ist in regelmäßigen Abständen mit den Betreuern der Arbeit zu diskutieren.

5.12.2021
Datum

XXXXXXXXXX
Prof. Dr.-Ing. Heide Frischgesell

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur und Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Abbildungsverzeichnis.....	IX
1. Einleitung.....	1
2. Stand der Technik.....	3
2.1 Absorptionskältemaschine.....	3
2.2 Arbeitsstoffpaare.....	5
2.3 LabVIEW.....	6
3. H ₂ O/LiBr-Absorptionskältemaschine Wegracel SE15.....	8
3.1 Aufbau der Anlage.....	8
3.2 Funktionsweise der Anlage.....	10
3.3 Anschlüsse an die Absorptionskältemaschine.....	10
3.4 Steuerungssoftware.....	13
3.5 Weitergehende Software mit LabVIEW.....	13
3.6 Messtechnik.....	15
4. Berechnungsgrundlagen.....	18
4.1 Bilanzierung um die Absorptionskältemaschine.....	18
4.1.1 Konzentration des Antifrogen N-Gemisches.....	18
4.1.2 Dichte des Antifrogen N-Gemisches.....	19
4.1.3 Spezifische Wärmekapazität des Antifrogen N-Gemisches.....	20
4.1.4 Wärmeströme um die Absorptionskältemaschine.....	20
4.1.5 Aufstellung der Bilanz um die Absorptionskältemaschine.....	21
4.2 Wärmeübertragung an die Umgebung.....	22
4.2.1 Wärmeübertragung durch Konvektion.....	22
4.2.2 Wärmeübertragung durch Strahlung.....	23
4.3 Wärmeübertrager.....	23
4.3.1 Konzentration der LiBr-Lösungen.....	23
4.3.2 Dichte der LiBr-Lösung.....	24
4.3.3 Spezifische Wärmekapazität der LiBr-Lösung.....	24
4.3.4 Wärmeströme im Wärmeübertrager.....	25
4.3.5 Wärmeübertragung des Wärmeübertragers an die Umgebung aus der Bilanz.....	25

4.4	Coefficient of Performance	25
5.	Experimentelle Untersuchungen.....	26
5.1	Durchführung der experimentellen Untersuchungen	26
5.2	Kriterium für einen stationären Zustand	26
5.3	Regelung des Kühlwassermassenstroms	27
5.4	Elektrische Leistung der Pumpen.....	29
5.5	Bilanzierung um die Absorptionskältemaschine.....	30
5.5.1	Konzentration des Antifrogen N-Gemisches.....	30
5.5.2	Wärmeströme um die Absorptionskältemaschine	30
5.5.3	Wärmeübertragung an die Umgebung aus der Bilanz	31
5.6	Wärmeübertragung an die Umgebung	33
5.7	Wärmeübertrager.....	37
5.7.1	Konzentrationen der LiBr-Lösung	37
5.7.2	Wärmeströme im Wärmeübertrager.....	38
5.8	Coefficient of Performance	40
6.	Weiterentwicklung der Anlagenvisualisierung	42
6.1	Implementierung der Berechnungen	42
6.1.1	Massenströme	42
6.1.2	Spezifische Wärmekapazität und übertragener Wärmestrom.....	44
6.2	Anlagenvisualisierung	44
6.3	Darstellung im Dühring-Diagramm	46
7.	Zusammenfassung und Fazit.....	48
	Anhang.....	49

Nomenklatur und Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	Fläche	m^2
a,b,c	Koeffizienten Näherungsgleichung Dichte	-
COP	Coefficient of Performance	-
c_p	spezifische Wärmekapazität	$\frac{J}{kg \cdot K}$
d	Durchmesser	m
d,e,f	Koeffizienten Näherungsgleichung spezifische Wärmekapazität	-
h	Höhe	m
I	Stromstärke	A
k	Koeffizient	-
\dot{m}	Massenstrom	$\frac{kg}{s}$
n	Anzahl der Untersuchungen	-
P	Leistung	W
p	Druck	bar
\dot{Q}	Wärmestrom	$\frac{J}{s}$
R	Bestimmtheitsmaß	-
T	Temperatur	K
U	Spannung	V
\dot{V}	Volumenstrom	$\frac{m^3}{h}$
x	Konzentration	-

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
ϑ	Temperatur	$^{\circ}C$
σ	Stefan Boltzmann Konstante	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

Indizes tiefgestellt

A	Absorber
aus	Austritt
ein	Eintritt
el	elektrisch
G	Generator
GF	Grundfläche
HeWa	Heizwasser
K	Kondensator
ka	kältemittelarme LiBr-Lösung
KaWa	Kaltwasser

kr	kältemittelreiche LiBr-Lösung
KV	Konvektion
P	Pumpe
SF	Seitenfläche
U	Umgebung
V	Verdampfer
WÜ	Wärmeübertrager

Abkürzungen

CO ₂	Kohlenstoffdioxid
HAW	Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
LiBr	Lithium-Bromid
NH ₃	Ammoniak
ZET	Zentrum für Energietechnik (Aufstellort der Absorptionskältemaschine)

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vergleich der Arbeitsstoffpaare H ₂ O/LiBr und NH ₃ /H ₂ O (in Anlehnung an [10])	6
Tabelle 2 Legende zum Hydraulikschema (in Anlehnung an [7])	9
Tabelle 3 Einstellung der Ventile des Kühlwassers	13
Tabelle 4 Dichteunterschiede der Fluide für 20 °C und 1 bar	15
Tabelle 5 Koeffizienten Dichte des Antifrogen N-Gemisches	19
Tabelle 6 Koeffizienten spezifische Wärmekapazität des Antifrogen N-Gemisches	20
Tabelle 7 Wärmeübergangskoeffizienten (in Anlehnung an [15])	23
Tabelle 8 Koeffizienten Dichte der LiBr-Lösung [4]	24
Tabelle 9 Vorgehen für die Aufnahme einer Messreihe	26
Tabelle 10 Auswirkung höherer Temperaturdifferenzen des Kühlwassers auf die Bilanz	33
Tabelle 11 Messergebnisse Oberflächentemperaturen	35
Tabelle 12 Ergebnisse des berechneten Wärmestroms an die Umgebung	36
Tabelle 13 Vergleich Referenzbedingungen zu Realbedingungen	41
Tabelle 14 Zusammenfassung der Messwerte	A-1
Tabelle 15 Zusammenfassung der Auswertung	B-2

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Tagesprofil Kühlbedarf und verfügbare Solarenergie durch Photovoltaik [11]	1
Abbildung 2 Schematischer Kreislauf der Absorptionskältemaschine (in Anlehnung an [10])	4
Abbildung 3 Dühring-Diagramm (in Anlehnung an [17])	5
Abbildung 4 Beispiel Frontpanel	7
Abbildung 5 Beispiel Blockdiagramm	7
Abbildung 6 Frontalansicht Absorptionskältemaschine Wegracel SE15	8
Abbildung 7 Hydraulikschema Absorptionskältemaschine (in Anlehnung an [7])	9
Abbildung 8 Verfahrensfießbild ohne Mess-/ Steuer- und Regelungstechnik	11
Abbildung 9 Kaltwasserbecken und Füllbehälter mit Füllstandsanzeige	12
Abbildung 10 Frontpanel ursprüngliche Version	14
Abbildung 11 Durchflussmessgerät Kaltwassereintritt	16
Abbildung 12 Aräometer in gefülltem Gefäß	17
Abbildung 13 Skala des Aräometers	17
Abbildung 14 Wärmebildkamera	17
Abbildung 15 Darstellung der Temperaturen mit der Wärmebildkamera	17
Abbildung 16 Antifrogen N Konzentration [1]	19
Abbildung 17 Bilanzgrenze um die Absorptionskältemaschine	21
Abbildung 18 Abweichung der Temperaturen zur Beurteilung eines stationären Zustands	27
Abbildung 19 Drei-Wege-Ventil	27
Abbildung 20 Einfluss der Ventilstellung auf den Massenstrom	28
Abbildung 21 Schwankungen Massenstrom des Kühlwassers	28
Abbildung 22 Neue Regelung Massenstrom des Kühlwassers	29
Abbildung 23 Wärmestrom im Verdampfer	31
Abbildung 24 Wärmestrom an die Umgebung aus der Bilanz	32
Abbildung 25 Oberflächentemperaturen des Generators	34
Abbildung 26 Oberflächentemperaturen des Absorbers	34
Abbildung 27 Oberflächentemperaturen des Verdampfers	35
Abbildung 28 Oberflächentemperaturen der Umwälzpumpe	35
Abbildung 29 Isolation der Rohrleitungen	36
Abbildung 30 Konzentrationen im Absorber und Generator	37
Abbildung 31 Wärmeströme in Abhängigkeit der Kaltwassereintrittstemperatur	38
Abbildung 32 Übertragene Wärmeströme im Wärmeübertrager	39
Abbildung 33 Coefficient of Performance	40
Abbildung 34 Blockdiagramm Massenstrom des Kaltwassers	42
Abbildung 35 Blockdiagramm Massenstrom der kältemittelreichen Lösung	43
Abbildung 36 Blockdiagramm Berechnung Wärmestrom des Kaltwassers	44
Abbildung 37 Blockdiagramm Berechnung Wärmestrom der kältemittelarmen Lösung	44
Abbildung 38 Frontpanel Übersicht mit transparenten Rohren und Rundungen	45
Abbildung 39 Frontpanel Übersicht mit Legende und farbigen Rohren	46

Abbildung 40 Dühring-Diagramm mit LabVIEW	47
Abbildung 41 Wärmestrom im Generator	B-3
Abbildung 42 Wärmestrom im Absorber und Kondensator	B-3
Abbildung 43 R&I Fließbild	C-4
Abbildung 44 Blockdiagramm Massenstrom der kältemittelarmen Lösung	D-5
Abbildung 45 Blockdiagramm Dühring-Diagramm	D-6

1. Einleitung

Der Kühlbedarf für Gebäude ist in den letzten Jahren stetig angestiegen [12]. Dieser führt zu einem höheren Energiebedarf und zu einem höheren CO₂-Ausstoß, wenn die Energie aus fossilen Rohstoffen gewonnen wird. Durch die politischen Bestrebungen, den CO₂-Ausstoß zu verringern, steigt auch das Interesse für eine effizientere und möglichst CO₂-neutrale Klimatisierung.

Eine CO₂-neutrale Klimatisierung ist möglich, wenn Sonnenenergie als Antriebsenergie genutzt wird. Kompressionskälteanlagen können mit Strom betrieben werden, der mit Photovoltaikanlagen erzeugt wird. Absorptionskälteanlagen werden mit Wärme betrieben, die mit solarthermischen Kollektoren erzeugt wird.

Der Zeitraum der verfügbaren Solarenergie korreliert mit dem Kühlbedarf, sodass Solarenergie gut geeignet ist, um Gebäude zu kühlen (Abbildung 1). Dennoch ist für den Kühlbedarf außerhalb der Zeiten, in denen die Solarenergie zur Verfügung steht, eine alternative Energiequelle wie beispielsweise eine Batterie oder eine von der Solarenergie unabhängige Fernwärmeleitung für Absorptionskälteanlagen erforderlich [12].

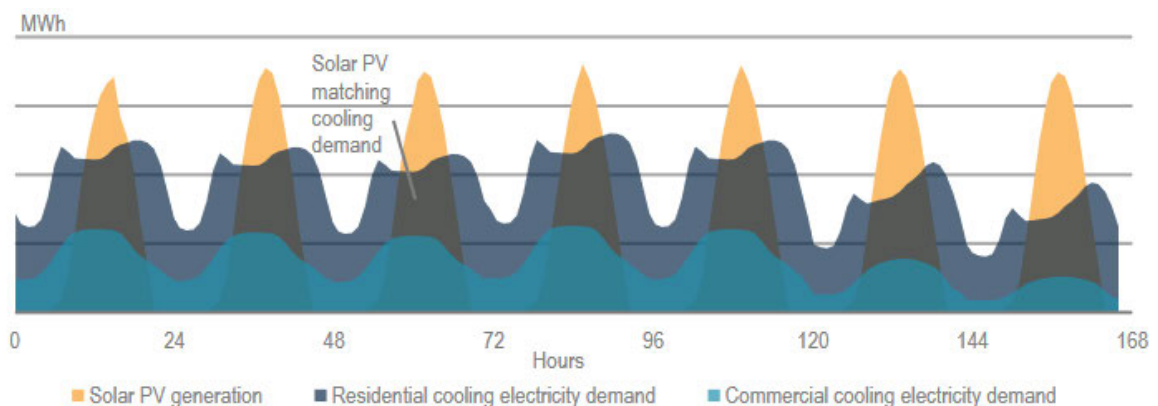


Abbildung 1 Tagesprofil Kühlbedarf und verfügbare Solarenergie durch Photovoltaik [11]

In den letzten Jahren wurden Prozesse mit einer Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) stark ausgebaut, um fossile Rohstoffe effizienter und sparsamer zu nutzen. Die Abwärme, welche während der Stromerzeugung anfällt, wird beispielsweise verwendet, um Gebäude zu beheizen. Da der Wärmebedarf in den wärmeren Sommermonaten deutlich geringer ausfällt, stellen Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Prozesse eine interessante Ergänzung dar.

Absorptionskälteanlagen, die durch die Abwärme eines KWK-Prozesses angetrieben werden, erhöhen die Energieeffizienz des Prozesses. Die erhöhte Energieeffizienz führt dazu, dass fossile Energieträger effizienter genutzt werden. Anstatt mehr Strom durch Kompressionskälteanlagen zu verbrauchen, kann aufgrund der erhöhten Nachfrage nach Wärme mehr Strom effizient erzeugt werden. Der erhöhte Wärmebedarf der Absorptionskälteanlagen führt entsprechend zu einer Effizienzsteigerung in der Gesamtenergieversorgung [2].

Im Zentrum für Energietechnik (ZET) des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW) wird eine Absorptionskälteanlage betrieben. Die Anlage soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit überarbeitet werden. Es sollen Stoffdaten und Näherungsgleichungen recherchiert und in ein Programm implementiert werden, um die berechneten Daten zu visualisieren. Experimentelle Untersuchungen sollen durchgeführt und eine Wärmebilanz aufgestellt werden. Die vorliegenden Bedingungen sollen mit den vom Hersteller angegebenen Umgebungsbedingungen verglichen werden. Anschließend sollen die Daten mithilfe des Programms visualisiert werden. Durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit soll der Grundstein gelegt werden, um Laborversuche an der Anlage durchführen zu können.

2. Stand der Technik

Im folgenden Kapitel wird auf den aktuellen Stand der Technik zu Absorptionskältemaschinen und die in den Absorptionskältemaschinen verwendeten Arbeitsstoffpaare eingegangen. Das für die Anlagenvisualisierung verwendete Programmiersystem LabVIEW wird erläutert.

2.1 Absorptionskältemaschine

Eine Absorptionskältemaschine wird verwendet, um einem Kühlraum oder Fluid Wärme zu entziehen. Durch die Absorptionskältemaschine wird die entnommene Wärme an die Umgebung abgegeben. Zu den häufigsten Einsatzgebieten von Absorptionskälteanlagen gehören Klimaanlage, beispielsweise für Büro-, Kauf- oder Krankenhäuser, die Wasserkühlung für die chemische Industrie sowie Fernkältezentralen [3].

Die Wärme wird dem Fluid durch einen Phasenwechsel von der flüssigen zu der gasförmigen Phase des Kältemittels im Verdampfer unter niedrigem Druck entnommen. Das durch den Verdampfer fließende Fluid wird durch die für den Verdampfungsvorgang benötigte Verdampfungsenthalpie abgekühlt.

Das gasförmige Kältemittel wird durch ein Sorptionsmittel im Absorber aufgenommen, da diese Anziehungskräfte aufeinander ausüben. Durch die Anziehungskräfte kondensiert das Kältemittel am Sorptionsmittel und wird von diesem gebunden. Dieser Vorgang wird als Absorptionsvorgang bezeichnet.

Der Absorptionsvorgang ist ein wesentlicher Unterschied zu Verdichter-Kältemaschinen, die einen Verdichter verwenden. Dem Verdichter wird mechanische Energie zugeführt, wodurch das verdampfte Kältemittel abgesaugt und eine Druckerhöhung erreicht wird [19].

Die Absorptionskältemaschine kann in zwei Kreisläufe unterteilt werden [3]:

1. Kältemittelkreislauf, dieser verläuft zwischen Generator, Kondensator, Verdampfer und Absorber.
2. Lösungsmittelkreislauf, dieser verläuft zwischen Absorber und Generator.

Durch die kontinuierliche Aufnahme des verdampften Kältemittels im Absorber kann der Verdampfungsvorgang im Verdampfer fortgeführt werden. Während der Absorption entsteht Wärme, welche abgeführt werden muss. Da das Sorptionsmittel nur eine begrenzte Menge an Kältemittel aufnehmen kann, muss dieses in einem weiteren Prozess stofflich regeneriert werden. Die Regeneration des Kältemittels erfolgt im Generator. Durch die Zufuhr thermischer Antriebsenergie findet im Generator eine Desorption statt. Das Kältemittel wird während des Desorptionsvorgangs vom Sorptionsmittel durch einen Siedevorgang stofflich getrennt. Das abgetrennte, gasförmige Kältemittel kondensiert anschließend durch eine Abfuhr von Wärme im Kondensator.

In Abbildung 2 ist der Vorgang einer Absorptionskältemaschine schematisch dargestellt. Durch eine Pumpe wird die kältemittelreiche Lösung aus dem Absorber in den Generator gepumpt (1→2). Die Lösung wird durch den Wärmeübertrager vorgewärmt (2→3). Für den Kälteprozess

ist der Wärmeübertrager nicht notwendig, allerdings sind aus Einsparungsgründen alle bekannten kontinuierlichen Absorptionskältemaschinen mit Wärmeübertragern ausgestattet [19]. Im Generator wird durch die zugeführte Energie des Heizwassers das Kältemittel aus der Lösung verdampft (3→7). Die kältemittelarme und aufgewärmte Lösung (4) gibt einen Teil der thermischen Energie im Platten-Wärmeübertrager ab (4→5). Während das Expansionsventil geöffnet ist, wird die Lösung durch den Druckunterschied in den Absorber gesogen (5→6) und kann dort wieder Kältemittel aufnehmen, bevor die dann kältemittelreiche Lösung wieder zurück in den Generator gepumpt wird.

Das dampfförmige Kältemittel aus dem Generator (7) wird im Kondensator abgekühlt und kondensiert. Durch den Druckunterschied wird das flüssige Kältemittel (8), während das Expansionsventil geöffnet ist, in den Verdampfer gesogen (8→9). Dort verdampft das Kältemittel (9→10) aufgrund des geringen Drucks und der Wärmezufuhr durch das Kaltwasser. Durch die Anziehungskräfte der Lösung wird das gasförmige Kältemittel im Absorber aufgenommen.

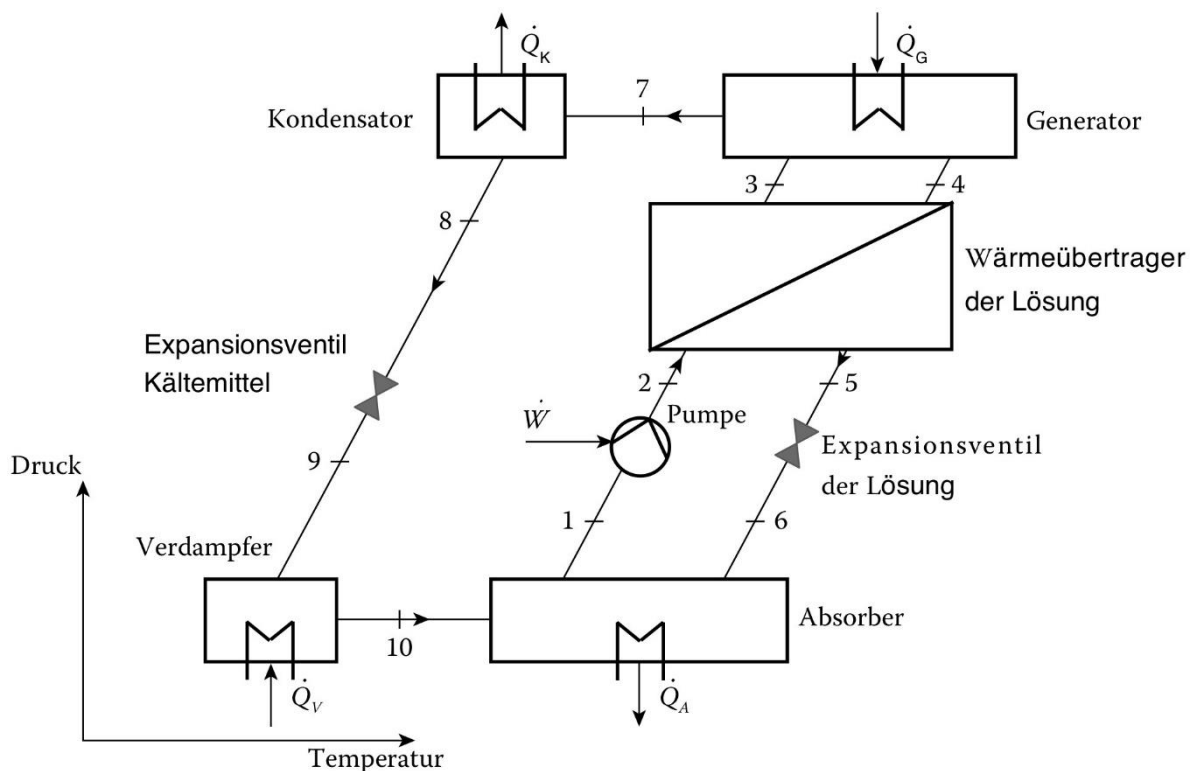


Abbildung 2 Schematischer Kreislauf der Absorptionskältemaschine (in Anlehnung an [10])

In der Literatur werden die Daten einer Absorptionskältemaschine häufig im Dühring-Diagramm dargestellt. Wird der Druck auf der Ordinate logarithmisch zu der Temperatur aufgetragen, so ergeben sich für jeweils konstante Massenanteile der LiBr-Lösung annähernd lineare Verläufe. Ein Dühring-Diagramm mit einem eingetragenen Betriebspunkt ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Nummern sind analog zu Abbildung 2 beschriftet.

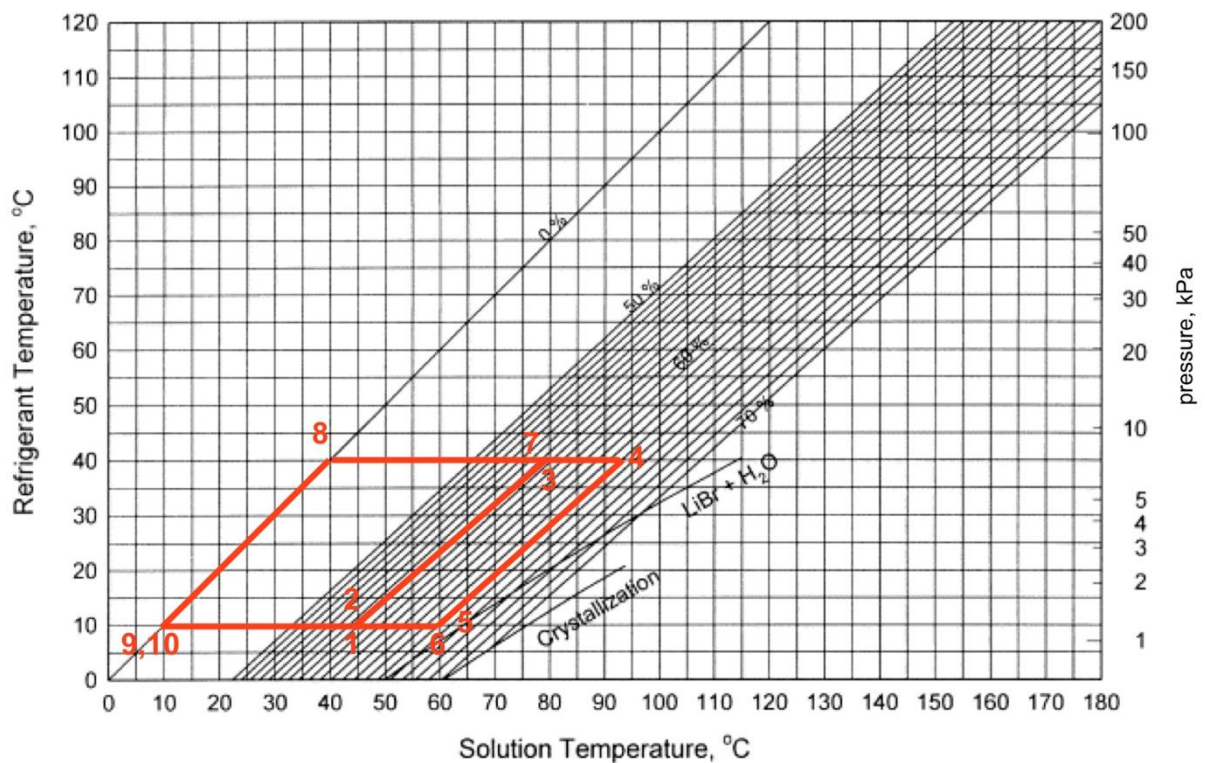


Abbildung 3 Dühring-Diagramm (in Anlehnung an [17])

Das Dühring-Diagramm wird verwendet, um die Konzentrationen, Drücke und Temperaturen übersichtlich grafisch darzustellen. Absorptionskältemaschinen können mit dem Dühring-Diagramm ausgelegt und berechnete Werte validiert werden [10].

Das Van't Hoff-Diagramm wird selten in der Literatur verwendet, um die Daten darzustellen. Aus diesem Grund wurden die Messwerte entgegen der Aufgabenstellung im Dühring-Diagramm statt im Van't Hoff-Diagramm dargestellt.

2.2 Arbeitsstoffpaare

In den gängigen Absorptionskältemaschinen werden zwei unterschiedliche Zweistoffgemische (Arbeitsstoffpaare) verwendet. Diese bestehen aus Kälte- und Absorptionsmittel [19]:

- Ammoniak-Wasser ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$)
- Wasser und wässrige Lithiumbromidlösung ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$)

An der vorhandenen Anlage wird das Arbeitsstoffpaar Wasser und wässrige Lithiumbromidlösung verwendet.

In Tabelle 1 ist ein Vergleich der Arbeitsstoffpaare dargestellt. Es wird jeweils zunächst das Kältemittel und dann das Absorptionsmittel genannt.

Tabelle 1 Vergleich der Arbeitsstoffpaare $H_2O/LiBr$ und NH_3/H_2O (in Anlehnung an [10])

Eigenschaft	NH_3/H_2O	$H_2O/LiBr$
Kältemittel		
Hohe latente Wärme	Gut	Sehr gut
Moderater Dampfdruck	Zu hoch	Zu niedrig
Niedrige Gefriertemperatur	Sehr gut	Limitierter Anwendungsbereich
Geringe Viskosität	Gut	Gut
Absorptionsmittel		
Niedriger Dampfdruck	Schlecht	Sehr gut
Niedrige Viskosität	Gut	Gut
Mischung		
Keine feste Phase	Sehr gut	Limitierter Anwendungsbereich
Geringe Toxizität	Schlecht	Gut
Hohe Affinität zwischen Kältemittel und Absorptionsmittel	Gut	Gut

Neben zahlreichen Vorteilen weisen beide Arbeitsstoffpaare auch einige Nachteile auf. Insbesondere erwähnenswert ist der Ausschluss des Arbeitsstoffpaares $H_2O/LiBr$ für Temperaturen unterhalb der Gefriertemperatur von $0\text{ }^\circ\text{C}$. Liegt der angestrebte Temperaturbereich über der Gefriertemperatur, so überwiegen häufig die Vorteile des Arbeitsstoffpaares $H_2O/LiBr$. Da die Siedepunkte von Kältemittel und Absorptionsmittel weit voneinander entfernt liegen und $LiBr$ nicht flüchtig ist, wird keine Retifikationseinheit benötigt. Für das Arbeitsstoffpaar NH_3/H_2O ist eine Retifikation erforderlich, um das gasförmig gewordene Wasser aus dem Ammoniakdampf zu trennen. Ohne Retifikation würde der Verdampfungsdruck sinken und die abgegebene Kälteleistung verringert werden [13]. Wasser kann wegen seines Preises, seiner Umweltverträglichkeit und seiner Sicherheit als ideales Mittel angesehen werden [3]. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass beide Arbeitsstoffpaare gut für die Anwendung in Absorptionskältemaschinen geeignet sind und insbesondere der benötigte Kältetemperaturbereich für die Wahl des Arbeitsstoffpaares beachtet werden muss.

2.3 LabVIEW

LabVIEW ist eine Entwicklungsumgebung und zeitgleich eine grafische Programmiersprache des Unternehmens National Instruments [9]. Die Abkürzung steht für „Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench“. Im Vergleich gängiger Programmiersprachen, die zeilenweise das Programm niederschreiben, werden in LabVIEW Funktionsblöcke in einem Blockdiagramm auf dem Bildschirm dargestellt [9].

Während sich im Blockdiagramm der Programmcode befindet, können die Eingabe- und Ausgabewerte im Frontpanel dargestellt werden. Dies führt zu einer guten Übersicht für den Bediener einer Anlage, welcher in der Regel lediglich die dargestellten Werte benötigt.

Das folgende Beispiel soll den Unterschied zwischen Frontpanel und Blockdiagramm verdeutlichen.

Im Frontpanel werden nur der Eingabe- und der Ausgabewert angezeigt, um eine Temperatur von der Einheit °C in K nach der Formel [2.1] umzurechnen (Abbildung 4).

$$T(\vartheta) = \vartheta + 273,15 \quad [2.1]$$

Der Buchstabe T stellt die Temperatur in der Einheit Kelvin und das ϑ die Temperatur in der Einheit °C dar.

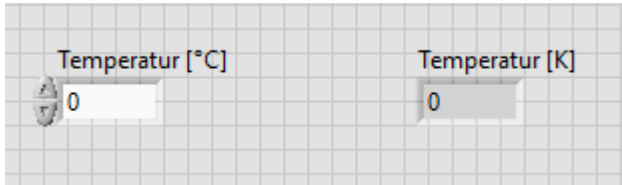


Abbildung 4 Beispiel Frontpanel

Der Ausgabewert wird im Blockdiagramm aus dem Eingabewert durch die Konstante 273,15 sowie den Funktionsblock „+“ berechnet (Abbildung 5).

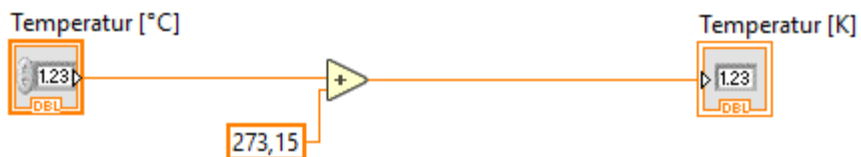


Abbildung 5 Beispiel Blockdiagramm

Zusätzlich zu diesem erstellten VI können im Frontpanel die Ein- und Ausgänge mit anderen VI verbunden werden. Das integrierte VI wird in diesem Fall zu einem Sub-VI.

Sind die Eingabewerte mit den Daten von Messgeräten verbunden, so können die Eingabewerte automatisiert von der Messstelle übertragen, Ausgabewerte berechnet und die Ergebnisse im Frontpanel angezeigt werden.

3. H₂O/LiBr-Absorptionskältemaschine Wegracel SE15

Im folgenden Kapitel wird die vorhandene Absorptionskältemaschine im ZET an der HAW Hamburg vorgestellt. Der Aufbau sowie die Funktionsweise der vorhandenen Absorptionskältemaschine werden erläutert und die verwendete Messtechnik sowie die Software vorgestellt.

3.1 Aufbau der Anlage

Die vorhandene H₂O/LiBr-Absorptionskältemaschine des Unternehmens EAW Westenfeld mit der Typenbezeichnung „Wegracel SE15“ weist eine Nennkälteleistung von 15 kW auf. Die Anlage besteht aus zwei Behältern, die nebeneinander angeordnet sind. In Abbildung 6 ist die Frontalansicht der Anlage dargestellt.

Im linken Behälter befinden sich in der oberen Hälfte der Verdampfer und in der unteren Hälfte der Absorber. Der rechte Behälter umfasst unten den Generator und oben den Kondensator.



Abbildung 6 Frontalansicht Absorptionskältemaschine Wegracel SE15

In Abbildung 7 ist die vorhandene Anlage schematisch dargestellt. Die zugehörige Legende ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

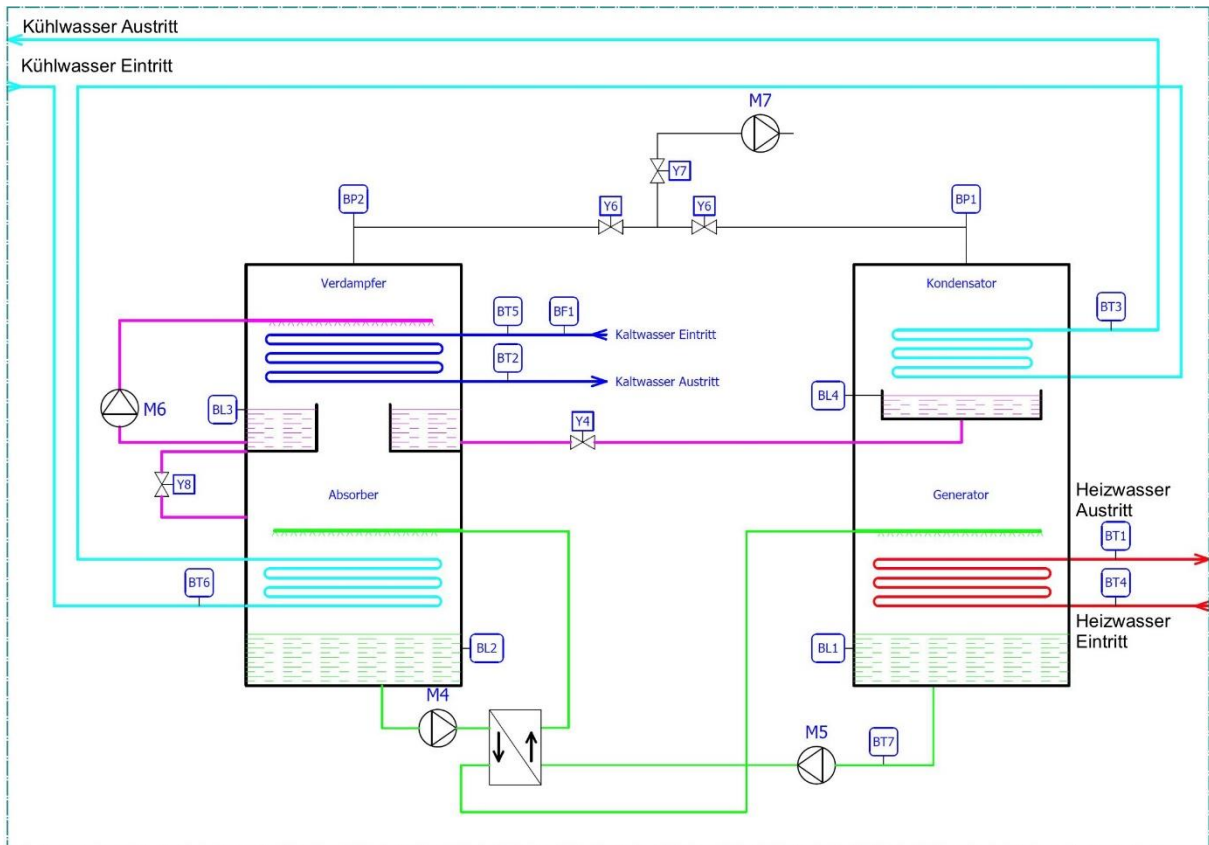


Abbildung 7 Hydraulikschema Absorptionskältemaschine (in Anlehnung an [7])

Tabelle 2 Legende zum Hydraulikschema (in Anlehnung an [7])

Abkürzung	Bedeutung	Abkürzung	Bedeutung
M4	Lösungsmittelpumpe 1	Y4	Überlaufventil
M5	Lösungsmittelpumpe 2	Y5	Evakuierungsventil 1
M6	Kältemittelpumpe	Y6	Evakuierungsventil 2
M7	Vakuumpumpe	Y7	Notverschlussventil
		Y8	Notablassventil
BL1	Füllstand Generator	BT1	Temperatur Heizwasser Eintritt
BL2	Füllstand Absorber	BT2	Temperatur Kaltwasser Austritt
BL3	Füllstand Verdampfer	BT3	Temperatur Kühlwasser Austritt
BL4	Füllstand Kondensator	BT4	Temperatur Heizwasser Austritt
BF1	Strömungswächter	BT5	Temperatur Kaltwasser Eintritt
BP1	Drucksensor Verdampfer/Absorber	BT6	Temperatur Kühlwasser Eintritt
BP2	Drucksensor Kondensator/Generator	BT7	Temperatur Lösungsmittel

3.2 Funktionsweise der Anlage

Im folgenden Kapitel wird die Funktionsweise der vorhandenen Anlage beschrieben. Die Reihenfolge erfolgt analog zu Kapitel 2 und beginnt mit dem Kreislauf der LiBr-Lösung im Absorber.

Die kältemittelreiche LiBr-Lösung sammelt sich am Boden des Absorbers an und wird durch die Pumpe M4 aus dem Behälter in den Generator gepumpt.

Im Generator wird dem System die Antriebsleistung durch Heizwasser in einem Rohrbündel-Wärmeübertrager zugeführt. Die kältemittelreiche Lösung wird über den Rohrbündel-Wärmeübertrager versprüht und ein Teil des in der Lösung enthaltenen Wassers verdampft. Dadurch sammelt sich eine kältemittelarme Lösung am Boden des Generators an und wird über die Pumpe M5 zurück zum Absorber geführt. Um die Effizienz zu steigern, werden die Leitungen der kältemittelreichen und kältemittelarmen Lösung durch einen Platten-Wärmeübertrager geführt. Der Kreislauf des Lösungsmittels ist damit geschlossen.

Der Wasserdampf gelangt aus dem Generator in den Kondensator und kondensiert durch das durch den Rohrbündel-Wärmeübertrager durchfließende Kühlwasser. Das Ventil Y4 wird automatisiert geöffnet, sobald sich genug flüssiges Wasser im Kondensator befindet. Aufgrund des Druckunterschieds wird das Wasser durch die Rohrleitung in den Verdampfer gesogen. Das Wasser wird aus einem Auffangbehälter innerhalb des Verdampfers durch die Pumpe M6 über einen Rohrbündel-Wärmeübertrager gesprüht. Durch den Rohrbündel-Wärmeübertrager fließt das zu kühlende Kaltwasser, welchem Wärme für den Verdampfungsvorgang entzogen wird. Das gasförmig gewordene Kältemittel kann neben dem Auffangbehälter in den Absorber strömen und wird durch die hygroskopische LiBr-Lösung im Absorber aufgenommen. Die während der Absorption frei werdende Wärme wird durch das Kühlwasser in einem weiteren Rohrbündel-Wärmeübertrager abtransportiert. Dadurch ist auch der Kältemittelkreislauf geschlossen.

Durch die Vakuumpumpe M7 werden die Behälter evakuiert.

3.3 Anschlüsse an die Absorptionskältemaschine

Die Absorptionskältemaschine besitzt Anschlüsse für das Kalt-, Heiz- sowie das Kühlwasser. Die Kreisläufe dieser Fluide werden in diesem Kapitel vorgestellt.

Für ein besseres Verständnis der angeordneten Ventile ist in Abbildung 8 ein im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstelltes Fließbild ohne Mess-/ Steuer- und Regelungstechnik abgebildet.

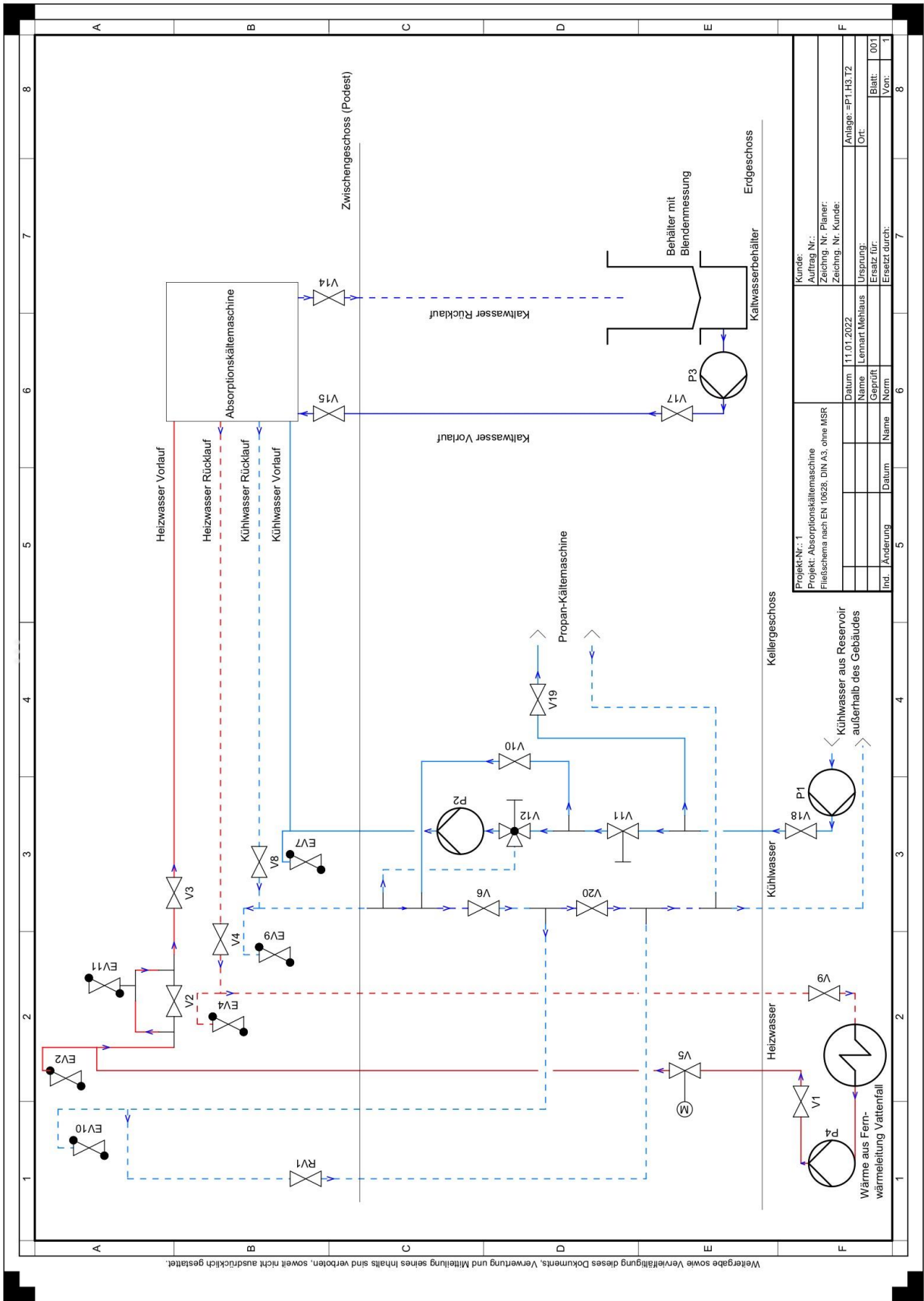


Abbildung 8 Verfahrenfließbild ohne Mess-/ Steuer- und Regelungstechnik

Das Kaltwasser wird durch eine Pumpe in den Verdampfer befördert. Das Gemisch aus Antifrogen N und Wasser befindet sich in einem Kaltwasserbecken mit einer Füllmenge von circa 300 l im Erdgeschoss des ZET. Der Zusatz Antifrogen N wird verwendet, um den Kreislauf vor Frost, Korrosion und Ablagerungen zu schützen [5]. Im Kaltwasserbecken befindet sich eine Heizung mit einer Heizleistung von bis zu 12 kW. Die Kaltwasserbeheizung kann abgestuft in Schritten von 1 kW verändert werden. Durch diese manuelle Regelung kann der Kälteverbrauch simuliert werden.

Unabhängig von der Möglichkeit, einen variablen Kälteverbrauch zu simulieren, ist die Heizung unerlässlich, da die Absorptionskältemaschine eine minimale Kaltwassertemperatur von 6 °C nicht unterschreiten sollte. Die Anlagensoftware schaltet unterhalb dieser Temperatur in den Modus „Störung“, um Frostschäden vorzubeugen.

Der Volumenstrom des Kaltwassers kann durch das Ventil V17 (Abbildung 8) manuell angepasst werden. Die Füllstandsanzeige des über dem Kaltwasserbecken liegenden Behälters, der mit einer nicht genormten Blende ausgestattet ist, kann verwendet werden, um wiederholbare Ergebnisse erreichen zu können. Der Füllbehälter und das Kaltwasserbecken sind in Abbildung 9 dargestellt.



Abbildung 9 Kaltwasserbecken und Füllbehälter mit Füllstandsanzeige

Der Heizwasserkreislauf wird durch eine Fernwärmeleitung gespeist. Auf die Eintrittstemperatur des Heizwassers kann kein Einfluss genommen werden. Das Heizwasser fließt dementsprechend mit annähernd konstanter Temperatur in die Absorptionskältemaschine.

Dadurch können an der Anlage keine schwankenden Temperaturen des Heizwassereintritts simuliert werden. Dies wäre beispielsweise sinnvoll, um das Verhalten der Absorptionskältemaschine zu untersuchen, wenn diese mit thermischer Solarenergie gespeist wird. Insbesondere Verschattungen sorgen in einer thermischen Solaranlage für schwankende Heizwassertemperaturen.

Die Abwärme der Anlage wird an das Kühlwassersystem vom ZET abgegeben. Das Kühlwasser fließt aus einem Wasserreservoir außerhalb des ZET in die Absorptionskältemaschine. Durch manuell zu verstellende Ventile kann eine Mischung mit dem bereits durchgeflossenen und gewärmten Kühlwasser eingestellt werden. Ein Teil des Kühlwassers wird durch einen Bypass gelenkt, wenn das Ventil V20 geschlossen ist. Aufgrund des zu überwindenden Höhenunterschieds fließt das Kühlwasser während eines geschlossenen Ventils V20 überwiegend durch das Drei-Wege-Ventil V12 zurück in die Absorptionskältemaschine.

In Tabelle 3 sind die Einstellungen der Ventile während des Betriebs der Absorptionskältemaschine dargestellt. Um die Temperatur des Kühlwassereintritts anzupassen, wird die Stellung des Ventils V20 verändert. Zusätzlich kann das Ventil V12 eingestellt werden, um stärkere Änderungen des Kühlwassermassenstroms vorzunehmen.

Tabelle 3 Einstellung der Ventile des Kühlwassers

Ventil	Einstellung
V6	Geöffnet
V10	Geschlossen
V11	Geöffnet
V12	Stellung 4-7
V20	Nach Bedarf

3.4 Steuerungssoftware

Die Anlage ist bereits mit einer Software vom Hersteller ausgestattet, die einen automatisierten Betrieb zulässt. Über ein Panel wird die Anlage bedient.

Neben der Mess-/ Steuer- und Regelungstechnik im abgebildeten Schema der Anlage aus Abbildung 7 hat die Anlage Zugriff auf die Ventile V5 (Heizwasser) und V15 (Kaltwasser) sowie die Pumpen P4 (Heizwasser) und P2 (Kühlwasser) und dementsprechend auf alle Kreisläufe. Ein im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstelltes R&I Fließbild befindet sich im Anhang. Die Pumpen P1 und P3 werden manuell gestartet und sind nicht geregelt.

3.5 Weitergehende Software mit LabVIEW

Zusätzlich zu der Anlagensoftware des Herstellers sind weitere Messstellen an der Anlage vorhanden. Die Messdaten der zusätzlichen Messstellen werden an das Visualisierungsprogramm, welches auf einem Computer neben der Anlage installiert ist, weitergegeben. Über das Programm können die Messdaten konvertiert und gespeichert werden. Von den

Messwerten abgeleitete Werte können durch das Programm berechnet und Daten visualisiert werden.

Das zu Beginn dieser Arbeit vorhandene Frontpanel der Absorptionskältemaschine ist in Abbildung 10 dargestellt. Aufgrund der niedrigen Auflösung der Grafik aus den Unterlagen des Herstellers wird mit der Grafik der vorhandene Platz am Bildschirm nicht vollständig ausgenutzt. Die neue im Rahmen dieser Arbeit zu erstellende Grafik sollte an die Abmessungen des Bildschirms angepasst sein. Neben der geringen Auflösung gibt es einige weitere Nachteile der verwendeten Grafik. So wurden beispielsweise die realen Platzierungen der angeschlossenen Pumpen vernachlässigt, welche sich unterhalb der Behälter befinden. Die kältemittelarme LiBr-Lösung aus dem Generator ist fälschlicherweise als reines LiBr beschriftet. Auch die Rohrleitungen sind nicht korrekt angeordnet, da sich der Kaltwasser- sowie der Kühlwasserausgang beide an der Oberseite der Behälter befinden und das Kühlwasser vom Absorber direkt über eine Rohrleitung an den Kondensator gelangt. Diese vernachlässigten Aspekte werden in Kapitel 6.2 in eine im Rahmen dieser Arbeit erstellte neue Grafik eingearbeitet.

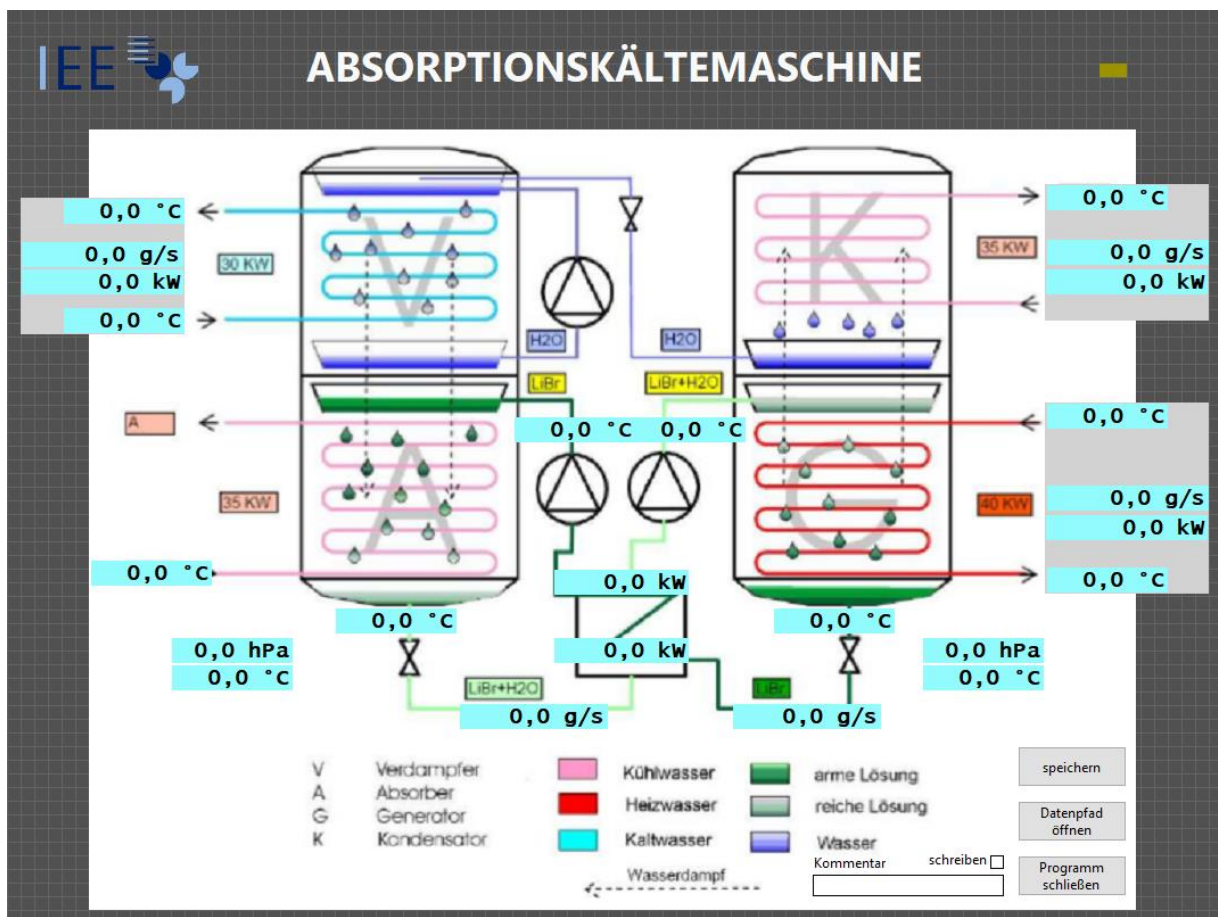


Abbildung 10 Frontpanel ursprüngliche Version

Für alle Massenströme wurde ursprünglich die konstante Dichte von Wasser verwendet, um den Volumenstrom in einen Massenstrom umzurechnen.

In Tabelle 4 sind berechnete Dichten für eine Temperatur von 20 °C und einen Druck von 1 bar dargestellt. Die Dichte der LiBr-Lösung weicht abhängig von der Konzentration deutlich von der Dichte von Wasser ab. Für eine LiBr-Lösung von 60 % wird beispielsweise eine

Abweichung zu der Dichte von Wasser von 73 % erreicht. Auch die Dichte des Antifrogen N-Gemisches weicht 7 % von der Dichte von Wasser ab. Die unterschiedliche Dichte der Fluide muss entsprechend abhängig von der Konzentration berücksichtigt werden, um aus dem gemessenen Volumenstrom einen Massenstrom zu berechnen.

Tabelle 4 Dichteunterschiede der Fluide für 20 °C und 1 bar

Dichte	Dichte [kg/m ³]	Abweichung zu reinem Wasser [%]
Wasser	997	0
50 % Antifrogen N-Gemisch	1065	7
60 % LiBr-Lösung	1720	73
50 % LiBr-Lösung	1536	54

3.6 Messtechnik

Dem erstellten R&I-Fließbild im Anhang können die Einbaustellen der Messtechnik an der Anlage entnommen werden. Die Massenströme werden benötigt, um die Wärmeströme zu berechnen. Hierfür befinden sich zusätzlich fünf Durchflussmessgeräte an der Anlage. Die Dichte des Antifrogen N/Wasser-Gemisches wird an einem Aräometer abgelesen. Durch die Messsensoren für die Temperatur an den Ein- und Ausgängen wird die Temperaturdifferenz bestimmt. Der Druck wird an der Oberseite von beiden Behältern gemessen. Im folgenden Unterkapitel wird die eingesetzte Messtechnik aufgeführt. Zusätzlich werden Gründe aufgeführt, die Konzentration der LiBr-Lösung nicht messtechnisch zu bestimmen.

Volumenstrom

Es werden magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte des Unternehmens Krohne verwendet, um die Volumenströme zu berechnen. Die Messgeräte können nach dem Faraday'schen Induktionsgesetz als primäre Messgröße die Durchflussgeschwindigkeit ermitteln und daraus als sekundäre Messgröße den Volumenstrom berechnen. Das Unternehmen gibt eine Abweichung von maximal 0,4 % des Messwerts an, verweist jedoch zusätzlich auf die Einbaubedingungen [14]. Die für die Abweichung angegebene Referenzbedingung des Herstellers für die Einlaufstrecke umfasst den fünffachen Nenndurchmesser der Rohrleitung. Für die Auslaufstrecke ist der zweifache Nenndurchmesser angegeben. Dies entspricht an der Anlage mit dem vorhandenen Nenndurchmesser von DN25 einer Einlaufstrecke von 125 mm und einer Auslaufstrecke von 50 mm. Diese Bedingungen werden an der Anlage eingehalten. In Abbildung 11 ist exemplarisch das Durchflussmessgerät des Kaltwassereintritts mit einer ausreichend großen Einlauf- und Auslaufstrecke abgebildet.



Abbildung 11 Durchflussmessgerät Kaltwassereintritt

Temperatur

An der Anlage sind Platinsensoren (Pt1000) eingebaut, um die Temperaturen zu messen. Der Hersteller S+S Regeltechnik gibt eine Genauigkeit für die eingebauten Sensoren von $\pm 0,3 K$ an [20].

Druck

Der Druck der Behälter wird durch Drucktransducer mit einer kapazitiven Messzelle und einer keramischen Prozessmembrane bestimmt. Der Hersteller Endress und Hauser gibt eine Referenzgenauigkeit von 0,5 % an [8].

Konzentration

Die Konzentration der Wasser/LiBr-Lösung wäre aufwendig zu messen, da die Anlage außer Betrieb genommen werden müsste. Es könnte über die Ventile am Boden der Behälter eine ausreichende Menge der Lösung abgepumpt und anschließend analysiert werden. Allerdings wäre es in diesem Fall notwendig, die Behälter zu evakuieren. Darüber hinaus ist es im Laborbetrieb nicht möglich, die Lösung in kurzer Zeit wieder in die Behälter zu füllen, da dies nur vom Servicepersonal während der Inbetriebnahme durch den Hersteller EAW durchgeführt werden sollte [6]. Dementsprechend wird die Konzentration nicht gemessen und muss aus vorhandenen Messdaten berechnet werden.

Die Konzentration der Antifrogen N/Wasser-Mischung wird über ein Diagramm grafisch aus der Dichte bestimmt.

Dichte

Die Dichte der Antifrogen N/Wasser-Mischung wird durch ein Aräometer bestimmt. Der Hersteller des vorliegenden Aräometers in Abbildung 12 ist das Unternehmen Brand. Zur manuellen Messung wird durch ein Ventil am Kaltwasserbehälter eine ausreichend große Menge des zu bestimmenden Gemisches in einen Messbehälter gefüllt und am Aräometer die Dichte an der Skala abgelesen (Abbildung 13).



Abbildung 12 Aräometer in gefülltem Gefäß



Abbildung 13 Skala des Aräometers

Wärmebildkamera

Durch die Wärmebildkamera des Unternehmens Flir können die Oberflächentemperaturen durch Infrarotstrahlung gemessen und dargestellt werden (Abbildung 14). In Abbildung 15 ist beispielhaft die Oberfläche eines Behälters der Absorptionskältemaschine dargestellt. Die Temperatur in der Mitte wird oben links angezeigt. Die Legende der auftretenden Temperaturen befindet sich auf der rechten Seite. Am oberen Ende der Legende wird die maximale Temperatur und am unteren Ende der Legende die niedrigste Temperatur angezeigt.



Abbildung 14 Wärmebildkamera



Abbildung 15 Darstellung der Temperaturen mit der Wärmebildkamera

4. Berechnungsgrundlagen

Im folgenden Kapitel werden die Berechnungsgrundlagen aufgeführt, um die experimentellen Untersuchungen auswerten zu können. Eine Bilanz um die Absorptionskältemaschine wird aufgestellt. Gleichungen für die Bilanz und den Coefficient of Performance werden eingeführt. Es musste berücksichtigt werden, dass die Formeln und Näherungsgleichungen gut geeignet sind, um diese in die verwendete Software zu integrieren. Wird die Einheit nicht explizit angegeben, so gilt die im Nomenklatur-Verzeichnis angegebene Einheit.

4.1 Bilanzierung um die Absorptionskältemaschine

Im folgenden Kapitel wird die Berechnungsgrundlage erstellt, um eine Bilanz um die Absorptionskältemaschine aufzustellen. Aus der Bilanz kann der an die Umgebung abgegebene Wärmestrom berechnet werden. Um eine Bilanz um die Absorptionskältemaschine aufzustellen, werden Stoffdaten für das Antifrogen N-Gemisch benötigt. Die Dichte wird verwendet, um die gemessenen Volumen- in Massenströme umzurechnen. Durch die Konzentration des Gemisches kann mit Näherungsgleichungen die spezifische Wärmekapazität berechnet werden. Mit der spezifischen Wärmekapazität der Fluide können zusammen mit den gemessenen Temperaturdifferenzen und den Massenströmen die Wärmeströme aufgestellt und eine Bilanz um die Absorptionskältemaschine erstellt werden.

4.1.1 Konzentration des Antifrogen N-Gemisches

Die Konzentration der Antifrogen N/Wasser-Mischung wird aus der einmalig gemessenen Dichte bestimmt. Für den Fall, dass sich die Zusammensetzung des Gemisches signifikant ändert, beispielsweise nach einer manuellen Zugabe von Wasser, muss die Dichte erneut gemessen werden.

Die Konzentration wird über das Diagramm in Abbildung 16 aus der gemessenen Dichte und Temperatur abgelesen.

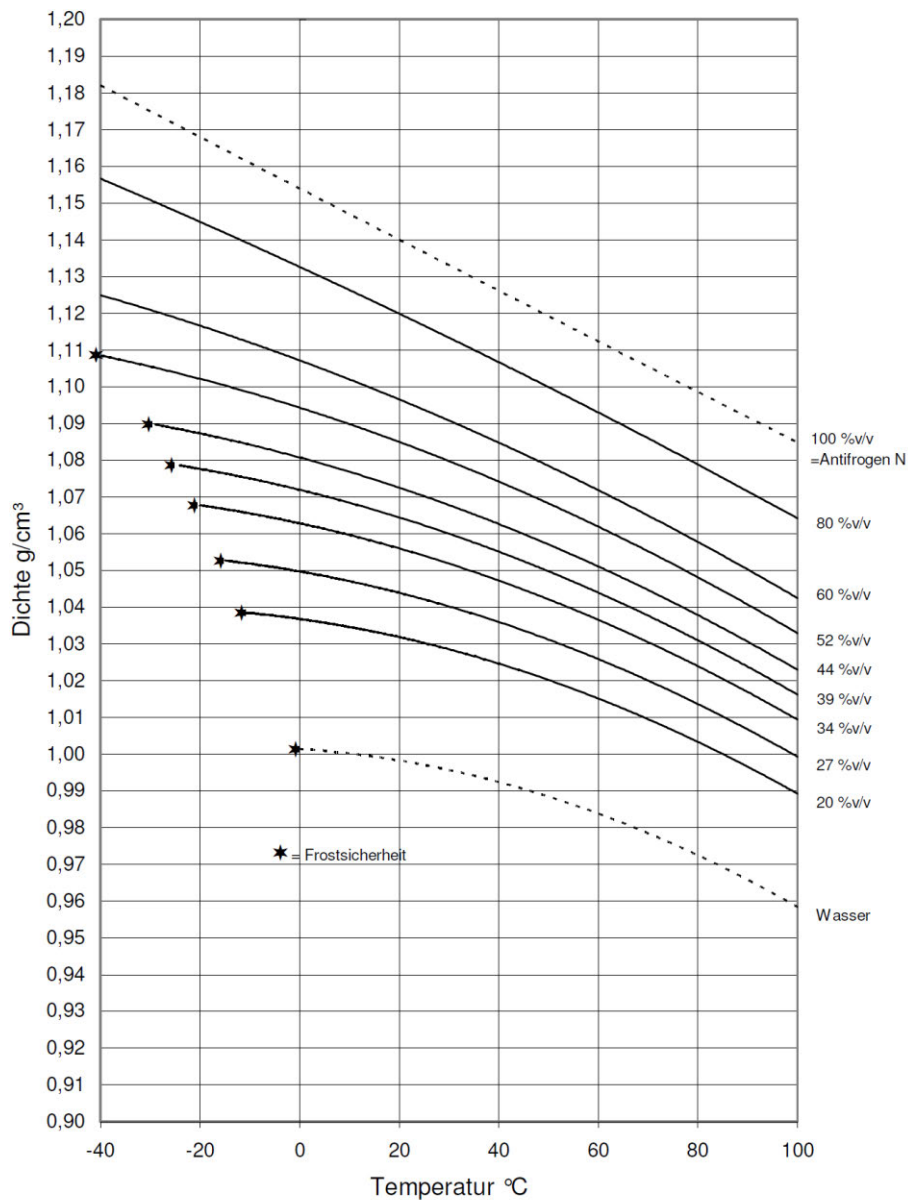


Abbildung 16 Antifrogen N Konzentration [1]

4.1.2 Dichte des Antifrogen N-Gemisches

Für die Dichte des Antifrogen N-Gemisches wurden Stoffdaten aus dem Berechnungsprogramm eines Herstellers entnommen [5]. Aus dem Temperaturbereich zwischen 0 °C und 35 °C wurde eine multiple lineare Regression aufgestellt:

$$\rho(x, \vartheta) = a + b \cdot x + c \cdot \vartheta \quad [4.1]$$

Durch diese kann die Dichte des Antifrogen N-Gemisches in der Einheit $\frac{g}{cm^3}$ mit ausreichender Genauigkeit ($R^2=0,9982$) in Abhängigkeit der Konzentration und Temperatur berechnet werden. Die Koeffizienten sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5 Koeffizienten Dichte des Antifrogen N-Gemisches

a	b	c
1,011	0,1288	-0,0005241

4.1.3 Spezifische Wärmekapazität des Antifrogen N-Gemisches

Die spezifische Wärmekapazität in der Einheit $\frac{kJ}{kg \cdot K}$ des Antifrogen N-Gemisches wird durch eine aufgestellte Regression mit den Daten eines Herstellers berechnet [5].

Die multiple lineare Regression weist für den gewählten Temperaturbereich von 0 °C bis 35 °C eine ausreichende Genauigkeit ($R^2=0,9986$) auf:

$$c_p(x, \vartheta) = d + e \cdot x + f \cdot \vartheta \quad [4.2]$$

Die Koeffizienten sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6 Koeffizienten spezifische Wärmekapazität des Antifrogen N-Gemisches

d	e	f
4,267	-1,976	0,002428

4.1.4 Wärmeströme um die Absorptionskältemaschine

An der Anlage können die Wärmeströme \dot{Q} aufgestellt werden. Hierzu wird der Massenstrom \dot{m} mit der spezifischen Wärmekapazität c_p und der Temperaturdifferenz aus der Austritts- zu der Eintrittstemperatur multipliziert.

Für den übertragenen Wärmestrom des Kaltwassers im Verdampfer \dot{Q}_V gilt:

$$\dot{Q}_V = \dot{m} \cdot c_p(\bar{\vartheta}) \cdot (T_{KaWa,aus} - T_{KaWa,ein}) \quad [4.3]$$

Der Index *KaWa* bezeichnet das Kaltwasser und der Index *aus* wird für den Austritt und der Index *ein* für den Eintritt verwendet. Die spezifische Wärmekapazität $c_p(\bar{\vartheta})$ wird mit der mittleren Temperatur $\bar{\vartheta}$ berechnet, welche sich aus dem arithmetischen Mittelwert zusammensetzt.

Für den übertragenen Wärmestrom des Heizwassers *HeWa* im Generator gilt:

$$\dot{Q}_G = \dot{m} \cdot c_p(\bar{\vartheta}) \cdot (T_{HeWa,aus} - T_{HeWa,ein}) \quad [4.4]$$

Da die Temperatur des Kühlwassers nicht zwischen dem Absorber und Kondensator gemessen wird, kann lediglich der insgesamt vom Kühlwasser aufgenommene Wärmestrom berechnet werden. Dieser setzt sich aus den übertragenen Wärmeströmen im Absorber \dot{Q}_A und Kondensator \dot{Q}_K zusammen. Die Wärmeübertragung aus der Rohrleitung zwischen den Behältern an die Umgebung wird vernachlässigt:

$$\dot{Q}_A + \dot{Q}_K = \dot{m} \cdot c_p(\bar{\vartheta}) \cdot (T_{KüWa,aus} - T_{KüWa,ein}) \quad [4.5]$$

Der Absorptionskältemaschine wird elektrische Leistung für den Betrieb der Umwälzpumpen zugeführt. Die elektrische Leistung der Pumpen wird berechnet durch:

$$P_{el} = U \cdot I \quad [4.6]$$

Die Stromstärke wird mit *I* abgekürzt und die Spannung wird mit *U* bezeichnet.

4.1.5 Aufstellung der Bilanz um die Absorptionskältemaschine

In Abbildung 17 ist die Bilanzgrenze um die Absorptionskältemaschine eingezeichnet.

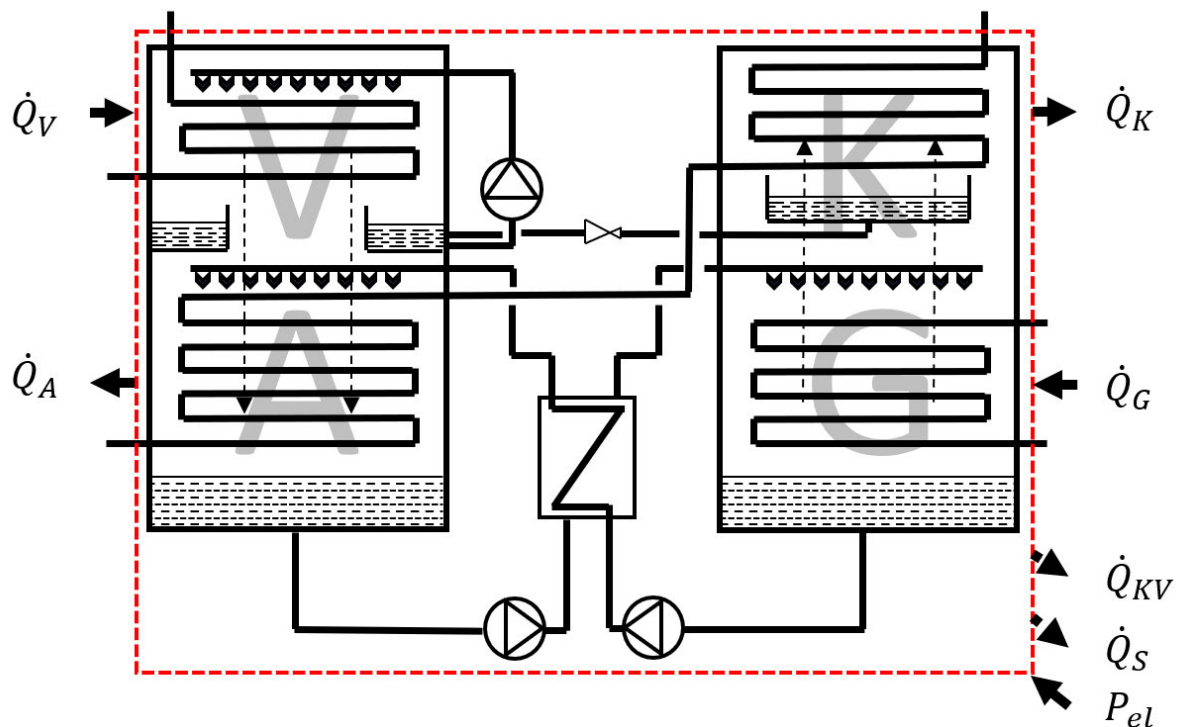


Abbildung 17 Bilanzgrenze um die Absorptionskältemaschine

Die einkommenden Wärmeströme bestehen aus den übertragenen Wärmeströmen im Verdampfer und Generator sowie der zugeführten Pumpenleistung P_{el} .

Auf der Seite der ausgehenden Wärmeströme werden die übertragenen Wärmeströme im Kondensator und Absorber sowie die Wärmeströme an die Umgebung bilanziert. Der Wärmeaustausch mit der Umgebung setzt sich aus den Wärmeübertragungsmechanismen der Strahlung und Konvektion zusammen. Wird mit den Beträgen gerechnet, so ergibt sich die folgende Bilanzgleichung:

$$P_{el} + \dot{Q}_V + \dot{Q}_G = \dot{Q}_K + \dot{Q}_A + \dot{Q}_S + \dot{Q}_{KV} \quad [4.7]$$

Die übertragenen Wärmeströme im Platten-Wärmeübertrager werden nicht für die Bilanz um die Absorptionskältemaschine beachtet, da diese innerhalb der Bilanzgrenze übertragen werden.

Wird die Strahlung an die Umgebung mit \dot{Q}_U zusammengefasst, so ergibt sich für den mit der Umgebung ausgetauschten Gesamtwärmestrom:

$$\dot{Q}_U = P_{el} + \dot{Q}_V + \dot{Q}_G - \dot{Q}_K - \dot{Q}_A \quad [4.8]$$

4.2 Wärmeübertragung an die Umgebung

Im Folgenden soll eine Berechnungsgrundlage erstellt werden, um den übertragenen Wärmestrom der Absorptionskältemaschine an die Umgebung ohne die Bilanz zu berechnen. Dazu werden die Wärmeströme der beiden Wärmeübertragungsmechanismen Strahlung und Konvektion zunächst einzeln betrachtet. Die Wärmeströme des Platten-Wärmeübertragers und der Rohrleitungen zwischen den Behältern an die Umgebung werden vernachlässigt.

4.2.1 Wärmeübertragung durch Konvektion

Der übertragene Wärmestrom an die Umgebung ergibt sich durch die Summe der übertragenen Wärmeströme über die Seitenfläche A_{SF} und die Grundfläche A_{GF} an die Umgebung. Für den übertragenen Wärmestrom durch Konvektion \dot{Q}_{KV} gilt entsprechend:

$$\dot{Q}_{KV} = \alpha_{GF} \cdot A_{GF} \cdot (T_{GF} - T_U) + \alpha_{SF} \cdot A_{SF} \cdot (T_{SF} - T_U) \quad [4.9]$$

Die Wärmeübergangskoeffizienten α werden der Literatur für die Paarung Stahlwand/Luft entnommen.

Die Oberfläche des Generators setzt sich zusammen aus der Seitenfläche und der Grundfläche. Für die Seitenfläche gilt:

$$A_{SF} = \pi \cdot d \cdot h \quad [4.10]$$

Für die Fläche wird der Buchstabe A verwendet. Der Durchmesser wird mit d und die Höhe mit h bezeichnet.

Die Grundfläche ergibt sich durch:

$$A_{GF} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad [4.11]$$

Die Wärmeübergänge und verwendeten Wärmeübergangskoeffizienten sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Während für die Wärmeübergangskoeffizienten für die Decke und den Boden der Behälter feste Anhaltswerte aus der Literatur entnommen werden können, muss für Luft senkrecht zu einer Metallwand die Luftbewegung eingeschätzt werden. Für die durchgeführten Berechnungen wird der Wärmeübergangskoeffizient mit einem Wert von $20 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ angenommen. Es sollte jedoch davon ausgegangen werden, dass der Wert von dem tatsächlichen Wärmeübergangskoeffizienten abweicht. Somit sind die später berechneten Wärmeströme nur abgeschätzte Werte. Der Wärmestrom durch Konvektion am Verdampfer wird aufgrund der zu erwartenden niedrigen Temperaturdifferenzen und der zusätzlichen Isolation vernachlässigt.

Tabelle 7 Wärmeübergangskoeffizienten (in Anlehnung an [15])

Wärmeübergang	Wärmeübergangskoeffizient $\alpha \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	
Ruhende Luft senkrecht zu einer Metallwand	3,5...35	Annahme \rightarrow 20
Boden (oben nach unten) Generator & Absorber	5,8	
Decke (unten nach oben) Kondensator	8,1	

Entsprechend setzt sich der durch Konvektion an die Umgebung übertragene Wärmestrom zusammen aus:

$$\dot{Q}_{KV} = \dot{Q}_{KV,G} + \dot{Q}_{KV,A} + \dot{Q}_{KV,K} \quad [4.12]$$

4.2.2 Wärmeübertragung durch Strahlung

Für den übertragenen Wärmestrom durch Strahlung \dot{Q}_S gilt nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$\dot{Q}_S = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot [(T_G^4 - T_U^4) + (T_K^4 - T_U^4) + (T_V^4 - T_U^4) + (T_A^4 - T_U^4)] \quad [4.13]$$

Der Buchstabe σ wird für die Stefan-Boltzmann-Konstante verwendet. Der Emissionsgrad wird mit ε bezeichnet. Die Oberfläche des Behälters wird als grauer Strahler mit einem Emissionsgrad von 0,79 angenommen.

4.3 Wärmeübertrager

Für den Wärmeübertrager werden Stoffdaten, beziehungsweise Näherungsgleichungen für die LiBr-Lösung benötigt, um die übertragenen Wärmeströme berechnen zu können. In diesem Kapitel werden Näherungsgleichungen vorgestellt, um die Konzentration und die Dichte sowie die spezifische Wärmekapazität der LiBr-Lösung zu berechnen. Anschließend werden Gleichungen aufgestellt, um die übertragenen Wärmeströme im Wärmeübertrager zu berechnen.

4.3.1 Konzentration der LiBr-Lösungen

Die LiBr-Konzentration an der Lösung kann in Abhängigkeit der gemessenen Temperaturen in der Absorptionskältemaschine berechnet werden. Für die Konzentration x von LiBr an der Lösung im Absorber gilt [16]:

$$x_A = \frac{49,04 + 1,125 \cdot \vartheta_A - \vartheta_V}{134,65 + 0,47 \cdot \vartheta_A} \quad [4.14]$$

Die Temperaturen ϑ werden in der Einheit $^{\circ}\text{C}$ in die Formel eingesetzt. Da die Temperatur im Absorber nicht direkt gemessen wird und es nur Messwerte zu den Eintritts- und Austrittstemperaturen der kältemittelarmen, beziehungsweise kältemittelreichen Lösungen gibt, wird der arithmetische Mittelwert aus den beiden gemessenen Werten gebildet.

Für die Konzentration des LiBr an der Lösung im Generator gilt [16]:

$$x_G = \frac{49,04 + 1,125 \cdot \vartheta_G - \vartheta_K}{134,65 + 0,47 \cdot \vartheta_G} \quad [4.15]$$

Da die Temperatur im Generator nicht direkt gemessen wird und es nur Messwerte zu den Eintritts- und Austrittstemperaturen des Heizwassers gibt, wird der arithmetische Mittelwert aus den beiden gemessenen Werten des Heizwassers gebildet.

Die vorgestellten Gleichungen gelten mit einer vom Autor angegebenen Standardabweichung von $\pm 0,2\%$ für berechnete Konzentrationen zwischen 0,5 und 0,65. An der vorhandenen Anlage wurden während der experimentellen Untersuchungen auch Konzentrationen unter 0,5 erreicht. Auf diese Problematik wird im Kapitel 5.7.1 näher eingegangen.

4.3.2 Dichte der LiBr-Lösung

Die Dichte ρ der Wasser/LiBr-Lösung kann durch die folgende Gleichung in Abhängigkeit der vorliegenden Temperatur und Konzentration in der Einheit Vol.-% mithilfe der Koeffizienten G aus Tabelle 8 berechnet werden [4]:

$$\rho(x, \vartheta) = \sum_{k=1}^5 x^{k-1} \cdot [G_{0,k} + \vartheta(G_{1,k} + \vartheta \cdot G_{2,k})] \quad [4.16]$$

Tabelle 8 Koeffizienten Dichte der LiBr-Lösung [4]

	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5
i=0	999,1	7,749	0,005365	0,001350	-3,087E-06
i=1	-0,02399	-0,01283	0,0002072	-9,082E-06	9,948E-08
i=2	-0,003905	-5,559E-05	1,099E-05	-2,398E-07	1,535E-09

4.3.3 Spezifische Wärmekapazität der LiBr-Lösung

Die spezifische Wärmekapazität c_p der LiBr-Lösung kann durch die folgende Gleichung in der Einheit $\frac{kcal}{kg \cdot K}$ in Abhängigkeit der vorliegenden Konzentration berechnet werden [16]:

$$c_p(x) = 0,48 \cdot x^2 - 1,23 \cdot x + 1,01 \quad [4.17]$$

4.3.4 Wärmeströme im Wärmeübertrager

Für den durch die kältemittelarme LiBr-Lösung übertragenen Wärmestrom gilt im Platten-Wärmeübertrager $WÜ$:

$$\dot{Q}_{WÜ,ka} = \dot{m} \cdot c_p(\bar{\vartheta}) \cdot (T_{Lösung,A,ein} - T_{Lösung,G,aus}) \quad [4.18]$$

Der Index ka wird für die kältemittelarme LiBr-Lösung verwendet.

Analog gilt für den im Platten-Wärmeübertrager übertragenen Wärmestrom der kältemittelreichen LiBr-Lösung:

$$\dot{Q}_{WÜ,kr} = \dot{m} \cdot c_p(\bar{\vartheta}) \cdot (T_{Lösung,G,ein} - T_{Lösung,A,aus}) \quad [4.19]$$

Der Index kr wird für die kältemittelreiche LiBr-Lösung verwendet.

4.3.5 Wärmeübertragung des Wärmeübertragers an die Umgebung aus der Bilanz

Für den Wärmeübertrager gilt mit dem an die Umgebung abgegebenen Wärmestrom \dot{Q}_U :

$$\dot{Q}_U = \dot{Q}_{WÜ,ka} + \dot{Q}_{WÜ,kr} \quad [4.20]$$

4.4 Coefficient of Performance

Der COP (**C**oefficient **o**f **P**erformance) kann verwendet werden, um Kältemaschinen zu bewerten. Der COP wird als Quotient von Nutzen zu Aufwand berechnet. Um den COP zu bestimmen, wird entsprechend die abgeführte Kälteleistung in ein Verhältnis zu der zugeführten Wärme und elektrischen Leistung gesetzt. Der COP wird berechnet durch [10]:

$$COP = \frac{\dot{Q}_V}{\dot{Q}_G + P_{el,ges}} \quad [4.21]$$

Die gesamte elektrische Leistung $P_{el,ges}$ setzt sich im Vergleich zu der elektrischen Leistung an der Absorptionskältemaschine zusätzlich aus der Leistung für die Pumpen für das Kalt- sowie das Kühlwasser zusammen.

5. Experimentelle Untersuchungen

Im folgenden Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert. Diese werden in der aufgestellten Wärmebilanz dargestellt und erläutert. Die während der Untersuchungen erreichten Werte für den COP werden aufgeführt und mit dem vom Hersteller angegebenen Wert für den COP von 0,71 verglichen [6]. Mit den gemessenen Oberflächentemperaturen werden die mit der Umgebung ausgetauschten Wärmeströme abgeschätzt. Im Anhang sind die Messwerte und Auswertungen zusammengefasst.

5.1 Durchführung der experimentellen Untersuchungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden mehrere Messreihen im automatisierten Betrieb mit verschiedenen Kühlwassereintrittstemperaturen aufgenommen, um das Betriebsverhalten der Anlage zu untersuchen. Je Messreihe wurde die Kaltwasserbeheizung in 2 kW-Schritten stufenweise erhöht, nachdem sich ein annähernd stationärer Zustand eingestellt hat.

In Tabelle 9 ist das Vorgehen dargestellt, um eine Messreihe aufzunehmen. Diese Schritte wurden für jede Messreihe mit unterschiedlichen Kühlwassereintrittstemperaturen wiederholt.

Tabelle 9 Vorgehen für die Aufnahme einer Messreihe

Schritt	Änderung
1	Einschalten der Pumpen und der Anlage, Aufheizen der Anlage
2	Absorber in Betrieb
3	Warten bis zu niedrigstem Betriebspunkt, gegebenenfalls bis zu Störung, da Kaltwassertemperatur unter 6 °C
4	Einschalten der Kaltwasserbeheizung auf 2 kW
5	Einschalten der Kaltwasserbeheizung auf 4 kW
6	Einschalten der Kaltwasserbeheizung auf 6 kW
7	Einschalten der Kaltwasserbeheizung auf 8 kW
8	Einschalten der Kaltwasserbeheizung auf 10 kW
9	Einschalten der Kaltwasserbeheizung auf 12 kW
10	Abschalten der Anlage, Nachlauf

Es wurde jeweils der arithmetische Mittelwert aus den letzten zehn Messwerten des eingestellten stationären Zustands ausgewertet, um schwankende Messwerte durch die aufgenommenen Werte zu diskreten Zeitpunkten auszugleichen.

5.2 Kriterium für einen stationären Zustand

Von einem stationären Zustand wurde ausgegangen, wenn sich in den letzten zehn Messwerten keine Änderungen der Eintrittstemperaturen des Kaltwassers von mehr als $\pm 0,3$ °C ergeben haben. Diese Bedingung wurde später an den aufgenommenen Werten kontrolliert (Abbildung 18). Während von den Messpunkten ($n=25$) drei Messpunkte das

Kriterium nicht erfüllt haben und dementsprechend nicht weiter ausgewertet wurden, stellte sich bei 21 Messpunkten eine Temperaturdifferenz zwischen der höchsten und der niedrigsten gemessenen Temperatur der ausgewerteten zehn Werte von weniger als 0,2 °C ein.

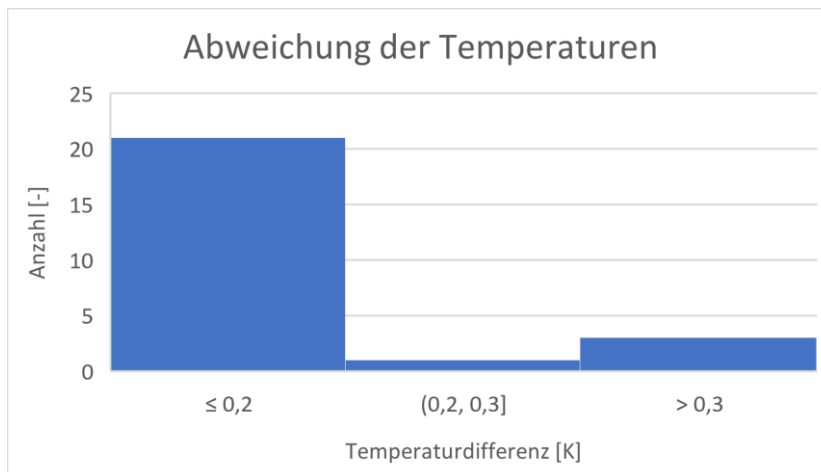


Abbildung 18 Abweichung der Temperaturen zur Beurteilung eines stationären Zustands

5.3 Regelung des Kühlwassermassenstroms

Während der anfänglichen experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich der Kühlwasservolumenstrom mit dem dafür vorgesehenen Drei-Wege-Ventil nicht ausreichend genau regulieren lässt. Diese Problematik steht im Zusammenhang mit einem zu hohen Spiel des Drehmechanismus (Abbildung 19) und einem nicht proportionalen Verlauf des durchgelassenen Massenstroms zum veränderten Drehwinkel.

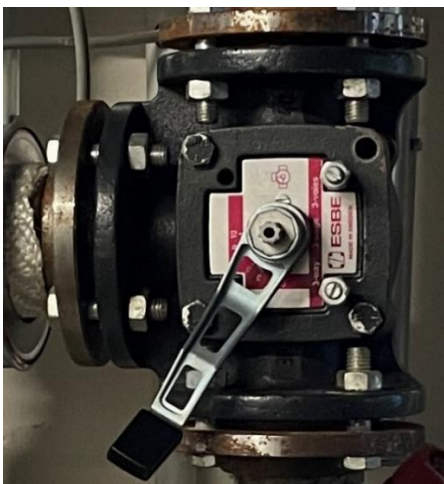


Abbildung 19 Drei-Wege-Ventil

Für die Ventileinstellungen wurde eine Messreihe aufgenommen, um ein besseres Verständnis für die unterschiedlichen durchgelassenen Massenströme in Abhängigkeit der Ventilstellung zu erhalten. Die Umwälzpumpe wurde für diese experimentelle Untersuchung ausgeschaltet, sodass nur die Kühlwasserpumpe eingeschaltet war. Das Ventil wurde von der Stellung „0“ schrittweise geöffnet. Der Verlauf des Massenstroms ist in Abbildung 20 dargestellt. Der Massenstrom ändert sich überwiegend zwischen den Schritten „3“ und „6“. Dieser Bereich ist zu gering, um den Kühlwassermassenstrom einzustellen.

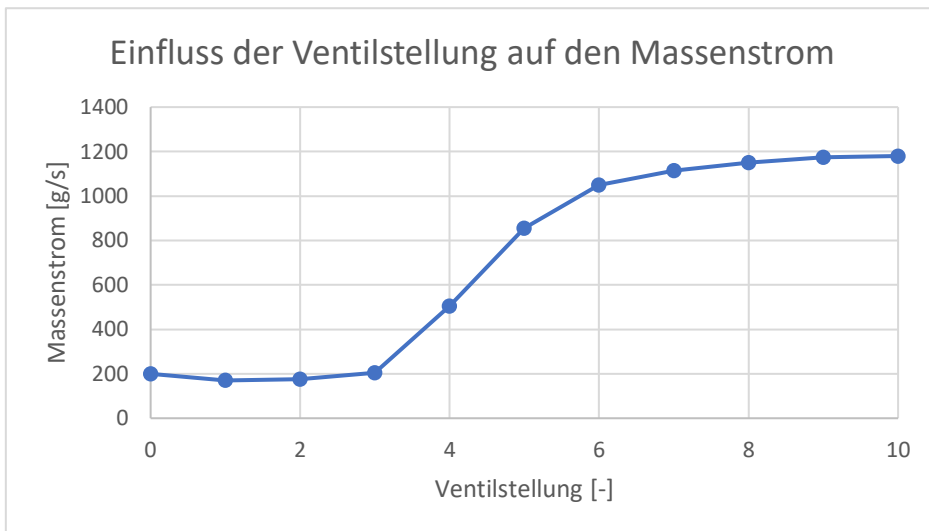


Abbildung 20 Einfluss der Ventilstellung auf den Massenstrom

Wird das Kühlwasser über das Drei-Wege-Ventil geregelt, so führt dies zu starken Schwankungen des Massenstroms und dementsprechend zu schwankenden Kühlwassertemperaturen. Der Verlauf des Massenstroms und der Temperatur einer aufgenommenen Messreihe ist in Abbildung 21 dargestellt. Durch die starken schwankenden Messwerte des Massenstroms kam es zu schwankenden Kühlwassertemperaturen, beispielsweise nach circa 1500 s. In diesem Fall musste das Ventil manuell verstellt werden und nach circa 4800 s kam es erneut ohne manuellen Eingriff zu einem Abfall.

Der abfallende Massenstrom resultierte aus einem fehlenden Gegendruck im Rückkühlkreislauf, da das Wasser über zwei Stockwerke in einem Fallrohr zurückgeflossen ist und sich im oberen Bereich entsprechend stetig Luft angesammelt hat. Aus diesem Grund war es nicht möglich, im automatisierten Betrieb einen stationären Zustand mit einer eingestellten annähernd konstanten Temperatur zu erreichen.

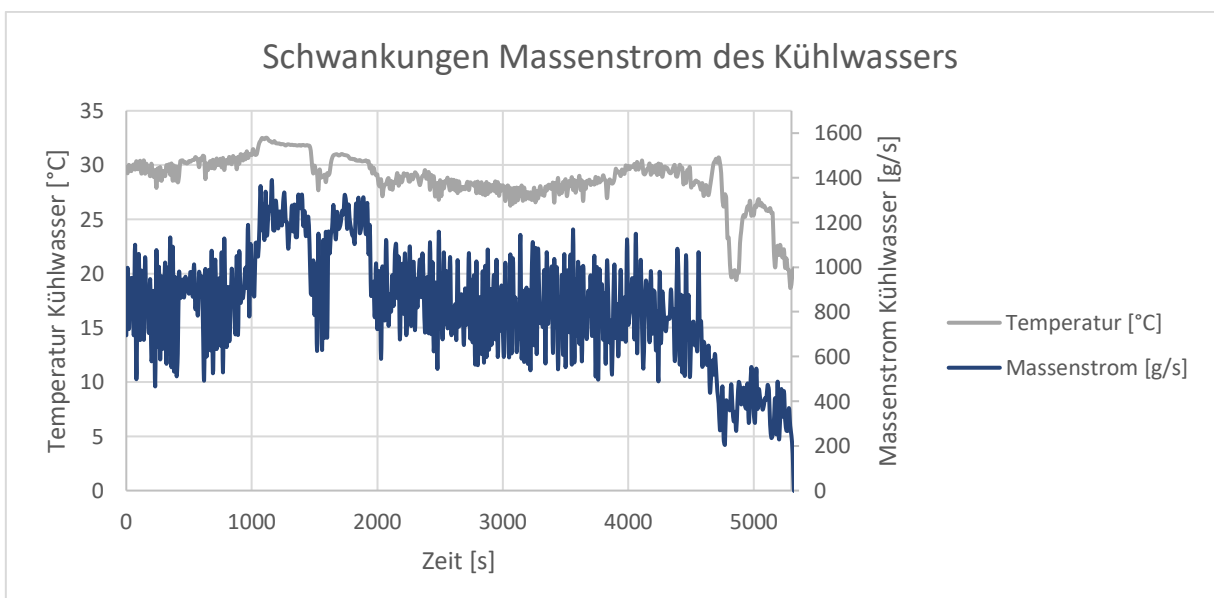


Abbildung 21 Schwankungen Massenstrom des Kühlwassers

Das Problem konnte durch einen parallel laufenden Bypass gelöst werden, durch den sich das Kühlwasser besser regulieren lässt. Die angepasste Regelung des Kühlwassermassenstroms erfolgt an der Anlage durch ein weiteres Ventil vor dem Bypass und das Drei-Wege-Ventil wird lediglich verwendet, um den Massenstrom grob einzustellen.

Fließt das Kühlwasser aus der Absorptionskältemaschine durch den Bypass, durch den das Wasser eine Höhendifferenz von circa 3 m überwinden muss, so fließt ein größerer Anteil des bereits erwärmten Kühlwassers durch die Umwälzpumpe zurück in die Absorptionskältemaschine. Die Kühlwassereintrittstemperatur steigt dementsprechend. Wird der Bypass durch das geöffnete Ventil überbrückt, so fließt mehr kaltes Wasser aus dem Kühlwasserreservoir außerhalb des ZET in die Absorptionskältemaschine. Die Kühlwassereintrittstemperatur sinkt. Ein Ausschnitt einer Messreihe mit angepasster Regelung ist in Abbildung 22 dargestellt.

Die Ventile wurden am Anfang der Untersuchung eingestellt (0 s bis circa 1000 s) bis die gewünschte Kühlwassereintrittstemperatur erreicht wurde. Der Massenstrom blieb aufgrund des während der gesamten Untersuchung zum Teil geöffneten Bypasses annähernd konstant, da ein durchgängiger Gegendruck vorhanden war. Die Auslenkung der Temperatur nach circa 3200 s lässt sich durch einen manuellen Eingriff in die Kaltwasserbeheizung erklären, wodurch die Ventilstellung erneut leicht angepasst werden musste.

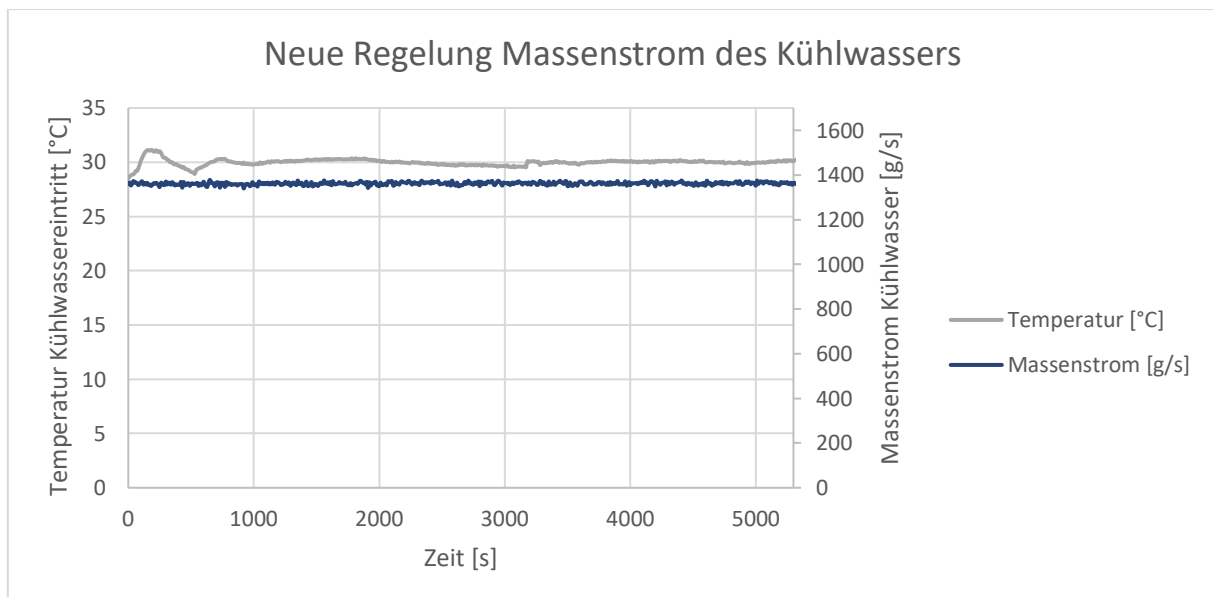


Abbildung 22 Neue Regelung Massenstrom des Kühlwassers

Alle Untersuchungsergebnisse mit dem schwankenden Kühlwasservolumenstrom wurden nicht für die Auswertung verwendet und entsprechend wiederholt.

5.4 Elektrische Leistung der Pumpen

Für die elektrische Leistung der Pumpen wurde die Stromaufnahme einmalig gemessen, da die Pumpen nicht geregelt sind und ein annähernd konstanter Verbrauch angenommen wird. Für den Verbrauch der Pumpen ergab sich eine elektrische Leistung von circa 400 W. Für den berechneten Wert wurden lediglich die Umwälzpumpen zwischen den Behältern betrachtet. Um den COP mit der gesamten elektrischen Leistung zu berechnen, müssten ebenfalls die

Leistung der Pumpen für das Kühl- und das Kaltwasser zusätzlich einbezogen werden. Da diese nicht für die Anlage dimensioniert wurden und der Leistungsverbrauch nicht dem typischen Leistungsverbrauch für den Betrieb einer Absorptionskältemaschine entspricht, wurden diese vernachlässigt. Der berechnete Leistungsverbrauch der Umwälzpumpen entspricht im Vergleich zum insgesamt aufgenommenen Wärmestrom einem Anteil von circa 2 %. Diese Größenordnung liegt über den Werten aus der Literatur, wonach selten Werte über 1 % für die Pumpenleistung von Absorptionskältemaschinen erreicht werden [18].

5.5 Bilanzierung um die Absorptionskältemaschine

Im folgenden Kapitel werden die bestimmte Konzentration des Antifrogen N-Gemisches und die Ergebnisse der berechneten Wärmeströme vorgestellt und erläutert. Die berechneten Wärmeströme an die Umgebung aus der Bilanz werden vorgestellt.

5.5.1 Konzentration des Antifrogen N-Gemisches

Für die Konzentration des Antifrogen N/Wasser-Gemisches wurde einmalig die vorliegende Dichte bestimmt. Mit der gemessenen Temperatur von $\vartheta = 20,5 \text{ }^\circ\text{C}$ und der abgelesenen Dichte am Aräometer mit $1,07 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ergab sich eine Konzentration mithilfe des Diagramms von circa 43 Vol.-% Antifrogen N. Für alle experimentellen Untersuchungen wurde die bestimmte Konzentration als konstant angenommen.

5.5.2 Wärmeströme um die Absorptionskältemaschine

Im folgenden Kapitel werden ausschließlich die Beträge der Wärmeströme dargestellt. Die berechneten Wärmeströme des Verdampfers der Absorptionskältemaschine sind in Abbildung 23 in Abhängigkeit der Kaltwassereintrittstemperatur aufgetragen. Der übertragene Wärmestrom steigt mit zunehmender Kaltwassereintrittstemperatur an. Ist die Kühlwassereintrittstemperatur kleiner, wird scheinbar mit gleichbleibender Kaltwassereintrittstemperatur ein größerer Wärmestrom übertragen. Dies kann durch ein größeres Temperaturgefälle im Absorber und Kondensator erklärt werden, wodurch die Absorption und Kondensation beschleunigt werden.

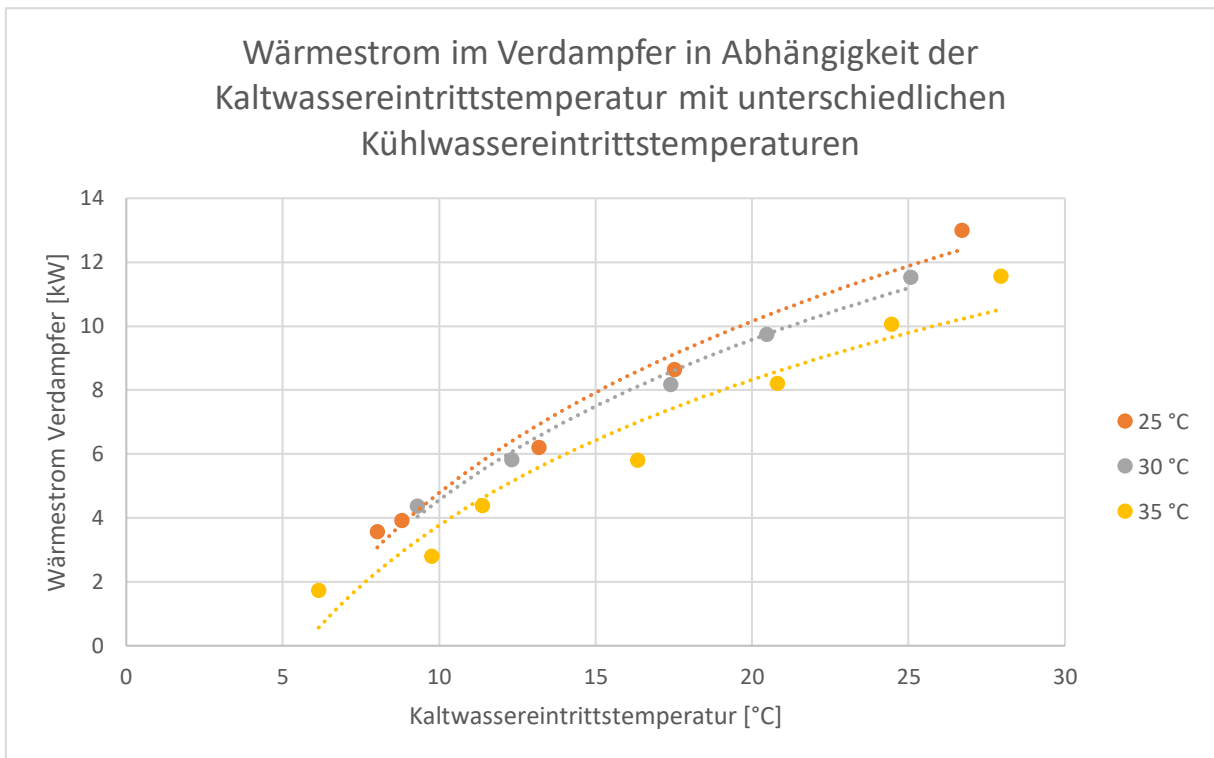


Abbildung 23 Wärmestrom im Verdampfer

Die Wärmeströme des Generators und des zusammengefassten Absorbers und Kondensators verhalten sich analog zu dem Wärmestrom im Verdampfer und sind im Anhang dargestellt.

5.5.3 Wärmeübertragung an die Umgebung aus der Bilanz

Die berechneten übertragenen Wärmeströme mit der Umgebung aus der Bilanz um die Absorptionskältemaschine sind in Abhängigkeit von der Kaltwassereintrittstemperatur in Abbildung 24 dargestellt. Die berechneten Werte aus den Messpunkten liegen sowohl im positiven als auch im negativen Bereich, sodass teilweise anscheinend mehr Energie aus dem System entnommen als hineingesteckt wurde.

Wird aus der Bilanz die Wärmeübertragung an die Umgebung berechnet, so müssten sich entsprechend des eingezeichneten Wärmestroms an der Bilanzgrenze grundsätzlich für alle Messreihen in stationärem Zustand positive Werte ergeben. Dies liegt an den höheren Temperaturen im Vergleich zu der Umgebungstemperatur, welche im gesamten untersuchten Bereich vorlagen. Entsprechend müsste die Absorptionskältemaschine einen Wärmestrom entsprechend der Pfeilrichtung an die Umgebung abgeben.

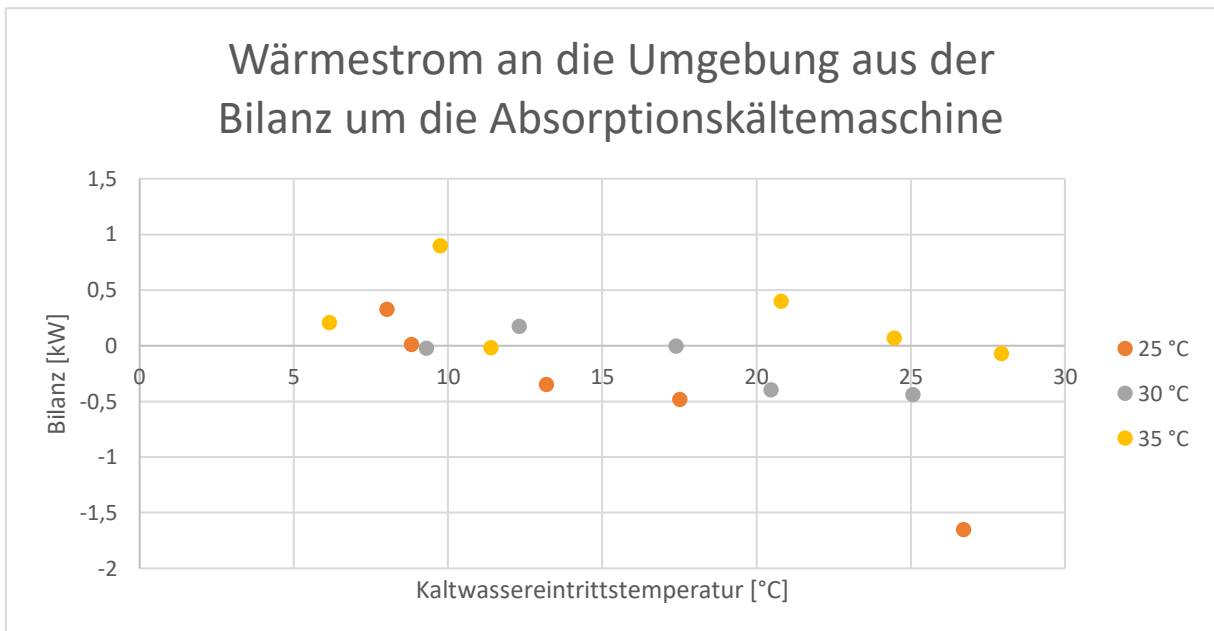


Abbildung 24 Wärmestrom an die Umgebung aus der Bilanz

Mögliche Einflüsse auf die berechneten Werte sind:

- Kein eingestellter stationärer Zustand
- Aufzeichnung der Temperaturen teilweise nur mit einer Nachkommastelle
- Toleranzen, insbesondere der Temperatursensoren
- Abweichung der Ergebnisse durch Näherungsgleichungen
- Verwendung der Stoffwerte des Wassers als Konstanten
- Aufzeichnung der Messpunkte zu diskreten Zeitpunkten (alle 10 s)

Die Auswirkungen der genannten Einflüsse werden im Folgenden erläutert.

Da die Kaltwassereintrittstemperatur durch die zugeschaltete Kaltwasserbeheizung nach dem ersten Messpunkt schrittweise angehoben wurde, haben die Komponenten der Absorptionskältemaschine nach dem ersten Messpunkt stets von Messpunkt zu Messpunkt eine Wärmemenge aufgenommen. Durch einen nicht vollständig eingestellten stationären Zustand nehmen die Komponenten der Anlage durch die treibende Temperaturdifferenz entsprechend einen Teil der zugeführten Wärme auf.

Exemplarisch wurde anhand eines ausgewählten Messpunkts die Auswirkung abweichender gemessener Temperaturdifferenzen des Kühlwassers untersucht. Die Messwerte wurden mit einer Nachkommastelle aufgezeichnet, sodass durch Rundungen eine Temperaturdifferenz für zwei Messwerte von bis zu 0,1 K entstehen kann. In Tabelle 10 sind die Auswirkungen abweichender Messergebnisse von den tatsächlichen Temperaturen dargestellt. Durch Rundungen würde der berechnete Wärmestrom an die Umgebung aus der Bilanz von dem positiven Wert von 0,1 kW bereits bis zu einem Wert von -0,47 kW absinken.

Tabelle 10 Auswirkung höherer Temperaturdifferenzen des Kühlwassers auf die Bilanz

Erhöhung ($T_{KüWa,aus} - T_{KüWa,ein}$) [K]	\dot{Q}_U [kW]
0,0	0,10
0,1	-0,47
0,3	-1,6

Der Hersteller der Temperaturmesssensoren gibt eine Toleranz von $\pm 0,3$ K für die Messsensoren an. Mit einer größeren Temperaturdifferenz von 0,3 K würde sich bereits statt eines positiven Werts von 0,1 kW ein negativer Wert von -1,6 kW ergeben. Niedrigere Temperaturdifferenzen würden sich analog auswirken.

Es ist jedoch zu beachten, dass es sich in diesen Fällen um fehlerhaft kalibrierte Sensoren handeln müsste. Zum Startzeitpunkt der experimentellen Untersuchung wurden die gemessenen Temperaturen im stationären Zustand ohne Kühlwasserdurchfluss und dementsprechend mit annähernd gleicher Temperatur analysiert. Es ergab sich eine Abweichung der gemessenen Temperaturen im Mittel von circa 0,06 K, sodass nicht von einer starken Messgenauigkeit ausgegangen werden kann.

Die aufgezeichneten Messpunkte zu diskreten Zeitpunkten können zu ungenauen Messwerten führen. Diese werden durch den Mittelwert der letzten zehn Messungen jedoch weitestgehend ausgeglichen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich trotz der geforderten Genauigkeit für eingeschwungene Zustände keine Aussage über den Betrag des mit der Umgebung ausgetauschten Wärmestroms erstellen lässt. Die niedrigen Werte lassen jedoch den Rückschluss zu, dass die Größenordnung des an die Umgebung abgegebenen Wärmestroms deutlich unter den übertragenen Wärmeströmen des Kalt-, Heiz- und Kühlwassers liegt.

Statt den gesamten Heizbereich der Kaltwasserbeheizung zu untersuchen, könnten weitere Messreihen mit neuen Bedingungen für einen eingeschwungenen Zustand mit weniger Messpunkten pro Messreihe durchgeführt werden. Mit höheren Anforderungen für einen eingeschwungenen Zustand steigt jedoch auch die Dauer der Untersuchungen. Für die geplante Verwendung als Laborversuch für die Studenten der HAW Hamburg ist eine längere Dauer der experimentellen Untersuchungen jedoch nicht möglich. Durchschnittlich betrug die Wartezeit bis zum ersten als stationär angenommenen Messpunkt bereits circa 1,5 Stunden. Unabhängig von einer längeren Dauer einzelner Messpunkte ist davon auszugehen, dass aufgrund der weiteren genannten Einflüsse auch für einen annähernd eingeschwungenen Zustand aus der Bilanz keine aussagekräftigen Wärmeströme an die Umgebung berechnet werden können.

5.6 Wärmeübertragung an die Umgebung

Mit der Wärmebildkamera wurden die Oberflächentemperaturen an der Absorptionskältemaschine mit einer eingestellten Kaltwassereintrittstemperatur von circa 13 °C und einer

Kühlwassereintrittstemperatur von circa 30 °C in einem annähernd stationären Zustand gemessen. Die Temperatur der Umgebung betrug am Tag der Untersuchung circa 18,5 °C. Nach Abbildung 25 betrug die Oberflächentemperatur in der Mitte des Generators ungefähr 62 °C. Im Bereich des Bodens wurden etwas höhere Oberflächentemperaturen gemessen. Der gemessene Wert in der Mitte des Generators von 62 °C wird als Mittelwert für die Temperatur an der Seitenfläche verwendet. Dieses Vorgehen wurde für alle Temperaturen der Seitenflächen durchgeführt.



Abbildung 25 Oberflächentemperaturen des Generators

Die Oberflächentemperatur des Absorbers (Abbildung 26) ist mit 36 °C deutlich unter der Temperatur des Generators. Der Absorber ist auf annähernd gleichem Temperaturniveau wie der Kondensator.

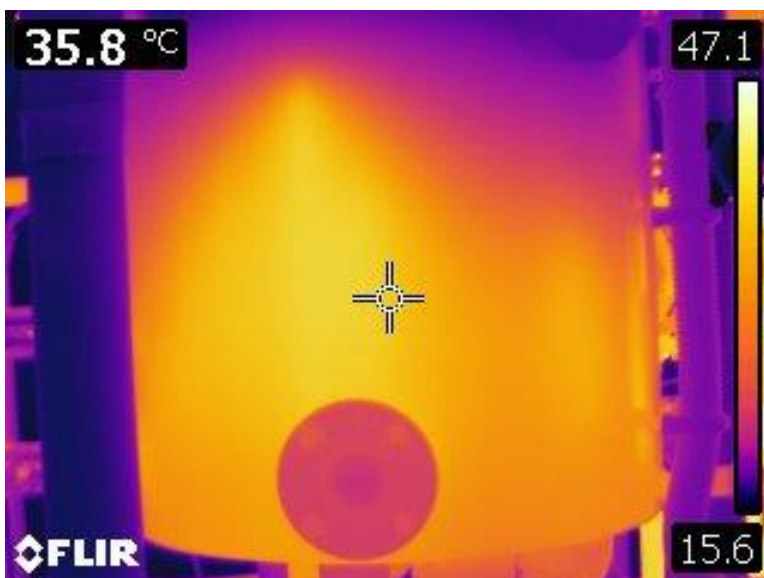


Abbildung 26 Oberflächentemperaturen des Absorbers

Die Oberflächentemperatur des kühleren Verdampfers war aufgrund der zusätzlichen Isolation mit 16 °C nur leicht unterhalb der Temperatur der Umgebung mit 18,5 °C zum Zeitpunkt der Messung. An nicht isolierten Stellen betrug die Temperatur circa 10 °C.



Abbildung 27 Oberflächentemperaturen des Verdampfers

In Abbildung 28 sind die Oberflächentemperaturen einer der Umwälzpumpen während des Betriebs dargestellt. Die Temperatur von bis zu circa 70 °C führt durch die hohe Temperaturdifferenz zu der Umgebungstemperatur zu einer weiteren Wärmeabgabe an die Umgebung.

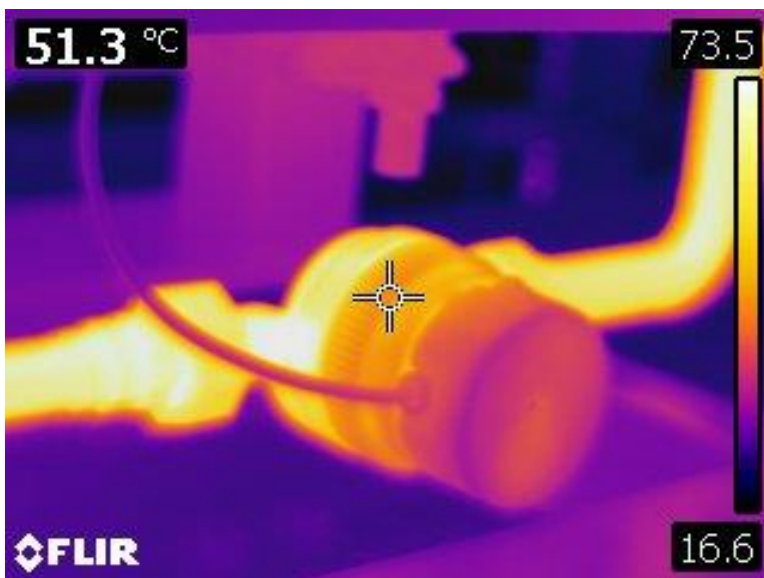


Abbildung 28 Oberflächentemperaturen der Umwälzpumpe

Die Messergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11 Messergebnisse Oberflächentemperaturen

Temperaturen	T _{Boden} [°C]	T _{Seite} [°C]	T _{Decke} [°C]
Kondensator	-	33	33
Generator	70	62	-
Absorber	40	36	-
Verdampfer	-	16	16

In Abbildung 29 sind zahlreiche nicht isolierte Stellen an den Rohrleitungen der Absorptionskältemaschine dargestellt. Durch eine bessere Isolation kann die Eintrittstemperatur des Heizwassers erhöht werden. Entsprechend wäre zu empfehlen, die Rohrleitungen stärker zu isolieren. Die Wärmeverluste in den Rohrleitungen werden nicht weiter beachtet, da die Temperatursensoren direkt an der Anlage verbaut sind und der Wärmeverlust entsprechend die aufgestellte Bilanz nicht beeinflusst.

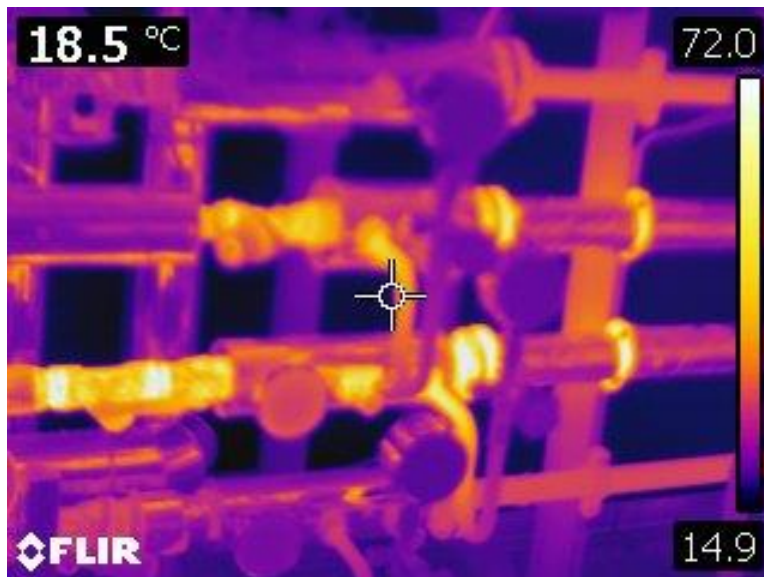


Abbildung 29 Isolation der Rohrleitungen

In Tabelle 12 sind die berechneten Wärmeströme durch Konvektion und Strahlung an die Umgebung zusammengefasst. Insbesondere durch die hohe Wärmeabgabe des Generators wird die Effizienz der Anlage verringert. Aufgrund der im Vergleich zu den anderen Behältern hohen Temperatur weist der Generator einen deutlich höheren Wärmestrom an die Umgebung auf. Dieser ist größer als die Summe der Wärmeströme des Kondensators und Absorbers an die Umgebung. Dementsprechend wäre insbesondere eine Isolation des Generators sinnvoll, um die Effizienz der Absorptionskältemaschine zu erhöhen.

Ein Teil der zugeführten elektrischen Leistung der Pumpen wird als Abwärme an die Umgebung abgegeben. Diese wird als Anteil von 50 % der elektrischen Pumpenleistung abgeschätzt und entspricht 200 W.

Tabelle 12 Ergebnisse des berechneten Wärmestroms an die Umgebung

Wärmestrom	\dot{Q}_{KV} [W]	\dot{Q}_S [W]	\dot{Q}_U [W]
Absorber	328	97	452
Kondensator	275	75	371
Generator	601	200	858
Verdampfer	-63	-15	-83
Pumpen			Abschätzung: 200

Der durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung abgegebene Wärmestrom beträgt entsprechend der Berechnungen circa 1,7 kW.

5.7 Wärmeübertrager

Im folgenden Kapitel werden die im Wärmeübertrager ausgetauschten berechneten Wärmeströme der Fluide dargestellt und erläutert. Anschließend wird der berechnete Wärmestrom an die Umgebung dargestellt.

5.7.1 Konzentrationen der LiBr-Lösung

Die berechneten Konzentrationen der LiBr-Lösung in Abhängigkeit von der Kaltwasserbeheizung und der Kaltwassereintrittstemperatur sind in Abbildung 30 dargestellt. Es können die folgenden Beobachtungen erfolgen:

- Die Konzentration der LiBr-Lösung sinkt mit zunehmender zugeschalteter Kaltwasserbeheizung sowohl im Generator als auch im Absorber
- Die Differenz der Konzentrationen zwischen dem Generator und Absorber wird mit zunehmender Kühlwassereintrittstemperatur geringer

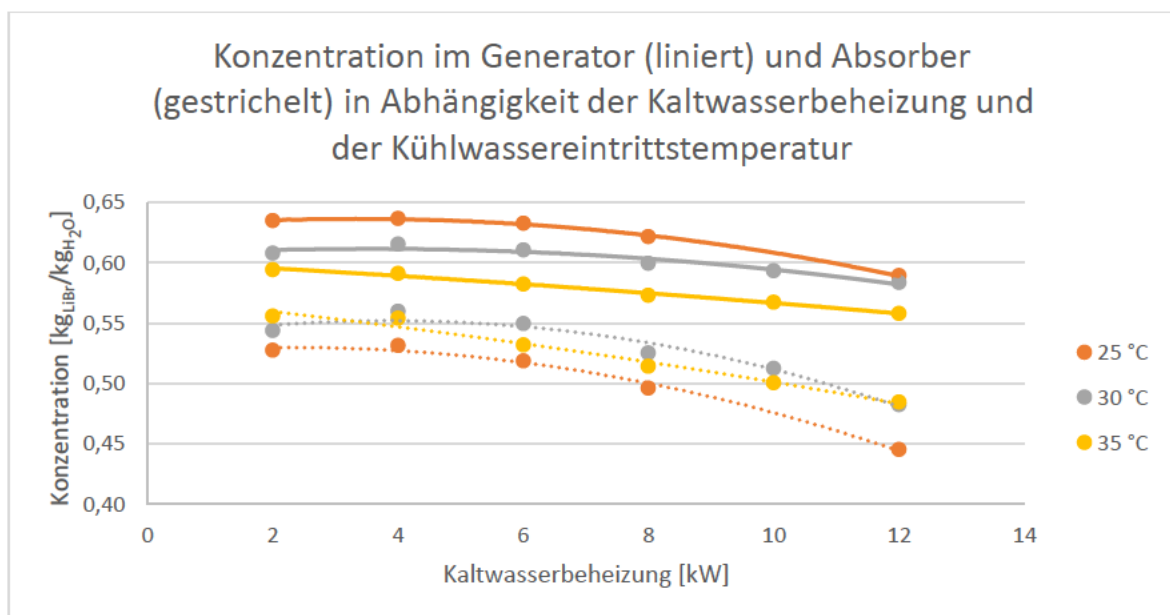


Abbildung 30 Konzentrationen im Absorber und Generator

Steigt die Kaltwasserbeheizung, so steigen durch die höhere Kaltwassereintrittstemperatur die Temperaturen in der Absorptionskältemaschine. Höhere Temperaturen führen zu einer größeren Temperaturdifferenz zwischen der Sättigungstemperatur des Kältemittels und der Kaltwassereintrittstemperatur. Eine größere Wassermenge verdampft und der übertragene Wärmestrom des Kaltwassers steigt. Dadurch steigt auch der Anteil an aufgenommenem Kältemittel in der LiBr-Lösung. Dementsprechend sinkt die Konzentration der LiBr-Lösung im Absorber.

Um die sinkende Konzentration im Generator erklären zu können, werden bereits in diesem Kapitel die berechneten übertragenen Wärmeströme im Verdampfer und Generator dargestellt. Im Generator erhöht sich der Betrag des übertragenen Wärmestroms durch das Heizwasser weniger stark als der übertragene Wärmestrom des Kaltwassers im Verdampfer (Abbildung 31).

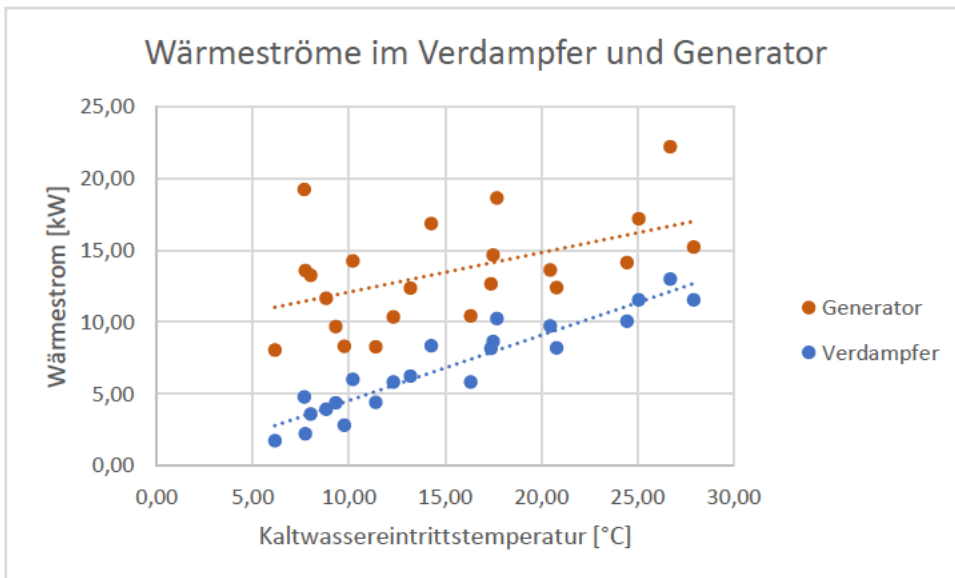


Abbildung 31 Wärmeströme in Abhängigkeit der Kaltwassereintrittstemperatur

Entsprechend wird zwar mit steigender Kaltwassereintrittstemperatur ebenfalls mehr Wasser aus der Lösung im Generator verdampft, jedoch eine geringere Menge als an zuvor mehr aufgenommenem Wasser im Absorber. Dementsprechend wird der höhere Anteil an Wasser in der ankommenden Lösung nur zu einem Teil ausgeglichen und die LiBr-Konzentration sinkt ebenfalls.

Es ist zu beachten, dass außerhalb von berechneten Konzentrationen zwischen 0,5 und 0,65 eine höhere Ungenauigkeit der berechneten Werte angenommen werden muss.

Die Untergrenze des Gültigkeitsbereichs der Gleichung mit einer Konzentration von weniger als 0,5 wurde jedoch nur mit einer Kaltwasserbeheizung $\geq 8 \text{ kW}$ unterschritten. Da der Klimatisierungstemperaturbereich und der dementsprechend häufigste Anwendungsfall der Absorptionskältemaschine unterhalb dieser Kaltwasserbeheizung zwischen circa 0 kW und 6 kW liegt, wird dennoch die vorgestellte Näherungsgleichung in der Software verwendet und für eine größere Kaltwasserbeheizung im Kaltwasserbecken eine höhere Ungenauigkeit akzeptiert.

5.7.2 Wärmeströme im Wärmeübertrager

Die von den Lösungen aufgenommenen, beziehungsweise abgegebenen Wärmeströme und die Summe beider Wärmeströme sind in Abbildung 32 dargestellt. Für die Summe der berechneten Wärmeströme ergeben sich sowohl positive als auch negative Werte. Es kann keine Abhängigkeit der Wärmeströme im untersuchten Bereich von der Kaltwassereintrittstemperatur festgestellt werden.

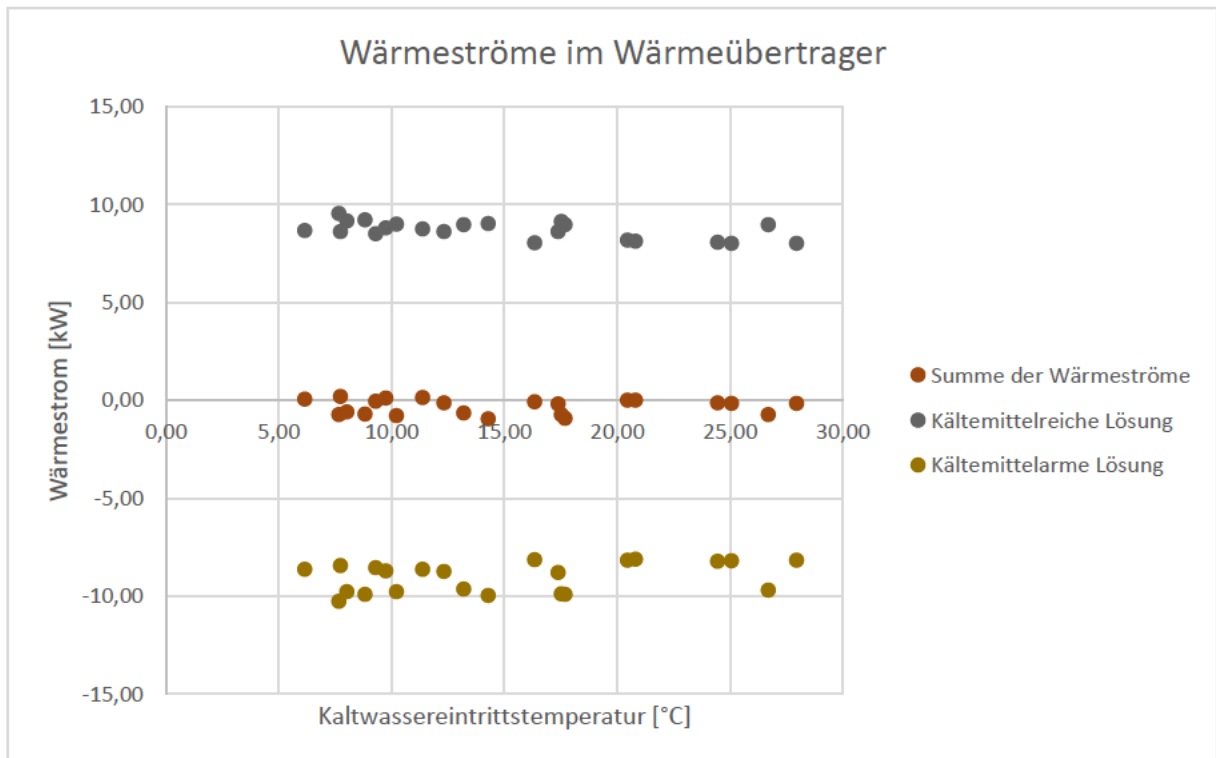


Abbildung 32 Übertragene Wärmeströme im Wärmeübertrager

Die Summe der ausgetauschten Wärmeströme der Lösungen entspricht dem ausgetauschten Wärmestrom des Wärmeübertragers mit der Umgebung. Der abgegebene Wärmestrom der kältemittelarmen Lösung sollte für alle Messreihen betragsmäßig größer sein als der aufgenommene Wärmestrom der kältemittelreichen Lösung, da der Wärmeübertrager aufgrund der höheren Temperaturen im Vergleich zu der Umgebungstemperatur im gesamten untersuchten Bereich einen Wärmestrom an die Umgebung abgibt.

Neben den gleichen Einflüssen für die Wärmeströme um die Absorptionskältemaschine führt für den Wärmeübertrager auch die Näherungsgleichung für die LiBr-Lösung zu einem Einfluss auf die berechneten Wärmeströme. Da die Konzentrationen der Lösung nicht direkt gemessen werden und nur durch die eingestellten Temperaturen bestimmt werden, war zu erwarten, dass der Wärmestrom an die Umgebung aus dem Wärmeübertrager nicht bestimmt werden kann. Entsprechend der Ergebnisse liegt die Größenordnung des an die Umgebung abgegebenen Wärmestroms vermutlich deutlich unter den zwischen den Fluiden ausgetauschten Wärmeströmen.

5.8 Coefficient of Performance

Wird der COP in Abhängigkeit der Kaltwassereintrittstemperatur aus allen durchgeführten Messreihen aufgetragen, ergibt sich Abbildung 33.

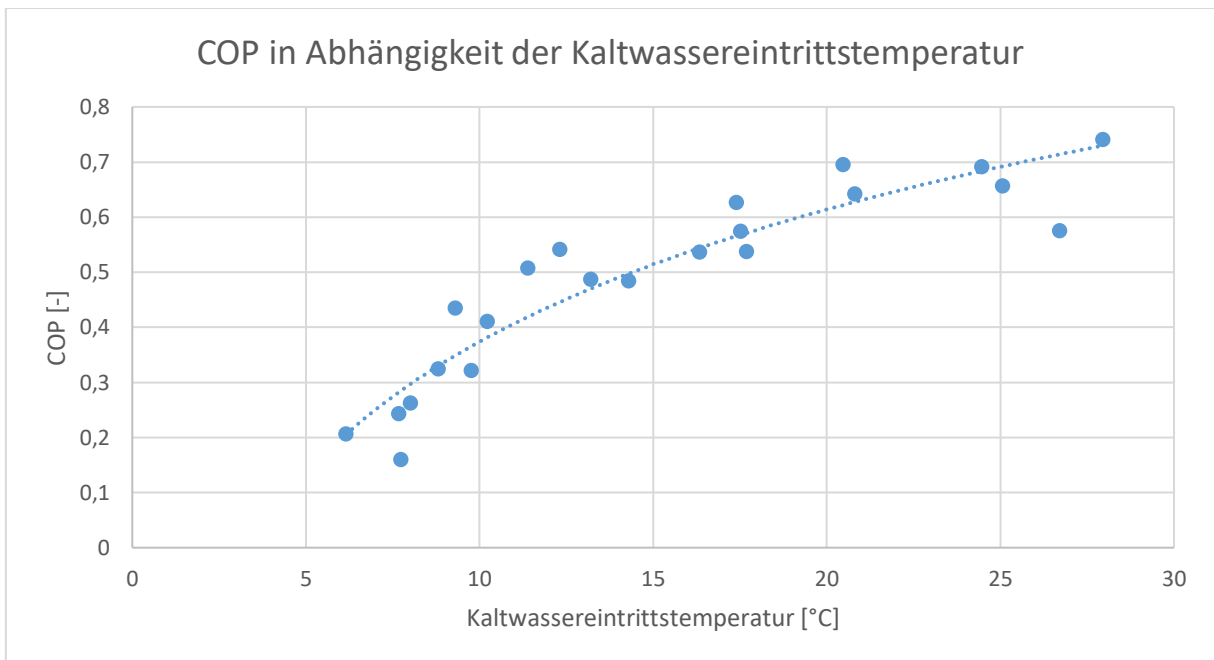


Abbildung 33 Coefficient of Performance

Der COP steigt mit einem Anstieg der Kaltwassereintrittstemperatur an. Dies steht im Zusammenhang mit einem ansteigenden Wärmestrom im Verdampfer. Die niedrigen Kaltwassereintrittstemperaturen lagen dicht an der Sättigungstemperatur des Wassers im Verdampfer. Entsprechend ist nur wenig Wasser verdampft und der übertragene Wärmestrom an das Kaltwasser war sehr gering. Mit steigender Kaltwassereintrittstemperatur wurde die Differenz zu der Sättigungstemperatur des Wassers höher und der übertragene Wärmestrom stieg an.

Der während der experimentellen Untersuchungen höchste erreichte COP von 0,74 wurde mit einer Kühlwassereintrittstemperatur von 35 °C und einer Kaltwassereintrittstemperatur von 28 °C erreicht. Es muss jedoch beachtet werden, dass diese Kaltwassertemperatur nicht im Klimatisierungsbereich liegt und der berechnete COP dementsprechend nicht in den regulären Anwendungsbereich fällt. Für den Klimatisierungsbereich von 8 °C bis 12 °C beträgt der während der experimentellen Untersuchungen maximal erreichte COP 0,51.

Der vom Hersteller angegebene Bereich von 0,71 unter den Referenzbedingungen aus Tabelle 13 wurde an der Anlage nicht erreicht.

Tabelle 13 Vergleich Referenzbedingungen zu Realbedingungen

	Referenzbedingungen [1]	Realbedingungen
Temperaturspreizung Heizwasser	90/80 °C	85/73 °C
Temperaturspreizung Kaltwasser	17/11 °C	17/14 °C
Temperaturspreizung Kühlwasser	30/36 °C	30/34 °C
Volumenstrom Heizwasser	$1,8 \frac{m^3}{h}$	$0,9 \frac{m^3}{h}$
Volumenstrom Kaltwasser	$1,9 \frac{m^3}{h}$	$2,2 \frac{m^3}{h}$
Volumenstrom Kühlwasser	$5,0 \frac{m^3}{h}$	$4,9 \frac{m^3}{h}$
COP	0,71	0,63

Unter den angegebenen Bedingungen, die von den Referenzbedingungen abweichen, wurde ein COP von 0,63 berechnet. Insbesondere weichen die Referenzbedingungen in der Eintrittstemperatur des Heizwassers ab, da das Heizwasser die Eintrittstemperatur von 90 °C nicht erreicht. Ebenfalls wurden unterschiedliche Temperaturdifferenzen zwischen der Eintritts- und Austrittstemperatur erreicht. Die Temperaturdifferenzen des Heizwassers sind höher, während die Temperaturdifferenzen für das Kalt- und Kühlwasser jeweils geringer ausfallen. Der Unterschied steht neben den unterschiedlichen Temperaturen des Heizwassers im Zusammenhang mit den Volumenströmen. Da der erreichte Volumenstrom des Heizwassers geringer als der doppelt so große Volumenstrom unter Referenzbedingungen ausfällt, ist die Temperaturdifferenz zwischen der Eintritts- und Austrittstemperatur des Heizwassers höher. Der gemessene Volumenstrom des Kaltwassers ist höher als der angegebene Volumenstrom unter Referenzbedingungen. Dementsprechend ist die Temperaturdifferenz des Kaltwassers geringer. Die Volumenströme des Kühlwassers sind ungefähr gleich. Dennoch ist die Temperaturdifferenz an der vorhandenen Anlage geringer. Dies kann mit der allgemein etwas niedrigeren Temperatur an der vorhandenen Anlage begründet werden, wodurch sich das Kühlwasser weniger aufwärmt.

6. Weiterentwicklung der Anlagenvisualisierung

Im folgenden Kapitel werden zunächst die vorgestellten Berechnungen und Näherungsgleichungen aus Kapitel 4 in LabVIEW implementiert. Im Anschluss wird die im Rahmen der vorliegenden Arbeit überarbeitete Visualisierung der Messwerte dargestellt.

Es werden Möglichkeiten für verschiedene Darstellungsarten der Messwerte aufgezeigt und die neue erarbeitete Visualisierung durch ein Diagramm dargestellt.

6.1 Implementierung der Berechnungen

In diesem Kapitel werden die vorgestellten Berechnungen aus Kapitel 4 in LabVIEW integriert.

6.1.1 Massenströme

Die vorhandenen VI wurden angepasst, um die Massenströme zu berechnen. Statt die konstante Dichte von Wasser anzunehmen, wird die Dichte des Antifrogen N-Gemisches in Abhängigkeit der gemessenen Temperatur und der mit dem Aräometer bestimmten Konzentration berechnet. Die bestimmte Konzentration wird an der Bedienoberfläche manuell eingegeben. Das erstellte Blockdiagramm ist in Abbildung 34 abgebildet. Die weiteren erstellten VI sind im Anhang angefügt.

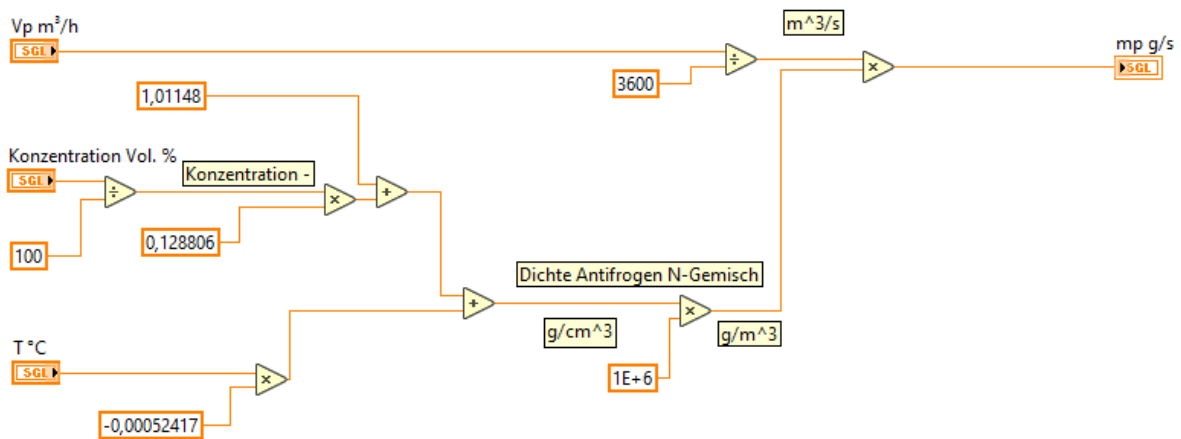


Abbildung 34 Blockdiagramm Massenstrom des Kaltwassers

In Abbildung 35 ist das neue Blockdiagramm dargestellt, um den Massenstrom der kältemittelreichen LiBr-Lösung aus dem Absorber zu berechnen. Als Eingangsparameter werden neben dem gemessenen Volumenstrom drei Temperaturen benötigt, um zunächst die Konzentration der Lösung zu berechnen. Neben der Temperatur im Verdampfer wird die Temperatur für den Absorber benötigt, welche sich aus dem arithmetischen Mittelwert aus der Eintritts- und Austrittstemperatur der Lösung zusammensetzt. Aus der bestimmten Konzentration wird durch die Gleichung [4.16] die Dichte berechnet. Aus der Dichte wird anschließend der Massenstrom berechnet und als Ausgabewert weitergegeben.

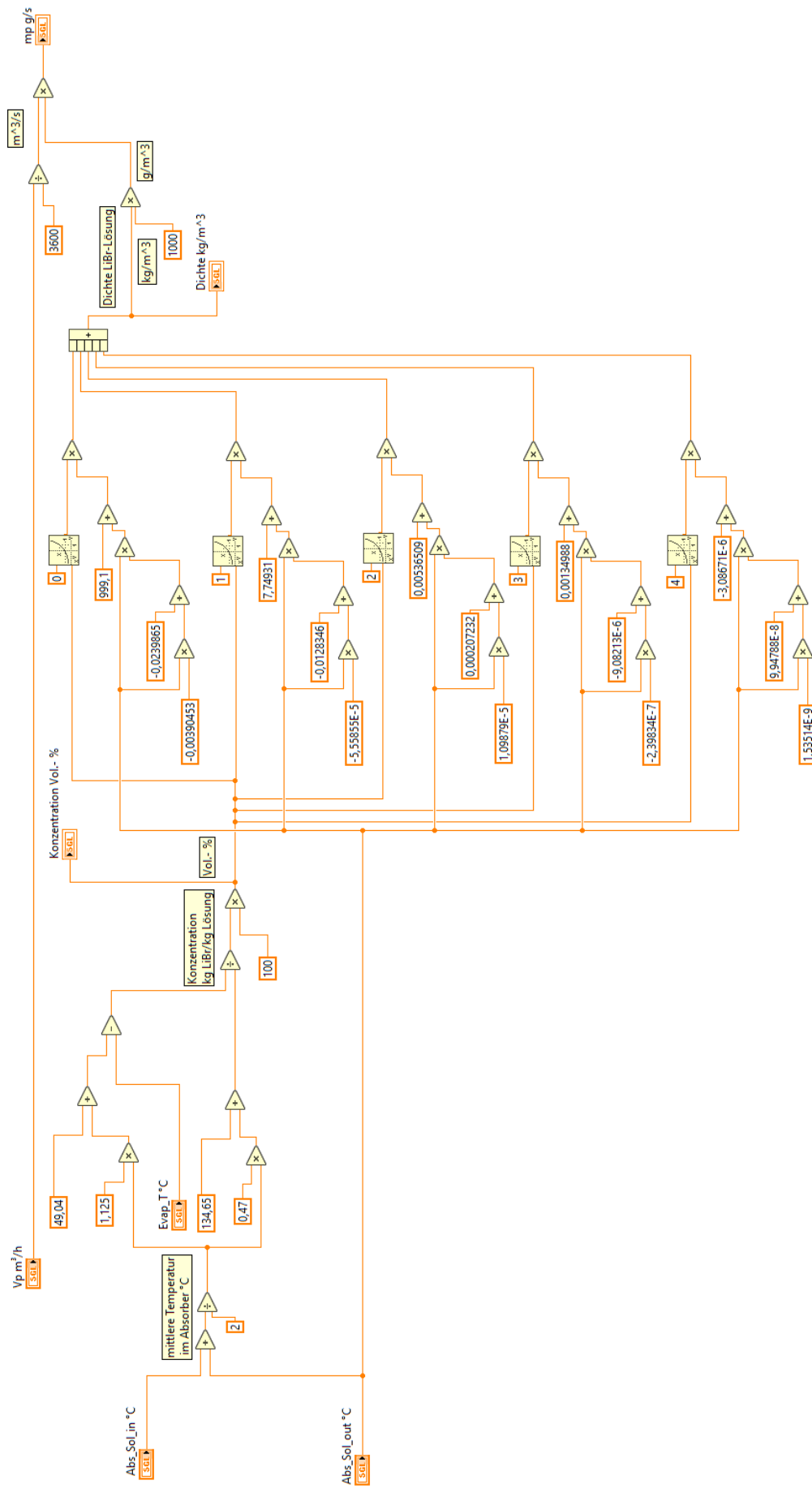


Abbildung 35 Blockdiagramm Massenstrom der kältemittelreichen Lösung

Um den Massenstrom der kältemittelarmen Lösung aus dem Generator zu berechnen, wird analog vorgegangen. Das zugehörige Blockdiagramm ist im Anhang angefügt.

6.1.2 Spezifische Wärmekapazität und übertragener Wärmestrom

Neben den unterschiedlichen Dichten musste die spezifische Wärmekapazität angepasst werden. In Abbildung 36 ist das Blockdiagramm für das Antifrogen N-Gemisch dargestellt. Die multiple lineare Regression wurde mit den für das Gemisch bestimmten Koeffizienten eingefügt.

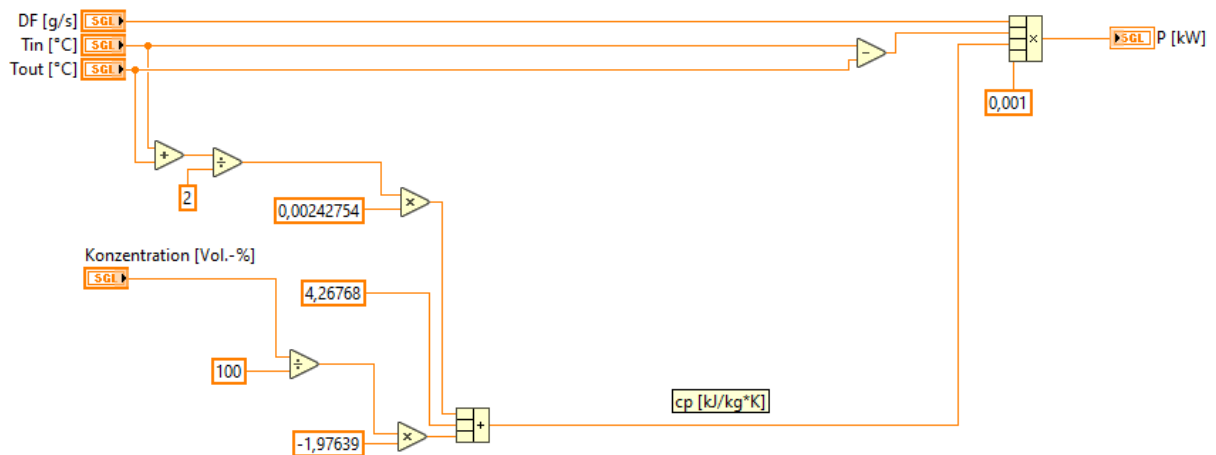


Abbildung 36 Blockdiagramm Berechnung Wärmestrom des Kaltwassers

In Abbildung 37 ist das neue Blockdiagramm dargestellt, um den übertragenen Wärmestrom der kältemittelarmen Lösung im Wärmeübertrager zu berechnen. Als Eingangsparameter werden neben den Eingangs- und Ausgangstemperaturen in den Wärmeübertrager der zuvor berechnete Massenstrom sowie die Konzentration der LiBr-Lösung benötigt. Das Blockdiagramm für die kältemittelreiche Lösung ist mit Ausnahme der Anschlüsse identisch.

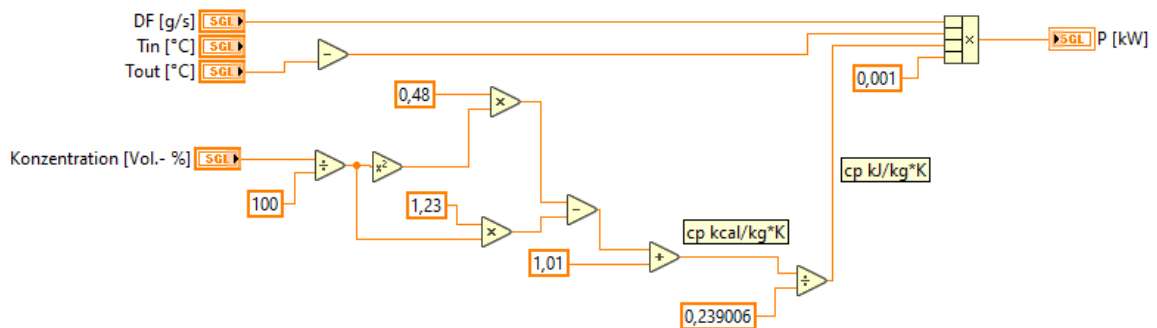


Abbildung 37 Blockdiagramm Berechnung Wärmestrom der kältemittelarmen Lösung

6.2 Anlagenvisualisierung

Die ursprüngliche visualisierte Anlage durch eine Grafik mit zu geringer Auflösung aus den Herstellerunterlagen wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit erneuert. Für die Darstellung der Daten wurden verschiedene Modelle entwickelt.

Das neue Frontpanel wird durch drei Registerkarten unterteilt. In der ersten Registerkarte „Übersicht“ wird die Anlage mit den Messwerten dargestellt. In der zweiten Registerkarte „Dübling-Diagramm“ werden die Messdaten grafisch im Dühring-Diagramm visualisiert. Die dritte Registerkarte „Eingabewerte“ wird aufgerufen, wenn sich an den Stoffdaten des Antifrogen N-Gemisches Änderungen ergeben haben.

Es wurde für alle erstellten Grafiken darauf geachtet, dass die zur Verfügung stehende Fläche ausgefüllt wird.

In der erstellten Grafik in Abbildung 38 wurde Wert darauf gelegt, dass alle Rohrleitungen und Pumpen an den korrekten Positionen dargestellt werden. Die Anlage wird allerdings insbesondere aufgrund der Pumpe M6 sehr unübersichtlich dargestellt, da die mit der Pumpe verbundene Rohrleitung fünf weitere Leitungen durchkreuzt.

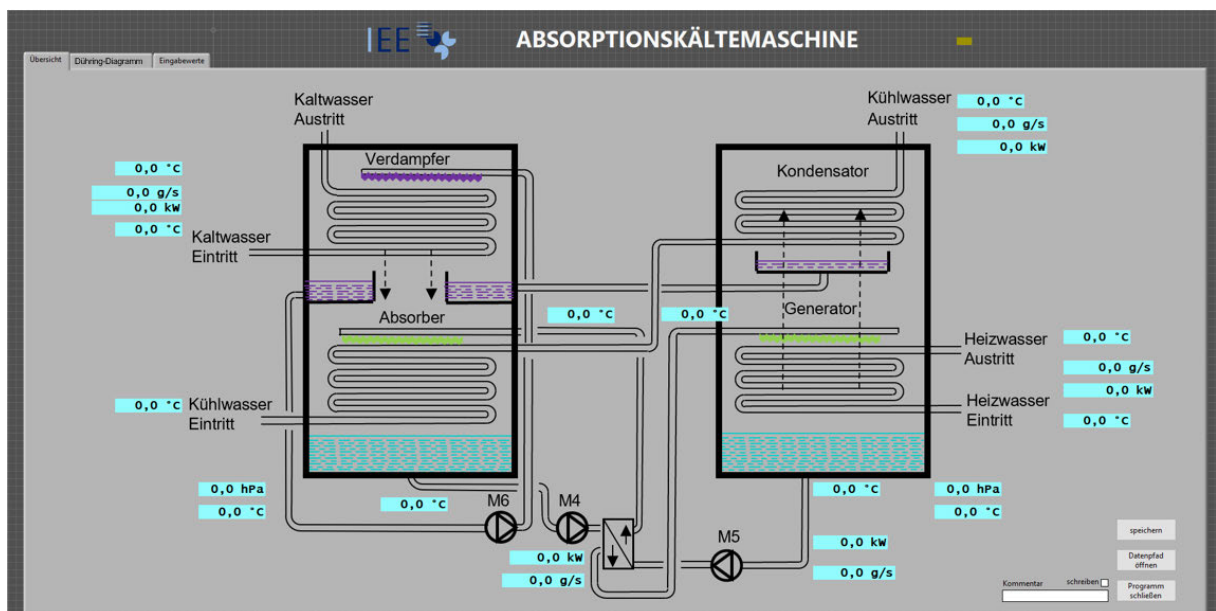


Abbildung 38 Frontpanel Übersicht mit transparenten Rohren und Rundungen

In Abbildung 39 wurde die Pumpe M6 direkt am Generator angeordnet. Dadurch wurden weniger Überschneidungen der Rohre sowie eine bessere Übersicht rund um den Platten-Wärmeübertrager erreicht. Die Beschriftung direkt an den Ein- sowie Auslässen wurde weggelassen und eine Legende ergänzt. Im Vergleich zu der Grafik des Herstellers wurde für beide Lösungen „LiBr + H₂O“ verwendet, da in keinem Zustand reines Lithium auftritt. Dafür wurden die Zusätze „kältemittelreiche Lösung“, beziehungsweise „kältemittelarme Lösung“ ergänzt.

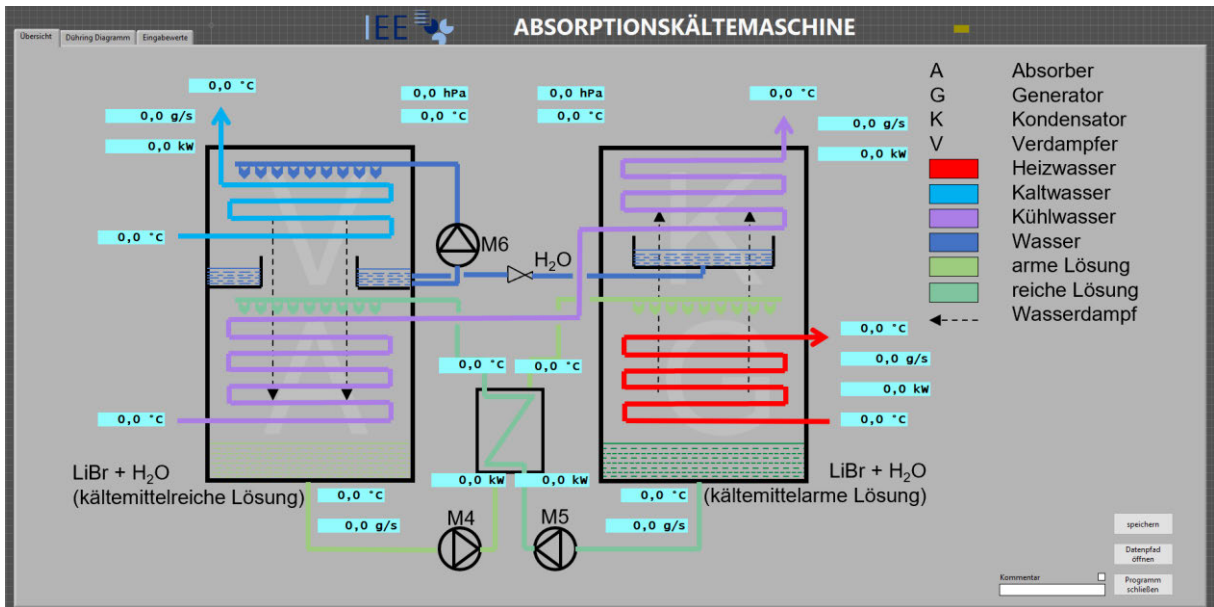


Abbildung 39 Frontpanel Übersicht mit Legende und farbigen Rohren

6.3 Darstellung im Dühring-Diagramm

Neben der Übersicht mit den Messdaten werden die Daten auch in einem Diagramm grafisch visualisiert. Aufgrund der logarithmischen Skalierung mit nicht linearer Teilung für den Druck wurde eine logarithmische Regression für die Umrechnung des gemessenen Drucks in die linear aufgetragene Kältemitteltemperatur für das verwendete Diagramm aufgestellt.

Die Umrechnungsformel lautet:

$$\vartheta(p) = 21,319 \cdot \ln(p) + 7 \quad [6.1]$$

Der Druck p wird in der Einheit kPa in die Formel eingesetzt.

Durch die Formel kann der gemessene Druck auf der Ordinatenachse in Abhängigkeit der gemessenen Temperaturen aufgetragen werden. Ein Messpunkt ist beispielhaft im Dühring-Diagramm in Abbildung 40 dargestellt. Das zugehörige Blockdiagramm von LabVIEW ist im Anhang angefügt.

Die eingetragenen Messwerte befinden sich nicht paarweise auf einer Konzentrationslinie des Diagramms. Die Konzentrationslinie von 0 % für das Wasser ohne LiBr-Anteil wird nicht exakt erreicht und die weiteren Konzentrationen liegen nicht paarweise exakt auf einer Konzentrationslinie. Dies ist jedoch nicht auf das Diagramm, sondern auf die Messwerte zurückzuführen.

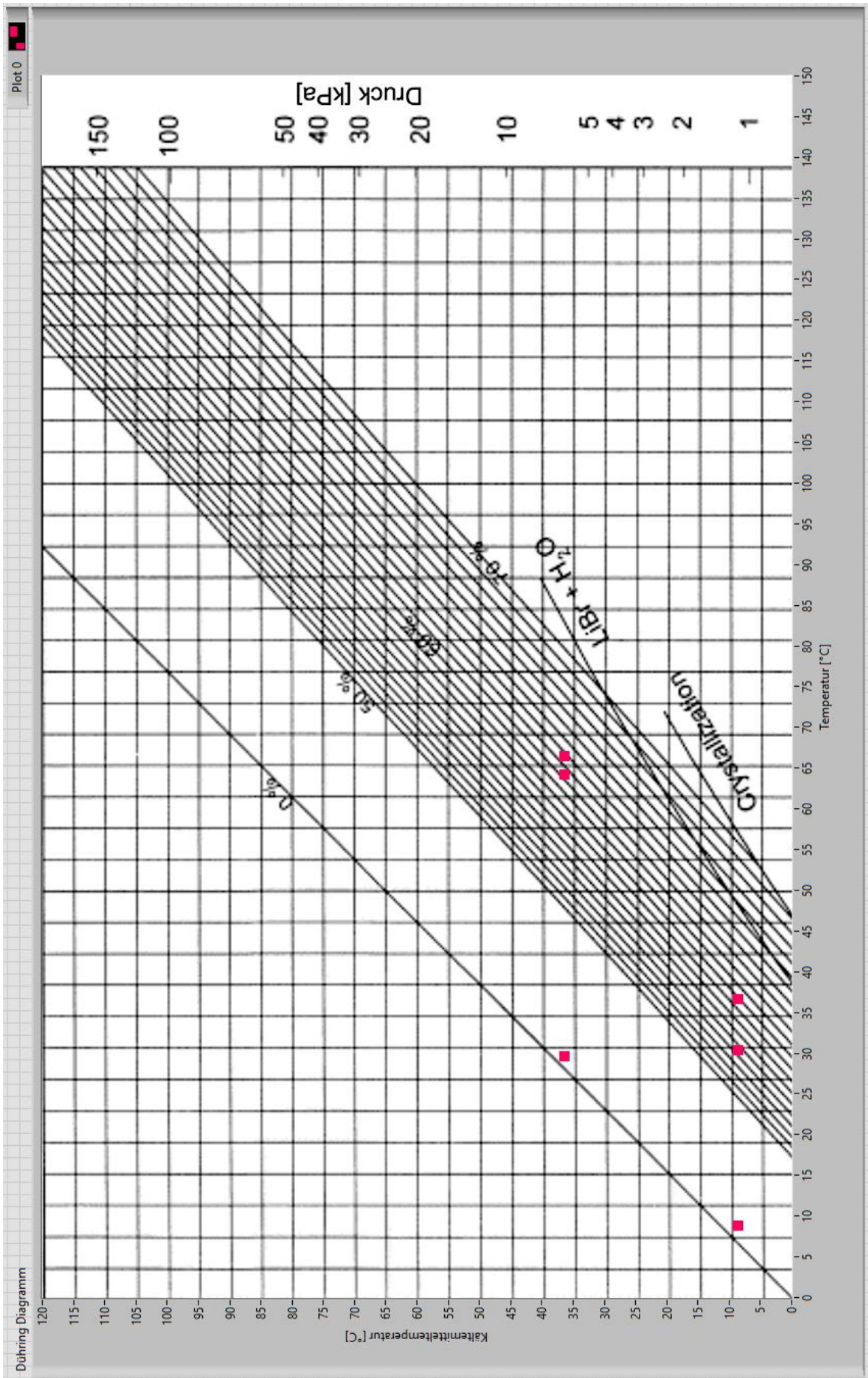


Abbildung 40 Dühring-Diagramm mit LabVIEW

7. Zusammenfassung und Fazit

Ziel dieser Arbeit war die Bilanzierung der in der Absorptionskältemaschine übertragenen Wärmeströme und die Visualisierung der berechneten Daten. Es wurden Stoffdaten für das Antifrogen N-Gemisch und die LiBr-Lösung recherchiert und Näherungsgleichungen aufgestellt. Experimentelle Untersuchungen wurden an der Anlage durchgeführt und ausgewertet. Die Untersuchungen haben ergeben, dass an der Anlage aufgrund der Fehlerinflüsse unter den vorhandenen Betriebsbedingungen aus der Bilanz während einer Labordurchführung mit begrenzt verfügbarer Zeit keine Aussage über den Betrag des Wärmestroms an die Umgebung getroffen werden kann. Dennoch können die Studenten durch die aufgestellte Bilanz die thermodynamischen Zusammenhänge verstehen und feststellen, dass die Größenordnung des an die Umgebung abgegebenen Wärmestroms im Vergleich zu den übertragenen Wärmeströmen der Fluide gering zu sein scheint.

Die berechneten und gemessenen Werte wurden durch eine erstellte Grafik visualisiert. Durch das Dühring-Diagramm werden die gemessenen Werte übersichtlich dargestellt.

Es gibt noch weitere Möglichkeiten, die Anlage für den Laborbetrieb zu optimieren. Eine manuell zu regelnde Mischung des Heizwassers mit dem Kühlwasser könnte in den Heizkreislauf implementiert werden, um auch Auswirkungen von schwankenden Heizwasser-eintrittstemperaturen untersuchen zu können. Werden die Leitungen der Heizwasserzufuhr auch an den nicht isolierten Stellen mit einer Isolation versehen, kann die Heizwasser-eintrittstemperatur erhöht werden. Dadurch würden die Betriebsbedingungen des Herstellers angenähert werden.

Es könnten weitere experimentelle Untersuchungen mit deutlich längeren Wartezeiten durchgeführt werden, um einen annähernd stationären Zustand erreichen zu können. Die Ergebnisse könnten zu aussagekräftigeren Daten führen und den Studenten als Rohdaten zur Verfügung gestellt werden, um diese im Anschluss an die Labordurchführung auswerten zu können.

Durch den Inhalt dieser Arbeit können ein Laborskript für die Studenten erstellt und Versuche durchgeführt werden. Als geeignete Parameter für aussagekräftige Betriebspunkte haben sich Werte für die Kaltwasserbeheizung von 2 kW bis 6 kW mit einer Kühlwassereintrittstemperatur von circa 30 °C erwiesen.

Literaturverzeichnis

- [1] Abderhalden Fluids AG: Antifrogen N. "http://www.abderhaldenfluids.ch/images/antifrogen/pdf/Antifrogen_N_TM_de.pdf", Abruf am 07. 01 2022.
- [2] Albers, J.: Erweiterung einer Berechnungsmethode für die Regelung von Absorptionskälteanlagen. Berlin, 2019.
- [3] Bock, W.; et al.: Taschenbuch der Kältetechnik. Essen, 2013.
- [4] Chua, H. T.; et al.: Improved thermodynamic propertyfields of LiBr-H₂O solution. International Journey of Refrigeration 23, S. 412-429, 2000.
- [5] Clariant AG: "<https://www.clariant.com/de/Business-Units/Industrial-and-Consumer-Specialties/Heat-Transfer-Fluids/Calculator>", Abruf am 10.01.2022.
- [6] EAW Energieanlagenbau GmbH Westenfeld: Montage- und Bedienungsanleitung Wegracel SE15.
- [7] EAW Energieanlagenbau GmbH Westenfeld: Prüfstand Hamburg Wegracel SE15.
- [8] Endress und Hauser: Technische Dokumentation Drucktransducer. "https://portal.endress.com/wa001/dla/5000557/7705/000/06/TI00415PDE_1815.pdf", Abruf am 08.01.2022.
- [9] Georgi, W.; Hohl, P.: Einführung in LabVIEW. Carl Hanser Verlag, Weingarten, 2015.
- [10] Herold, K.; Radermacher, R.; Klein, S.: Absorption Chillers and Heat Pumps. CRC Press, 2016.
- [11] InfrarotTec Systems: Emissionsgrad-Tabelle. <https://www.flir-infrarotkameras.de/FLIR-Technik-und-Funktionen/Emissionsgrad-Tabelle>, Abruf am 24.02.2022.
- [12] International Energy Agency: The Future of Cooling Opportunities for energy-efficient air conditioning. "https://iea.blob.core.windows.net/assets/0bb45525-277f-4c9c-8d0c-9c0cb5e7d525/The_Future_of_Cooling.pdf", Abruf am 06.02.2022.
- [13] Kahn, R.: Ein Ammoniak-Wasser Absorptionskreislauf für hohen Temperaturhub. Technische Universität München, Institut für Festkörperphysik und Technische Physik, 1995.
- [14] Krohne Messtechnik GmbH: Krohne Optiflux 1000 Handbuch. "https://cdn.krohne.com/pick2/tagged_docs/MA_OPTIFLUX1000_de_191024_4001323905_R05___1000630545_1__.pdf", Abruf am 08.01.2022.
- [15] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik. Carl Hanser Verlag, Mittweida, 2014.
- [16] Lansing, F. L.: Computer-Modeling of a Single-Stage Lithium Bromide/Water Absorption Refrigeration Unit. Nasa, Kalifornien, 1976.
- [17] Lee, H.-R., et al.: Thermodynamic design data and performance evaluation of the water + lithium bromide + lithium iodide + lithium nitrate + lithium chloride system for absorption chiller. Pergamon Verlag, Ansan, 2000.
- [18] Niebergall, W.: Handbuch der Kältetechnik Band 7. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und New York, 1981.
- [19] Maurer, T.: Kältetechnik für Ingenieure. VDE Verlag, Gießen, 2016.
- [20] S+S Regeltechnik GmbH: Bedienungs- und Montageanleitung Kabeltemperaturfühler. Nürnberg, 2021.

Anhang

A Messwerte

In Tabelle 14 sind die Messwerte tabellarisch zusammengefasst. Es handelt sich jeweils um den berechneten arithmetischen Mittelwert aus den letzten 10 Messwerten, nachdem ein stationärer Zustand angenommen wurde.

Tabelle 14 Zusammenfassung der Messwerte

$T_{\text{KWa, ein, Sol}} [^{\circ}\text{C}]$	$P_{\text{Heizung}} [\text{kW}]$	$T_{\text{HeWa, ein}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{HeWa, aus}} [^{\circ}\text{C}]$	$\dot{V}_{\text{HeWa}} [\text{m}^3/\text{h}]$	$T_{\text{KWa, ein}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{KWa, aus}} [^{\circ}\text{C}]$	$\dot{V}_{\text{KWa}} [\text{m}^3/\text{h}]$	$T_{\text{HeWa, ein}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{HeWa, aus}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{KWa, aus}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{KWa, ein}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{KWa}} [\text{m}^3/\text{h}]$
25	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
25	2	85,46	73,18	0,93	25,03	28,02	4,86	8,02	6,37	8,02	6,37	2,14
25	4	85,06	74,26	0,93	25,00	27,83	4,85	8,82	7,02	8,82	7,02	2,14
25	6	85,13	73,56	0,91	25,01	28,43	4,86	13,20	10,36	13,20	10,36	2,15
25	8	84,77	70,94	0,91	24,62	28,90	4,86	17,52	13,58	17,52	13,58	2,16
25	10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
25	12	85,38	64,24	0,90	24,98	31,54	4,88	26,71	20,84	26,71	20,84	2,18
30	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
30	2	85,47	72,51	0,90	30,06	32,75	4,90	7,73	6,68	7,73	6,68	2,09
30	4	84,98	75,69	0,89	29,96	32,50	4,91	9,31	7,24	9,31	7,24	2,09
30	6	85,00	74,97	0,89	30,24	33,11	4,93	12,32	9,58	12,32	9,58	2,09
30	8	84,90	72,68	0,89	30,27	34,00	4,91	17,40	13,58	17,40	13,58	2,11
30	10	84,78	71,60	0,89	30,32	34,55	4,92	20,47	15,94	20,47	15,94	2,11
30	12	85,60	68,99	0,89	30,22	35,39	4,92	25,07	19,73	25,07	19,73	2,12
35	0	85,76	77,86	0,87	34,55	36,31	4,85	6,15	5,35	6,15	5,35	2,13
35	2	85,21	77,03	0,87	35,68	37,55	4,87	9,76	8,47	9,76	8,47	2,14
35	4	84,35	76,24	0,87	34,49	36,80	4,86	11,39	9,37	11,39	9,37	2,14
35	6	85,48	75,20	0,87	35,47	38,91	4,88	16,34	13,68	16,34	13,68	2,15
35	8	85,05	72,82	0,87	35,22	38,85	4,89	20,81	17,07	20,81	17,07	2,16
35	10	85,34	71,29	0,86	34,92	39,24	4,89	24,47	19,90	24,47	19,90	2,16
35	12	85,11	69,94	0,86	35,28	40,09	4,87	27,95	22,71	27,95	22,71	2,17
$T_{\text{KWa, ein, Sol}} [^{\circ}\text{C}]$ <th>$P_{\text{Heizung}} [\text{kW}]$</th> <th>$T_V [^{\circ}\text{C}]$</th> <th>$P_V [\text{hPa}]$</th> <th>$P_K [\text{hPa}]$</th> <th>$T_K [^{\circ}\text{C}]$</th> <th>$T_{\text{Libr, A, aus}} [^{\circ}\text{C}]$</th> <th>$T_{\text{Libr, S, ein}} [^{\circ}\text{C}]$</th> <th>$\dot{V}_{\text{Libr, S}} [\text{m}^3/\text{h}]$</th> <th>$T_{\text{Libr, S, aus}} [^{\circ}\text{C}]$</th> <th>$T_{\text{Libr, A, ein}} [^{\circ}\text{C}]$</th> <th>$V_{\text{Libr, A}} [\text{m}^3/\text{h}]$</th>	$P_{\text{Heizung}} [\text{kW}]$	$T_V [^{\circ}\text{C}]$	$P_V [\text{hPa}]$	$P_K [\text{hPa}]$	$T_K [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{Libr, A, aus}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{Libr, S, ein}} [^{\circ}\text{C}]$	$\dot{V}_{\text{Libr, S}} [\text{m}^3/\text{h}]$	$T_{\text{Libr, S, aus}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{Libr, A, ein}} [^{\circ}\text{C}]$	$V_{\text{Libr, A}} [\text{m}^3/\text{h}]$	
25	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
25	2	5,51	8,78	39,39	29,16	27,56	63,16	0,39	65,33	35,01	0,37	
25	4	5,78	9,10	39,02	29,09	28,58	64,47	0,38	66,91	36,01	0,37	
25	6	8,72	10,79	39,81	29,54	30,32	64,16	0,39	66,46	36,64	0,37	
25	8	11,29	12,80	41,13	30,24	29,19	61,92	0,41	65,05	35,85	0,39	
25	10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
25	12	17,65	19,22	49,37	33,16	28,73	56,20	0,45	60,09	33,58	0,42	
30	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
30	2	6,13	9,19	50,24	33,50	32,27	63,72	0,40	63,83	37,34	0,36	
30	4	6,10	9,15	49,12	33,30	35,09	67,29	0,38	66,96	40,15	0,37	
30	6	7,96	10,32	51,00	33,87	35,78	66,76	0,39	67,00	40,19	0,37	
30	8	11,39	12,94	53,80	34,78	35,76	64,70	0,40	65,77	39,47	0,38	
30	10	13,39	14,69	55,55	35,32	35,97	63,89	0,40	64,70	39,47	0,37	
30	12	16,74	18,32	58,04	36,25	34,05	61,55	0,41	63,09	38,65	0,38	
35	0	5,42	8,48	60,00	36,91	34,80	70,05	0,39	68,64	42,81	0,38	
35	2	8,24	10,20	64,24	37,63	35,32	69,62	0,40	69,30	43,46	0,39	
35	4	8,60	10,51	61,81	37,46	35,92	68,88	0,40	68,54	43,06	0,39	
35	6	12,17	13,57	68,38	39,05	36,07	68,13	0,42	66,34	43,34	0,40	
35	8	14,97	16,21	69,55	39,44	36,77	66,15	0,43	65,54	42,83	0,41	
35	10	17,34	18,87	71,37	39,92	37,59	64,84	0,44	64,95	42,61	0,42	
35	12	19,88	22,21	74,70	40,79	37,88	63,77	0,44	64,47	42,52	0,42	

B Auswertung

Tabelle 15 Zusammenfassung der Auswertung

$T_{KüW,ein,soil}$ [°C]	$P_{Heizung}$ [kW]	$\dot{m}_{HeW,e}$ [g/s]	$Q_{HeW,e}$ [kW]	$\dot{m}_{KW,e}$ [g/s]	$Q_{KW,e}$ [kW]	$P_{KW,e}$ [kW]	$\dot{m}_{KW,e}$ [kg/m ³]	$\dot{m}_{KW,e}$ [g/s]	$c_{p,KW,e}$ [kJ/(kg*K)]	$Q_{KW,e}$ [kW]	P_{el} [kW]	COP [-]	Q_{U} [kW]
25	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
25	2	257	13,2	1349	-16,9	x	1062	630	3,44	3,6	0,4	0,26	0,33
25	4	257	11,7	1347	-16,0	x	1062	631	3,44	3,9	0,4	0,32	0,01
25	6	254	12,4	1349	-19,3	x	1060	633	3,45	6,2	0,4	0,49	-0,35
25	8	253	14,7	1351	-24,2	x	1058	635	3,46	8,6	0,4	0,57	-0,48
25	10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
25	12	250	22,2	1357	-37,2	x	1053	637	3,48	13,0	0,4	0,57	-1,65
30	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
30	2	249	13,6	1362	-15,3	x	1062	616	3,44	2,2	0,4	0,16	0,89
30	4	248	9,7	1363	-14,5	x	1062	615	3,44	4,4	0,4	0,43	-0,02
30	6	246	10,4	1368	-16,4	x	1060	617	3,44	5,8	0,4	0,54	0,17
30	8	247	12,7	1363	-21,2	x	1058	619	3,46	8,2	0,4	0,63	0,00
30	10	246	13,6	1366	-24,2	x	1056	620	3,46	9,7	0,4	0,69	-0,40
30	12	246	17,2	1367	-29,6	x	1054	622	3,47	11,5	0,4	0,66	-0,44
35	0	242	8,0	1348	-10,0	x	1063	628	3,43	1,7	0,4	0,21	0,21
35	2	241	8,3	1353	-10,6	x	1061	630	3,44	2,8	0,4	0,32	0,90
35	4	242	8,3	1349	-13,1	x	1061	630	3,44	4,4	0,4	0,51	-0,02
35	6	241	10,4	1355	-19,5	x	1058	632	3,45	5,8	0,4	0,54	-2,87
35	8	241	12,4	1357	-20,6	x	1056	633	3,46	8,2	0,4	0,64	0,40
35	10	240	14,2	1358	-24,6	x	1054	634	3,47	10,1	0,4	0,69	0,07
35	12	239	15,2	1354	-27,2	x	1052	634	3,48	11,6	0,4	0,74	-0,07
$T_{KüW,ein,soil}$ [°C]	$P_{Heizung}$ [kW]	$x_{LUB,KR}$ [%]	$P_{LUB,KR}$ [kW]	$\dot{m}_{LUB,KR}$ [g/s]	$Q_{LUB,KR}$ [kJ/(kg*K)]	$Q_{LUB,KR}$ [kW]	$x_{LUB,KR}$ [kg/m ³]	$\dot{m}_{LUB,KR}$ [g/s]	$P_{LUB,KR}$ [kJ/(kg*K)]	$c_{p,LUB,KR}$ [kJ/(kg*K)]	$\dot{m}_{LUB,KR}$ [kg/m ³]	$Q_{LUB,KR}$ [kW]	$Q_{U,WU}$ [kW]
25	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
25	2	53	1578	182	2,07	2,07	9,2	63	1,77	1,71	1,763	1,77	-9,8
25	4	53	1584	182	2,06	2,06	9,2	64	1,76	1,69	1,766	1,76	-9,9
25	6	52	1561	182	2,10	2,10	9,0	63	1,77	1,70	1,757	1,77	-9,6
25	8	50	1524	187	2,17	2,17	9,1	62	1,80	1,74	1,734	1,80	-9,9
25	10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
25	12	45	1445	193	2,33	2,33	9,0	59	1,89	1,79	1,671	1,89	-9,7
30	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
30	2	54	1604	173	2,02	2,02	8,6	61	1,84	1,77	1,707	1,84	-8,4
30	4	56	1632	175	1,97	1,97	8,5	62	1,82	1,74	1,721	1,82	-8,6
30	6	55	1612	178	2,00	2,00	8,6	61	1,83	1,75	1,710	1,83	-8,7
30	8	52	1569	179	2,08	2,08	8,6	60	1,86	1,76	1,688	1,86	-8,8
30	10	51	1547	172	2,12	2,12	8,2	59	1,88	1,72	1,676	1,88	-8,2
30	12	48	1499	176	2,21	2,21	8,0	58	1,91	1,72	1,658	1,91	-8,2
35	0	57	1653	180	1,94	1,94	8,7	60	1,86	1,81	1,691	1,86	-8,6
35	2	56	1624	179	1,99	1,99	8,8	59	1,88	1,82	1,675	1,88	-8,7
35	4	55	1620	179	1,99	1,99	8,8	59	1,89	1,82	1,670	1,89	-8,6
35	6	53	1580	185	2,06	2,06	8,1	58	1,91	1,83	1,653	1,91	-8,1
35	8	51	1549	185	2,11	2,11	8,1	57	1,94	1,85	1,636	1,94	-8,1
35	10	50	1526	188	2,15	2,15	8,1	57	1,95	1,85	1,625	1,95	-8,2
35	12	48	1500	188	2,20	2,20	8,0	56	1,98	1,85	1,609	1,98	-8,2

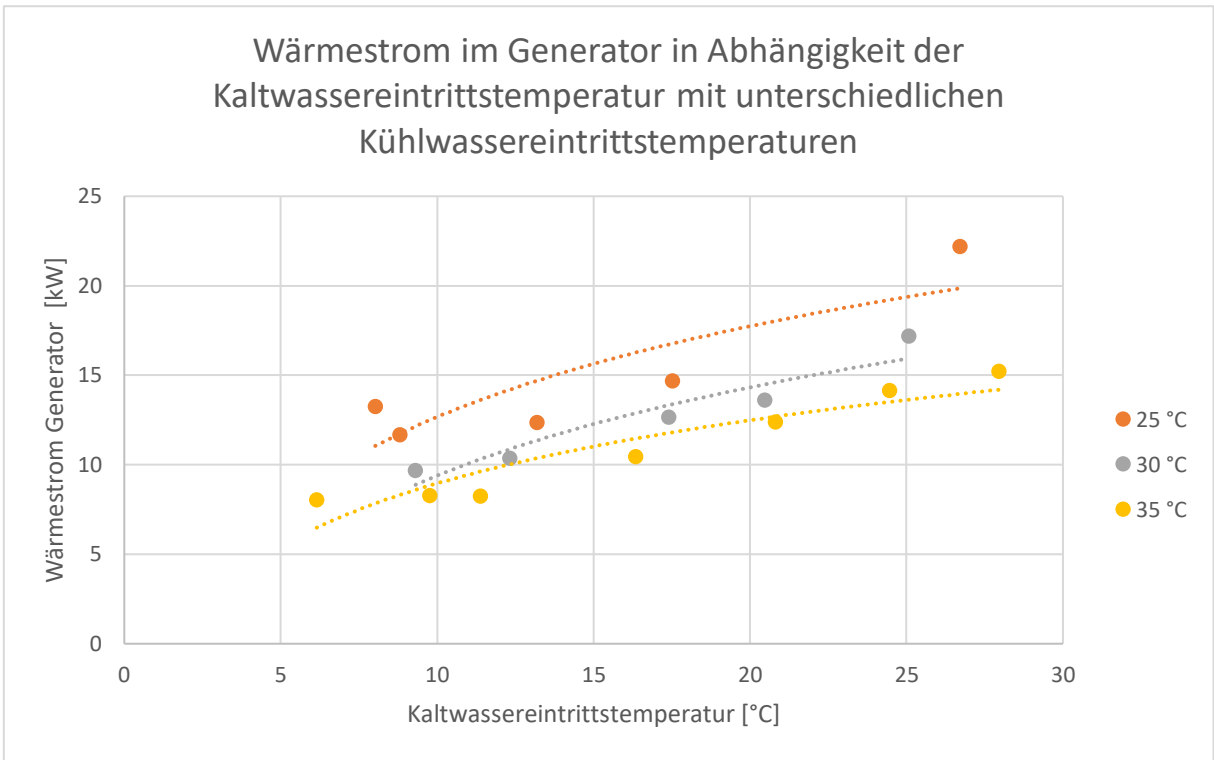


Abbildung 41 Wärmestrom im Generator

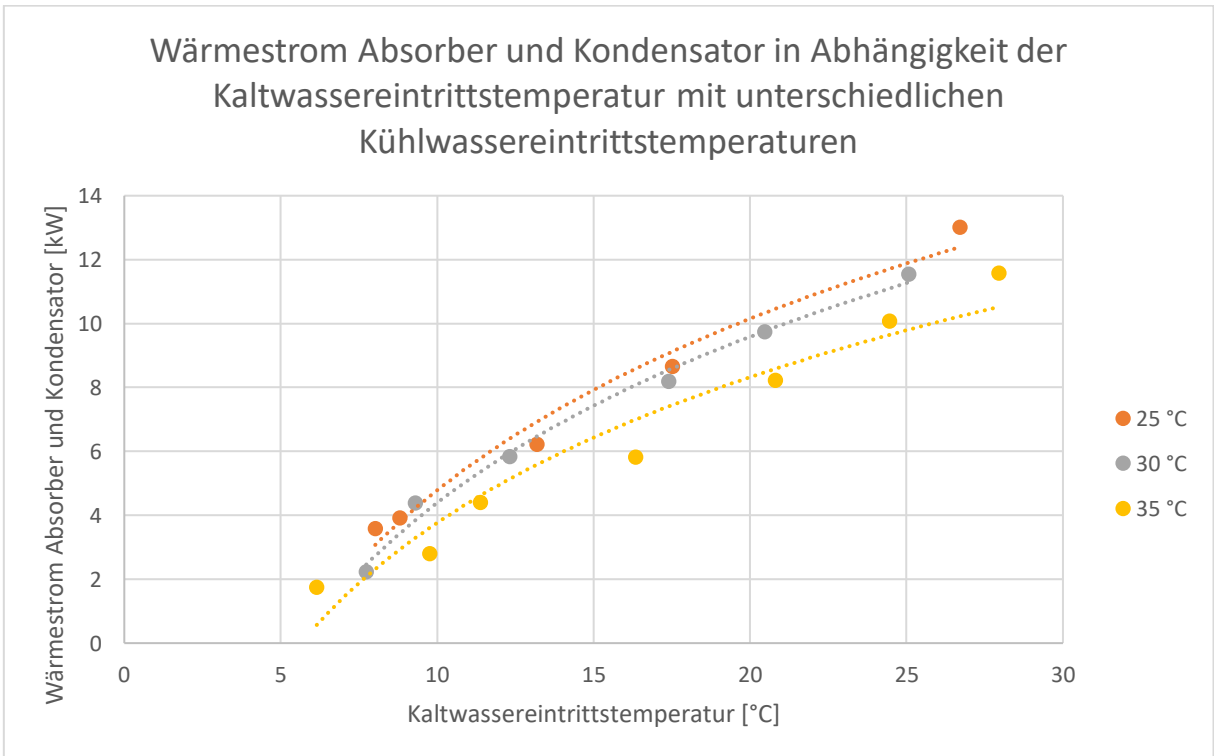


Abbildung 42 Wärmestrom im Absorber und Kondensator

C R&I Fließbild

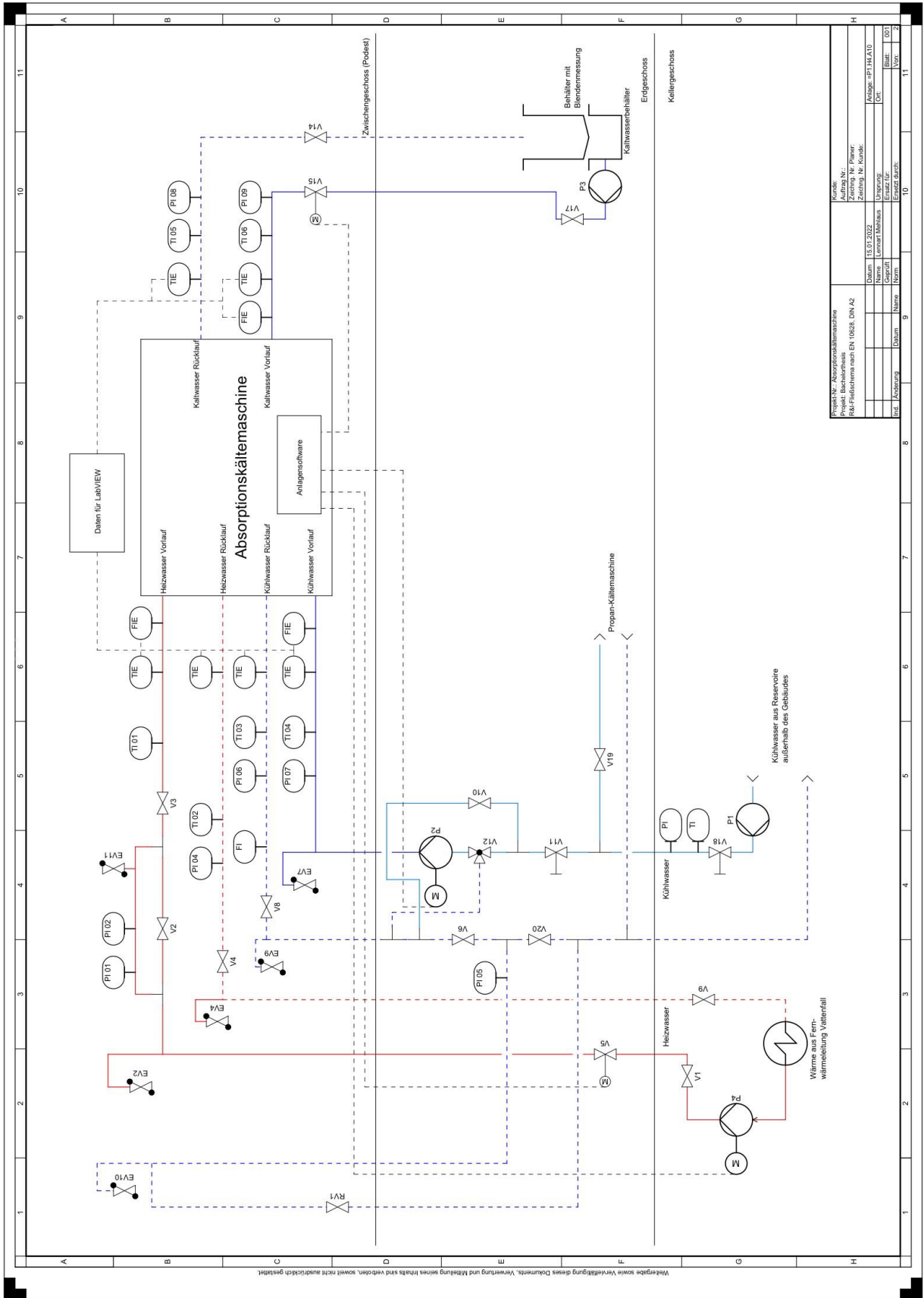


Abbildung 43 R&I Fließbild

D Blockdiagramme LabVIEW

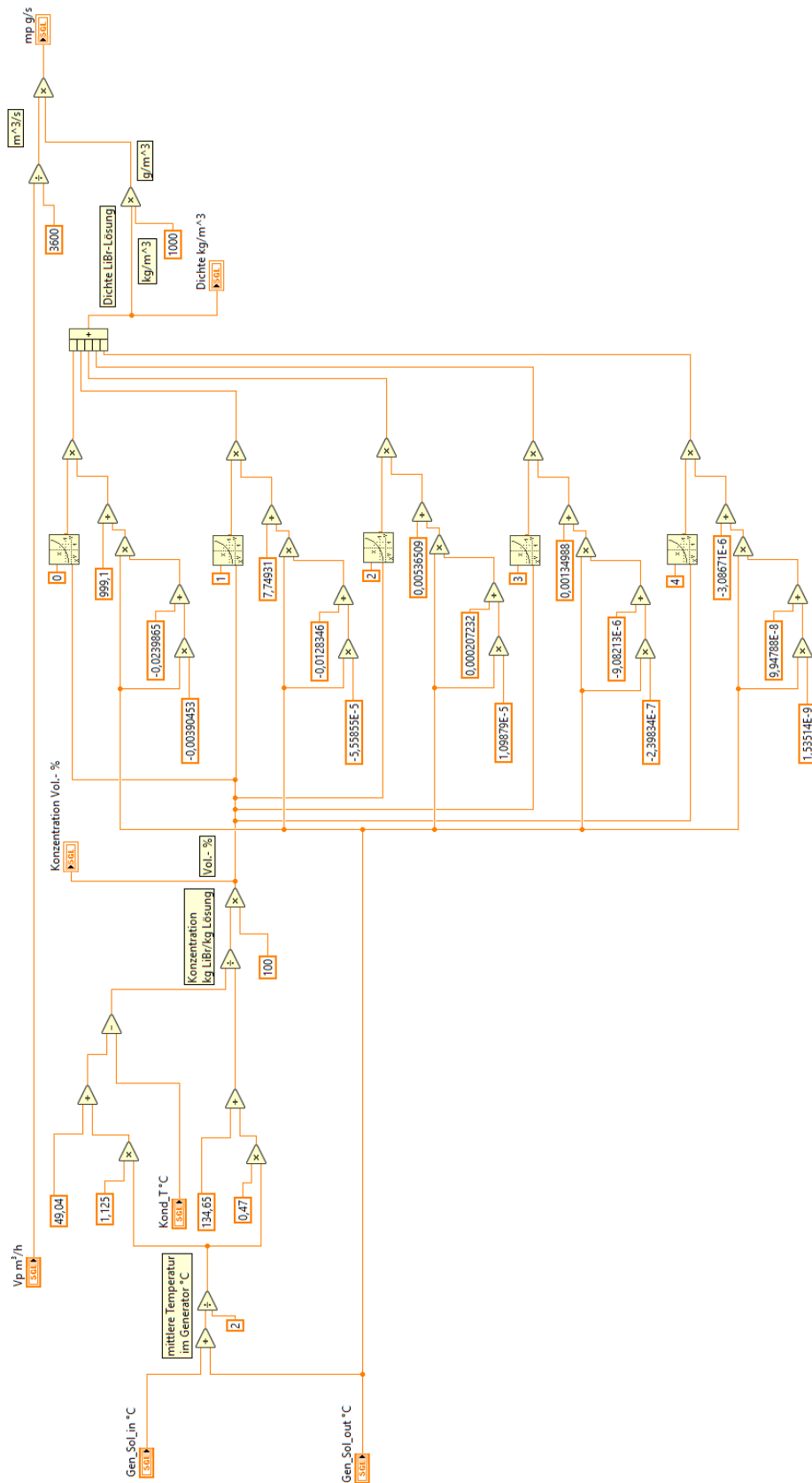


Abbildung 44 Blockdiagramm Massenstrom der kältemittelfreien Lösung

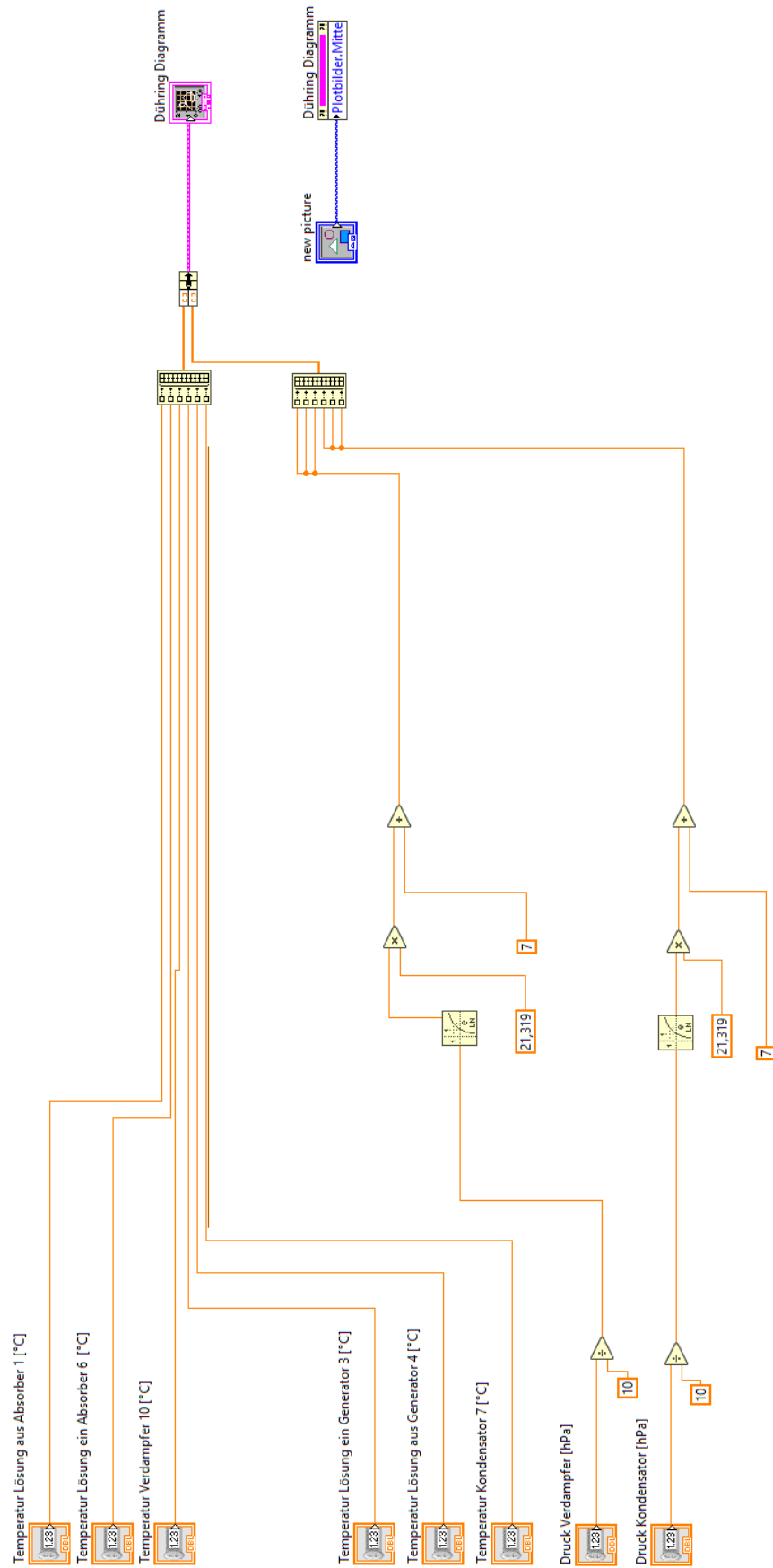


Abbildung 45 Blockdiagramm Dührung-Diagramm



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Mehlaus

Vorname: Lennart

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Experimentelle Untersuchungen an einer Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskältemaschine und Weiterentwicklung der Anlagensoftware

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

-

Hanstedt

Ort

04.03.2022

Datum

[Redacted Signature]
Unterschrift im Original