

INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK UND
THERMODYNAMIK

Institute for Energy Systems and Thermodynamics

Diplomarbeit

Aufbau und Inbetriebnahme einer H₂O/LiBr Absorptionskältemaschine im Labormaßstab

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Werner

Institut für Energietechnik und Thermodynamik E302

eingereicht an der Technischen Universität Wien,
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften,

von

Valentin Ernst, BSc.

1029214

Obere Jungenberggasse 17, 1210 Wien

Wien, April 2018

Valentin Ernst

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung Diplomarbeit nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Des Weiteren erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, April 2018

Valentin Ernst

Abstract

Die vorliegende Arbeit umfasst den Aufbau und die Inbetriebnahme einer H₂O/LiBr - Absorptionskältemaschine im Labormaßstab, welche als funktionsfähiges Anschauungsobjekt im Unterricht Studenten die Funktionsweise einer Absorptionskältemaschine näher bringen soll. Die Auslegung und Berechnung der Anlage erfolgte in einer dieser vorhergehenden Diplomarbeit. Mit einer erwarteten Kälteleistung von etwa 1,5 kW fällt die Leistung der Anlage wesentlich geringer aus als jene von derzeit kommerziell erhältlichen Maschinen. Es erfolgt eine ausführliche Dokumentation der Aufbauarbeiten, der Änderungen zu der vorhergehenden Konstruktion und der während des Aufbaus entstandenen Probleme. Die Anlage wurde mit zahlreichen Sensoren für Druck, Temperatur und Volumenstrom versehen, um die im Betrieb auftretenden Wärmeströme und die Anlagencharakteristik zu erfassen. Zur Auswertung der Messdaten wurde eine SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) programmiert, wobei auch mathematische Formulierungen zur Berechnung von Stoffdaten der Lithiumbromidlösung integriert wurden. Eine Anlagensvisualisierung, um Trends in Echtzeit auszugeben, Prozesse bewerten zu können, sowie einen Überblick über die Funktion der Absorptionskältemaschine zu erlangen, wurde erstellt. Die für eine erfolgreiche Inbetriebnahme erforderlichen Tests, wie der Nachweis der Anlagendichtheit und Tests der internen Lösungskreisläufe und der externen Versorgungskreisläufe wurden durchgeführt. Nach Abschluss dieser Tests wurden einige Versuche absolviert.

The purpose of this work is the construction and the commissioning of a laboratory scale water-lithium bromide absorption chiller, which is intended as a functional object teaching students about the operating mode of absorption chillers. The design and calculation of the unit has been done in a previous master's thesis. With an expected cooling capacity of about 1.5 kW, the performance of the unit is much lower than that of currently commercially available machines. This work includes a detailed documentation of the construction work, the changes to the previous design and the problems which occurred during assembly. The unit was equipped with numerous sensors for pressure, temperature and volume flow in order to record the heat flows occurring during operation and the system characteristics. For the evaluation of the measured data a PLC (Programmable Logic Controller) was programmed, in which also mathematical formulations for the calculation of physical properties of the water-lithium bromide solution were integrated. A unit visualisation in order to be able to output trends in real time, to evaluate processes and to obtain an overview of the function of the absorption chiller has been created. The tests required for a successful commissioning, such as the

verification of unit leak tightness and testing of the internal solution circuits and the external supply circuits, were carried out. After completion of these tests, the system was launched for the first time.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Aufgabenstellung.....	1
1.1.1	Aufbau der Anlage	2
1.1.2	Programmieren der SPS	2
1.1.3	Inbetriebnahme	2
1.2	Anforderungen an die Maschine	2
1.3	Auslegungsdaten	3
2	Grundlagen von Absorptionskältemaschinen	6
2.1	Funktionsweise.....	6
2.1.1	Typ I.....	7
2.1.2	Typ II.....	9
2.1.3	Mehrstufige Absorptionskältemaschine	10
2.1.4	Verluste.....	11
2.2	Arbeitsmedium.....	12
2.3	Bauformen.....	13
2.3.1	Wasser/Lithiumbromid Absorptionskältemaschine	13
2.3.2	Ammoniak/Wasser Absorptionskältemaschine	14
2.4	Auslegung mittels Diagrammen	15
4	Aufbau der Anlage.....	21
4.1	Anlagenschema	21
4.2	Technische Gesamtzeichnung	24
4.2.1	Änderungen zu vormaliger Konstruktion	25
4.3	Elektrischer Schaltplan	27
4.4	Messstellen	28
4.5	Aufbauarbeiten	28
4.5.1	Probleme während des Aufbaus	30
5	Dichtheitsprüfung.....	31
5.1	Leckrate.....	31
5.2	Leckarten.....	32
5.3	Lecksuchverfahren	32

5.4	Prüfung der Wärmetauscher	34
5.4.1	Überdrucklecksuche durch Abdrücken mit Flüssigkeiten	34
5.4.2	Überdrucklecksuche durch Seifenblasentest	35
5.5	Prüfung der Gesamtanlage	35
5.5.1	Überdrucklecksuche durch Seifenblasentest	35
5.5.2	Überdrucklecksuche durch Druckabfallmessung	36
5.5.3	Vakuumlecksuche durch Druckanstiegmessung	38
5.6	Resümee Dichtheitsprüfung - Empfehlungen	42
6	Messtechnik	44
6.1	Temperaturmessung	44
6.2	Druckmessung	44
6.3	Volumenstrommessung	45
6.3.1	Volumenstrommessung der wasserführenden Kreisläufe	45
6.3.2	Volumenstrommessung der Kreisläufe mit Lithiumbromid	45
6.4	Konzentrationsmessung	49
6.5	Speicherprogrammierbare Steuerung	50
7	Software	51
7.1	Anforderungen an Software	51
7.2	Anlagenvisualisierung	51
7.2.1	Verbindung mit der SPS	52
7.2.2	Funktionen der Visualisierung	52
7.2.3	Erhebung der Messdaten	59
7.2.4	Berechnungsgrundlagen für die Software	61
8	Auslegungsprogramm EES - Erweiterung	65
9	Betrieb der Anlage	66
9.1	Prüfung vor Inbetriebnahme	66
9.2	Füllen und Entlüften der wasserführenden Kreisläufe	67
9.2.1	Heißwasserversorgung	67
9.2.2	Kühlwasserversorgung	67
9.3	Befüllen der Anlage mit Lithiumbromidlösung	67
9.4	Evakuierung	68
9.5	Konzentrationsmessung	68

9.6	Stillstand.....	69
9.7	Versuche.....	70
9.7.1	Versuch 1	70
9.7.2	Versuch 2	70
9.7.3	Versuch 3	72
10	Résumé.....	76
11	Verzeichnisse.....	78
11.1	Abkürzungen	78
11.2	Formelzeichen	79
11.3	Abbildungsverzeichnis.....	81
11.4	Tabellenverzeichnis	83
11.5	Formelverzeichnis	84
11.6	Literaturverzeichnis.....	85
12	Anhang.....	89
12.1	Technische Gesamtzeichnung	89
12.2	Elektrischer Schaltplan	96
12.3	Protokoll Dichtheitsprüfung Gesamtanlage	99
12.4	B&R Programmcode	102
12.4.1	Globale Variablen.....	102
12.4.2	Temperatur- und Drucksensoren.....	105
12.4.3	Temperaturregelung der Heizung.....	105
12.4.4	Volumenstromsensoren.....	106
12.4.5	Wärmeströme der wasserführenden Kreisläufe	108
12.4.6	Wärmestrom in Lithiumbromidlösung und Konzentrationswarnung.....	109
12.4.7	Datafile.....	112
12.4.8	Main.....	119
12.5	Datenblätter	121
12.5.1	Druckverlust Durchflusssensor FCH-m-ALU-IND Art.-Nr. 97478035	121

1 Einleitung

Der Bedarf an Kühlung steigt derzeit weltweit aufgrund von steigenden Komfortansprüchen und steigendem Bedarf an Prozesskälte besonders im Sommer zu Spitzenlastzeiten. Dabei erfolgt die Kälteerzeugung zum großen Teil mittels Kompressionskältemaschinen, welche durch elektrische Energie betrieben werden. Absorptionskältemaschinen hingegen nutzen als Hauptantriebsenergie Wärme, was aufgrund der zeitlichen Überschneidung von Klimatisierungsbedarf und solarer Einstrahlung neue Möglichkeiten in Richtung solarer Kälteerzeugung eröffnet. So würden Absorptionskältemaschinen bei der Gebäudeklimatisierung eine Primäreinsparung gegenüber Kompressionskälteanlagen erlauben. Die Funktionsweise einer Absorptionskältemaschine beruht darauf, dass Kältemitteldampf bei geringer Temperatur in einem zweiten Stoff absorbiert und bei höheren Temperaturen desorbiert wird. Der Einsatz von Absorptionskältemaschinen ist besonders dann interessant, wenn Überschusswärme kostengünstig zur Verfügung steht. Diese Wärme kann aus Abwärme von Gasturbinen, Motoren oder Industrieprozessen, Solarenergie oder Geothermie bereitgestellt werden. Da bei Absorptionskältemaschinen die Lösung im flüssigen Zustand gepumpt wird und im Gegensatz zu Kompressionskältemaschinen kein Verdichter notwendig ist, fällt der elektrische Leistungsbedarf wesentlich geringer aus. Weitere Vorteile sind der geräusch- und vibrationsarme Betrieb und der niedrige Wartungs- und Unterhaltsaufwand. Dem gegenüber stehen Nachteile des schlechteren Lastwechselverhaltens, der hohen Investitionskosten und Empfindlichkeit gegenüber Leckagen da $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - Absorptionskältemaschinen bei niedrigen Absolutdrücken betrieben werden.

1.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabe dieser Diplomarbeit bestand im Aufbau einer $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - Absorptionskältemaschine im Labormaßstab für den Laborunterricht, welche in der dieser vorhergehenden Diplomarbeit „Auslegung und Konstruktion einer $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - Absorptionskältemaschine für den Laborunterricht“ von Dipl. Ing. Matthias Mair-Zeiningler, vgl. [1], ausgelegt und konstruiert wurde. Anschließend sollte die aufgebaute Anlage für die Betriebszwecke geprüft werden. Dies beinhaltete unter anderem die Dichtheit der Anlage zu prüfen und die einzelnen Kreisläufe zu testen. Außerdem sollte ein Messsystem erstellt und programmiert werden, um die Messdaten im Betrieb auszugeben. Ursprünglich war geplant, die Anlage zusätzlich vollständig in Betrieb zu nehmen, aufgrund von Verzögerungen während des Aufbaus konnten nur einige wenige erste Versuche durchgeführt werden.

1.1.1 Aufbau der Anlage

Es sollen die notwendigen Komponenten bestellt und der Aufbau der Anlage durchgeführt werden. Ein elektrischer Schaltplan soll erstellt und alle Komponenten fachgerecht angeschlossen werden. Die Heißwasser- und Kühlwasserversorgung soll erweitert und ein vollständiges Anlagenschema erstellt werden. Die gewonnenen Rückschlüsse und Änderungen sind in einer technischen Zeichnung samt Stückliste darzustellen.

1.1.2 Programmieren der SPS

Um die Anlage überwachen zu können und eine Ausgabe der Daten in Echtzeit zu erreichen, soll eine SPS programmiert werden. Diese soll die Messdaten in Ausgabewerte umwandeln. Die notwendigen mathematischen Formulierungen zur Berechnung von Wärmeströmen und thermodynamischen Daten der Lithiumbromidlösung wie Dichte und Konzentration sollen in die Programmierung einfließen. Um die Laborübung übersichtlich zu gestalten, soll eine Visualisierung erstellt werden, in der mit Hilfe eines Fließschaltbildes die Maschine erklärt wird. Des Weiteren soll die Visualisierung Trends der verschiedenen Messwerte ausgeben und eine Möglichkeit zur Messdatenspeicherung enthalten. Die Steuerung der Heizung soll ebenfalls durch die SPS erfolgen.

1.1.3 Inbetriebnahme

Nach erfolgreichem Aufbau soll die Anlage mit Hilfe verschiedener Verfahren auf Dichtheit geprüft werden und die einzelnen Kreisläufe, Pumpen und Sensoren auf Funktionstüchtigkeit getestet werden. Das Füllen der Anlage und der wasserführenden Kreisläufe, die Evakuierung der Anlage sowie die Vorgehensweise bei Stillstand sollen geklärt werden. Nach Durchführung der Tests soll die Anlage in Betrieb genommen werden.

1.2 Anforderungen an die Maschine

Die Anforderungen an die $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - Absorptionskältemaschine wurden großteils in der dieser Arbeit vorhergehenden Diplomarbeit festgelegt. Nachfolgende Anforderungen wurden an die Anlage gestellt. Die Maschine soll aufgrund des Laborbetriebs ungefährlich sein. Deshalb fiel die Wahl des Arbeitsstoffpaares auf $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$, da dieses nicht toxisch ist und im Unterdruck arbeitet, wodurch ein Bersten der Behälter kaum möglich ist. Die Heißwasserversorgung wurde mit einem Sicherheitsventil, welches einen Ansprechdruck von 3 bar besitzt und damit weit vor dem maximalen Druck des

Heißwasserspeichers von 6 bar öffnet, ausgestattet. Darüber hinaus soll die Anlage einen möglichst übersichtlichen Aufbau besitzen, um ein rasches Verständnis über das Flussschema zu erlangen. Hierzu wurden alle Messstellen, Pumpen, Schalter und Ventile beschriftet. Mehrere in die Behälter eingebrachte Schaugläser sollen Aufschluss über das Innere der Anlage geben, um Prozesse beobachten zu können und Probleme im Betrieb einfacher eruieren zu können. Die Anlagensvisualisierung soll zusätzlich in Echtzeit Auskunft über die Trends der Messwerte geben und die Funktion der Ventile erklären. Als Messwerte sollen Temperaturen, Drücke, Volumenströme und Wärmeströme ausgegeben werden, um die grundlegende Anlagencharakteristik beschreiben zu können und anhand derer sinnvolle Übungsaufgaben für den Laborbetrieb erstellen zu können. Auch eine Erfassung der Messdaten soll möglich sein. Zu guter Letzt, soll die Anlage kompakt und transportfähig sein, weshalb sie auf einer genormten Europoolpalette aufgebaut wurde.

1.3 Auslegungsdaten

Die Auslegungsrechnung der Absorptionskältemaschine erfolgte in [1], S. 46ff. Die Aufgabenstellung beinhaltete die Auslegungsrechnung sowie die technische Konstruktion einer $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - Absorptionskältemaschine für den Laborunterricht. Aus diesem Grunde wurden die maximale Heizleistung mit 2 kW und die maximale Heißwassertemperatur mit 100 °C festgelegt. Es gilt zu beachten, dass bei kommerziellen Anlagen nicht die Heizleistung, sondern die notwendige Kühlleistung ein ausschlaggebender Parameter für die Auslegung ist. Im Zuge der Berechnung wurden die in Abbildung 1.1 gelb unterlegten Werte als Eingabeparameter vorgegeben. Die Berechnung erfolgte mittels der Software EES (Engineering Equation Solver), vgl. [2], basierend auf der Stoffdatenbank LiBrSSC.DLL, die auf [3] und [4] aufbaut, und auf Grundlage des Buches „Absorption Chillers and Heat Pumps“ [5] erstellt wurde. Die gesamte Anlage wurde für die Berechnung als adiabatisch, die Drosselventile als isenthalp angenommen. Die Pumpenverluste wurden vernachlässigt. Der Wirkungsgrad des Temperaturwechslers wurde mit $\eta_{\text{TW}} = 0,8$ angenommen. Abbildung 1.1 stellt die wichtigsten Prozessdaten übersichtlich in dem Anlagenschema dar.

1-stufige AKM - H₂O/LiBr

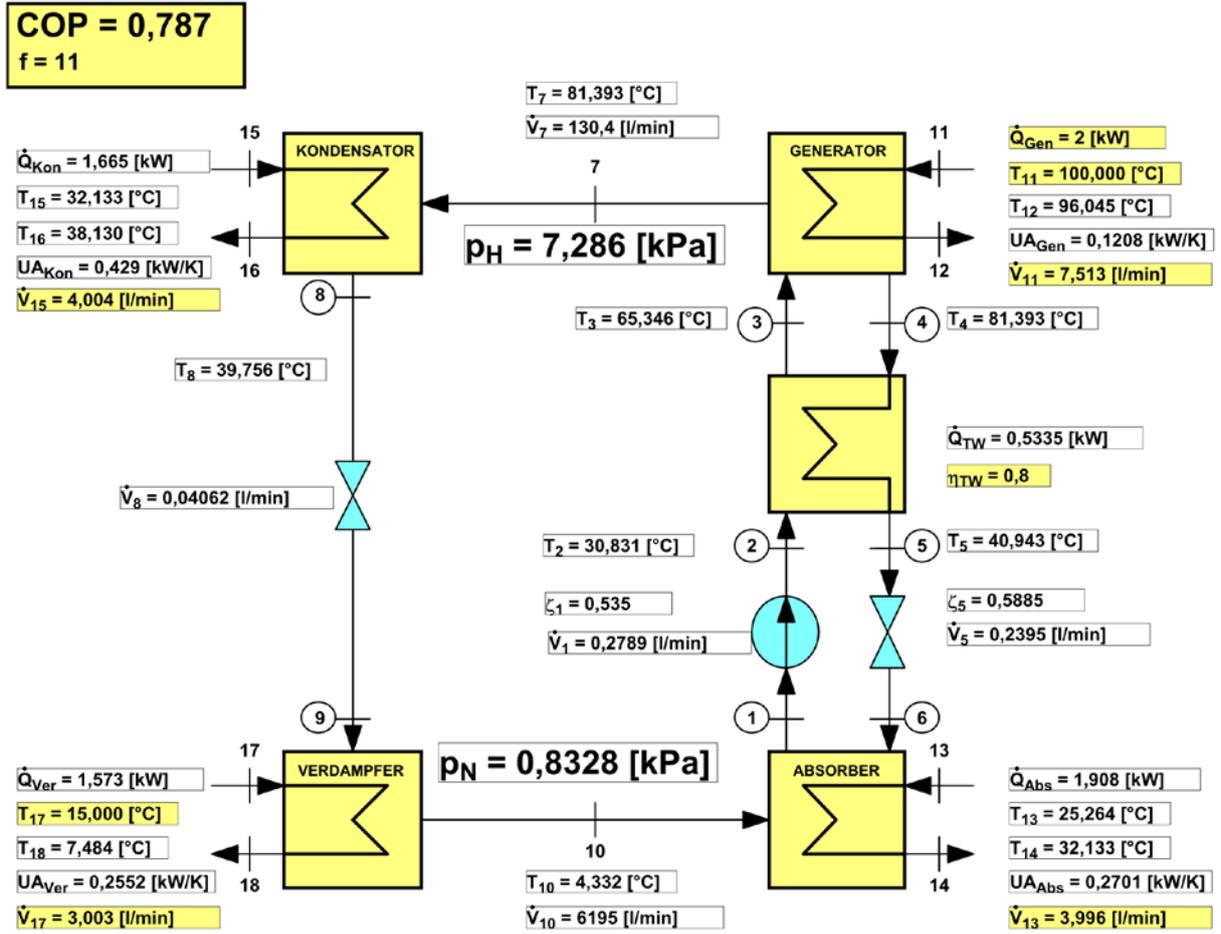


Abbildung 1.1: Auslegungsdaten, EES Berechnung, vgl. [1], S.14

Tabelle 1.1 gibt einen Überblick über die Kenndaten der Absorptionskältemaschine nach Auslegung.

Tabelle 1.1: Kenndaten laut Auslegung

<i>Kälteleistung</i>	<i>1,573 kW</i>
<i>Heizleistung</i>	<i>2 kW</i>
<i>Rückkühlleistung</i>	<i>3,573 kW</i>
<i>COP</i>	<i>0,787</i>
<i>Kaltwasser</i>	
<i>Eintrittstemperatur</i>	<i>15 °C</i>
<i>Austrittstemperatur</i>	<i>7,484 °C</i>
<i>Volumenstrom</i>	<i>3 l/min</i>
<i>Heißwasser</i>	
<i>Eintrittstemperatur</i>	<i>100 °C</i>
<i>Austrittstemperatur</i>	<i>96,945 °C</i>
<i>Volumenstrom</i>	<i>7,513 l/min</i>
<i>max. Druck</i>	<i>3,0 bar</i>
<i>Kühlwasser</i>	
<i>Eintrittstemperatur</i>	<i>25,264 °C</i>
<i>Austrittstemperatur</i>	<i>38,130 °C</i>
<i>Volumenstrom</i>	<i>4 l/min</i>

Es wird darauf hingewiesen, dass die Heizleistung der gebauten Anlage bei 2,5 kW liegt. Auch die Volumenströme der Kühlwasserversorgung bieten Raum nach oben, vgl. Tabelle 9.1. Sollte die Anlage mit anderen Werten betrieben werden, so ist eine Nachrechnung der Auslegungsrechnung möglich, um einen Vergleich zwischen Berechnung und realem Betrieb anstellen zu können. In Kapitel 8 wird das erweiterte Berechnungsprogramm mit Eingabewerten vorgestellt.

2 Grundlagen von Absorptionskältemaschinen

Wärmepumpen sind Maschinen, die Wärme von einem niedrigen auf ein höheres Temperaturniveau transferieren. Unter diesem Begriff werden sowohl Kühl- als auch Heizsysteme zusammengefasst. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik sagt aus, dass eine solche Beförderung nur durch den Einsatz von Arbeit oder Wärme möglich ist. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik nach Clausius lautet:

„Wärme kann nicht von selbst von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur übergehen.“ [6], S. 93–176

Je nach Art der Technologie, ist eine Zuführung von Arbeit oder Wärme notwendig. So benötigt die am weitesten verbreitete Technologie, die Kompressionskältemaschine, Arbeit in Form des elektrisch betriebenen Kompressors als Energiezufuhr. Die Absorptionstechnologie ist eine durch Wärmezufuhr betriebene Technologie mit einem nur geringen Einsatz von Arbeit. Die benötigte Wärme kann hierbei durch Verbrennung, Abwärme oder solare Energie bereitgestellt werden. [5], S. 1ff.

2.1 Funktionsweise

Wird die Anlage als Kühlanlage betrieben, so erfolgt die Wärmezufuhr bei der höchsten und die Kühlwirkung bei der niedrigsten Temperatur im System. Grundlegende Prozessbestandteile sind die Absorption und die Desorption des Kältemittels, welches als Zweistoffgemisch vorliegt. Die Komponente, die bei einer niedrigeren Temperatur verdampft, dient als Kältemittel. Lösung, die reich an Kältemittel ist, wird in der Literatur als reiche Lösung bezeichnet und jene, die wenig Kältemittel beinhaltet, als arme Lösung.

Eine einstufige Absorptionskältemaschine besteht aus fünf Hauptkomponenten, dem Generator, dem Kondensator, dem Absorber, dem Verdampfer und dem Temperaturwechsler. Generator und Kondensator arbeiten auf dem höheren Druckniveau, die anderen Komponenten befinden sich auf dem niedrigeren Druckniveau. Im Generator erfolgt die Wärmezufuhr und der leichter flüchtige Bestandteil der Lösung, das Kältemittel, wird ausgetrieben (Desorption) und verdampft. Es wird dampfförmig in den Kondensator geleitet wo es kondensiert. Über eine Drossel gelangt das nun verflüssigte Kältemittel in den Verdampfer, wo es durch Aufnahme von Wärme verdampft. Durch diese Wärmeaufnahme wird die Kälteleistung der Anlage erzeugt.

Die arme Lösung, welche im Generator zurückbleibt, wird über den Temperaturwechsler, wo sie Wärme abgibt, und eine Drossel in den Absorber geleitet. Die arme Lösung ist bestrebt den

Kältemitteldampf zu absorbieren und es stellt sich ein neues Phasengleichgewicht ein. Die hierbei entstandene Wärme wird über den Absorberwärmetauscher abgeführt. Anschließend wird die nun reiche Lösung über den Temperaturwechsler in den Generator gefördert. Da die hier vorliegende Lösung flüssig ist, fällt die Pumpenarbeit wesentlich geringer aus als bei Kompressionskältemaschinen wo das Medium gasförmig verdichtet wird, vgl. [7], S. 1.14. Abbildung 2.1 zeigt das p, T-Diagramm einer einstufigen Absorptionskältemaschine.

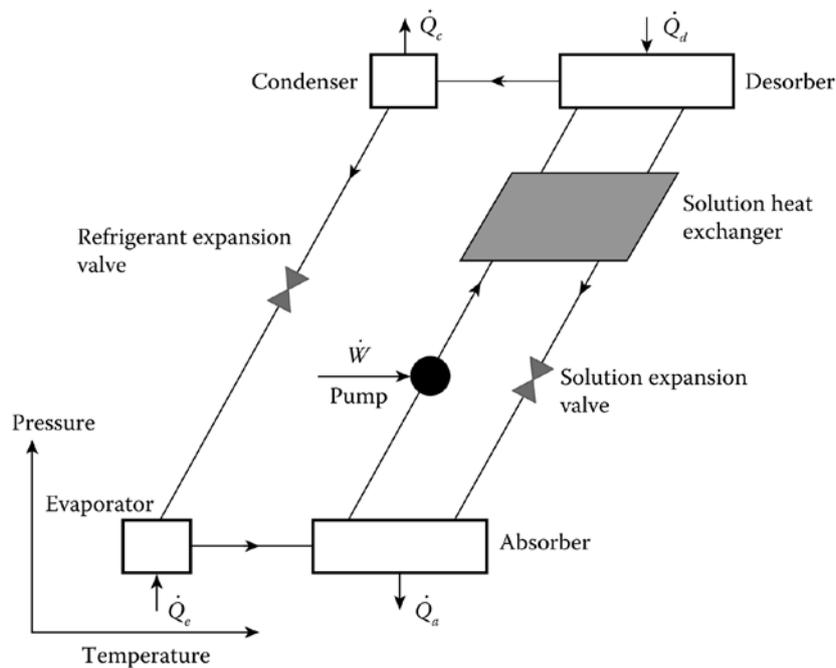


Abbildung 2.1: Schema einer einstufigen Absorptionskältemaschine, vgl. [5], S. 2

Die Absorptionskältemaschine besitzt drei Temperaturniveaus und wird, je nachdem auf welchem Niveau die Wärmezufuhr erfolgt, in Typ I oder Typ II unterschieden.

2.1.1 Typ I

Bei Absorptionskältemaschinen des Typs I wird die Wärme beim höchsten Temperaturniveau zugeführt. Ist die Nutzwärme die Wärme am niedrigsten Niveau, so wird die Maschine als Kältemaschine betrieben. Bei einem Betrieb als Wärmepumpe wird die Wärme beim mittleren Temperaturniveau genutzt. In Abbildung 2.2 ist ein Blockdiagramm ersichtlich mit den drei Arbeitstemperaturen und Wärmeströmen. T_h bezeichnet die Temperatur der Heizung, T_c jene der Kondensator- und Absorberkühlung und T_e die des Verdampfers.

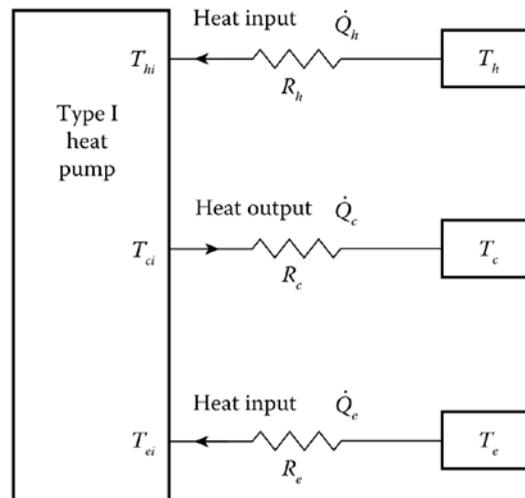


Abbildung 2.2: Prinzip Typ I Wärmepumpe, vgl. [5], S. 3

Der Absorptionskreisprozess kann durch die Kombination eines rechtsläufigen (Wärmekraftmaschine) und eines linksläufigen (Wärmepumpe) Carnot-Kreisprozesses dargestellt werden. In Abbildung 2.3 stellt \dot{Q}_0 die Kälteleistung dar. Mit Hilfe der bei T_2 zugeführten Exergie der Wärmezufuhr wird die Temperatur von T_0 auf T_1 angehoben. Die Abwärme des linksläufigen Wärmepumpenprozesses ($\dot{Q}_1'' = \dot{Q}_0 + \dot{W}$) und die des rechtsläufigen Wärmekraftmaschinenprozesses ($\dot{Q}_1' = \dot{Q}_2 - \dot{W}$) wird bei T_1 abgeführt. [5], S. 10ff.

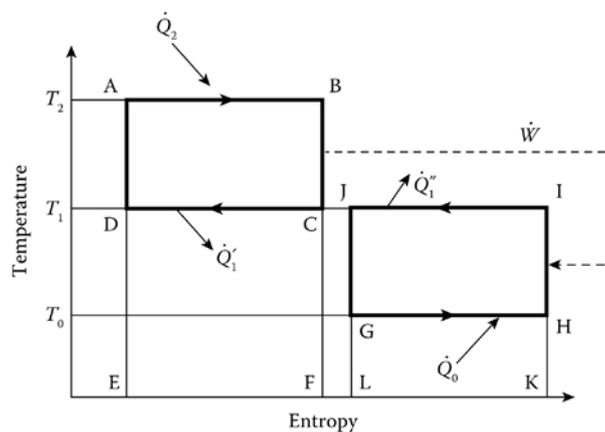


Abbildung 2.3: Idealisierte Darstellung einer Absorptionskältemaschine mittels links- und rechtsläufigem Carnot-Prozess, vgl. [5], S. 10

Der COP (Coefficient of Performance) einer Absorptionswärmepumpe ergibt sich aus dem Verhältnis von der im Kondensator und Absorber abgeführten zu jener im Generator zugeführten Wärme. Die im Absorber abgeführte Wärme wird dann einberechnet, wenn sie zur Nutzwärme zählt.

$$COP_{AWP} = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} = \frac{\dot{Q}_{Kon} + \dot{Q}_{Abs}}{\dot{Q}_{Gen}} \quad (2.1)$$

Der COP einer Absorptionskältemaschine hingegen berechnet sich aus der im Verdampfer aufgenommenen Wärme im Verhältnis zu der im Generator eingebrachten Wärme.

$$COP_{AKM} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_2} = \frac{\dot{Q}_{Ver}}{\dot{Q}_{Gen}} \quad (2.2)$$

2.1.2 Typ II

Bei der Typ II - Absorptionswärmepumpe sind alle Fluid- und Energieströme in entgegengesetzter Richtung im Vergleich zu Typ I - Maschinen. Die Wärme wird hierbei bei dem mittleren Temperaturniveau zugeführt und zu Hochtemperaturwärme konvertiert. Aus diesem Grund werden Typ II - Maschinen auch als Wärmetransformer oder Temperaturverstärker bezeichnet. Diese Umwandlung wird durch die Verwendung eines Teiles der Abwärme des Arbeitsprozesses, welcher Wärme bei T_0 abgibt, während er Arbeit für den Wärmepumpenprozess bereitstellt, durchgeführt. Das Prinzip dieser Art von Absorptionswärmepumpen wurde im Labor nachgewiesen, allerdings ist die Wirtschaftlichkeit für einen industriellen Einsatz bei dem derzeitigen Stand der Entwicklung nicht gegeben. Abbildung 2.4 zeigt das Blockscheema einer Typ II - Wärmepumpe. [5], S. 3ff.

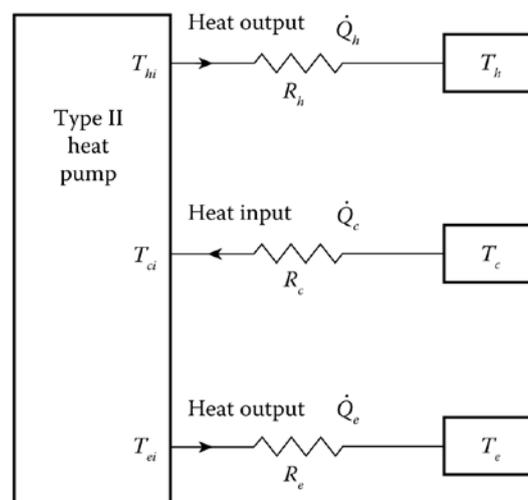


Abbildung 2.4: Prinzip Typ II Wärmepumpe, vgl. [5], S. 4

Zwischen den Temperaturen T_1 und T_2 arbeitet dieser Typ als Wärmepumpe (linksläufiger Carnot-Prozess) und zwischen den Temperaturen T_0 und T_1 als Arbeitsprozess (rechtsläufiger Carnot-Prozess). Ein Teil der zugeführten Wärme wird auf das Temperaturniveau T_2 gepumpt (\dot{Q}_1'), der andere wird verwendet um die Absorptionswärmepumpe zu betreiben (\dot{Q}_1''). [5], S. 11ff. Abbildung 2.5 zeigt einen Temperaturverstärker mit Hilfe von Carnot-Prozessen dargestellt.

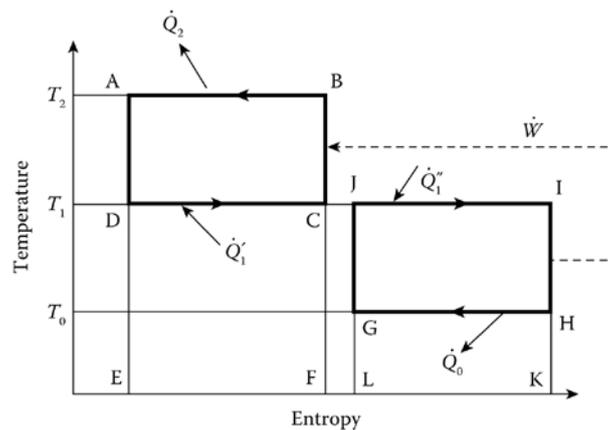


Abbildung 2.5: Idealisierte Darstellung eines Temperaturverstärkers mittels rechts- und linksläufigem Carnot-Prozess, vgl. [5], S. 11

Der COP einer Typ II - Absorptionswärmepumpe ist das Verhältnis zwischen Hochtemperaturwärme und der gesamten Abwärme.

$$COP_{TV} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1' + \dot{Q}_1''} \quad (2.3)$$

2.1.3 Mehrstufige Absorptionskältemaschine

Einstufige $H_2O/LiBr$ - Absorptionskältemaschinen sind auch bei höheren Heiztemperaturen in ihrem COP auf etwa 0,7 beschränkt. Stehen Wärmequellen mit einer hohen Temperatur von etwa 130 bis 190 °C zur Verfügung, so ist es möglich den einstufigen Absorptionszyklus um einen aufgesetzten Zyklus zu erweitern. Hierbei wird die im Kondensator der Hochtemperaturstufe abgegebene Wärme dazu genutzt, den Generator der Niedertemperaturstufe zu beheizen. Bei diesem Aufbau wird ein COP von 1 bis 1,2 erreicht, vgl. [5], S. 157ff. Abbildung 2.6 stellt eine zweistufige $H_2O/LiBr$ - Absorptionskältemaschine im Dühring-Diagramm dar.

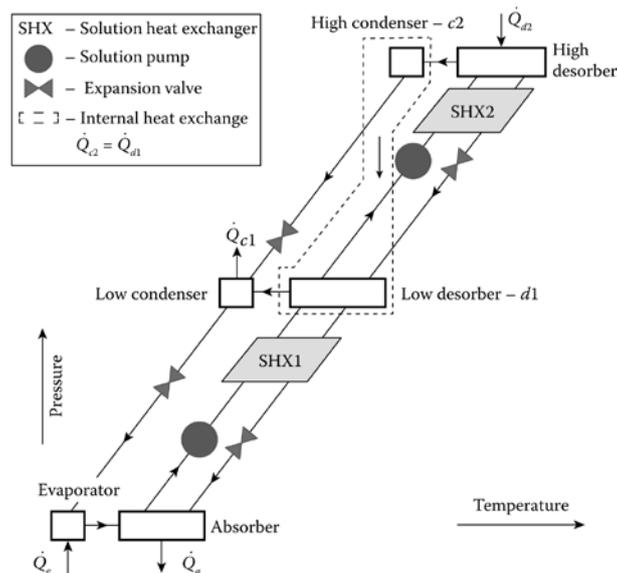


Abbildung 2.6: Dühring-Diagramm einer zweistufigen $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - Absorptionskältemaschine (paralleler Lösungsfluss), vgl. [5], S. 158

Da sich diese Arbeit primär $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - Absorptionskältemaschinen widmet, wird auf eine Erläuterung von mehrstufigen $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ - Anlagen verzichtet. Mehr zu diesem Thema ist unter [5], S. 215ff. zu finden.

2.1.4 Verluste

In einer Absorptionskältemaschine treten mehrere Arten von Verlusten auf. Der COP einer Absorptionskältemaschine, der sich aus dem Verhältnis von Verdampferwärmestrom zu Generatorwärmestrom berechnet, müsste sonst ungefähr bei 1 liegen, da die gleiche Wärmemenge benötigt wird, um das Kältemittel im Verdampfer sowie im Generator zum Sieden zu bringen.

Die vom Absorber kommende Lösung wird im Temperaturwechsler erwärmt, erreicht hier aber nicht die Temperatur des Sättigungsdrucks im Generator. Dieser Zirkulationsverlust tritt auch bei einem hohen Wärmetauscherwirkungsgrad auf und es muss zusätzliche Wärme im Generator bereitgestellt werden, um die Lösung zum Sieden zu bringen.

Auch der Trennvorgang von Kältemittel und Absorbens im Generator benötigt aufgrund der intermolekularen Bindungen der Lösung zusätzliche Wärme, um die Mischenthalpie zu überwinden. Hierzu wird in etwa 15 % mehr thermische Energie benötigt als wenn nur das Kältemittel zum Kochen gebracht würde.

Weitere Verluste treten in der Kältemitteldrossel auf, da hierbei ein Teil des Kältemittels verdampft und deshalb weniger flüssiges Kältemittel im Verdampfer zur Verfügung steht. Der Wärmeübergang im Verdampfer wird durch den bereits vorhandenen Dampf reduziert. Dieses Problem kann allerdings durch Unterkühlen des Kältemittels großteils unterbunden werden.

Im Ammoniak-Wasser Kreisprozess entsteht ein weiterer Verlust durch die Notwendigkeit einer Rektifikationskolonne, da bei diesem Prozess Wasser mit dem Kältemittel Ammoniak verdampft, welches anschließend abgetrennt werden muss. Der hier entstehende Wärmeverlust muss durch Erhöhung der Wärmezufuhr in den Generator ausgeglichen werden.

2.2 Arbeitsmedium

An das Arbeitsstoffpaar einer Absorptionskältemaschine werden viele Anforderungen gestellt:

- keine feste Phase im Betriebsbereich, um Kristallisation zu vermeiden
- das Kältemittel sollte sehr viel volatiler sein als das Absorbens, um die Stofftrennung zu vereinfachen
- hohe Affinität des Absorbens für das Kältemittel unter den Absorbitionsbedingungen
- moderater Betriebsdruck, bei hohem Druck sind große Wanddicken erforderlich, niedriger Druck (Vakuum) benötigt hohes Anlagenvolumen
- chemische Langzeitstabilität
- kein Auslösen von Korrosion bei Kontakt mit verwendetem Material
- Betriebssicherheit (nicht toxisch, nicht brennbar)
- hohe Verdampfungsenthalpie für eine niedrige Zirkulationsrate
- Umweltverträglichkeit

Ein Arbeitsstoffpaar, das all diese Anforderungen erfüllt, ist derzeit nicht bekannt. In kommerziellen Anlagen werden die Stoffpaare Wasser-Lithiumbromid und Ammoniak-Wasser verwendet, da diese gute thermodynamische Eigenschaften besitzen. Ammoniak-Wasser besitzt eine geringe Viskosität und gute wärmetechnische Eigenschaften, benötigt aber hohe Betriebsdrücke und ist in höheren Dosen toxisch. Des Weiteren ist aufgrund der niedrigen Volatilität des Ammoniaks der Einsatz einer Rektifikationskolonne notwendig. Wasser-Lithiumbromid hingegen ist ungiftig, das Kältemittel Wasser besitzt eine hohe Volatilität und Affinität gegenüber dem Lithiumbromid und eine hohe Verdampfungsenthalpie, neigt aber dazu, ab einer gewissen Konzentration Lithiumbromid auszukristallisieren. Da als Kältemittel Wasser mit einem Gefrierpunkt von 0 °C dient, ist dieses

Arbeitsstoffpaar nicht für Niedrigtemperaturkühlung geeignet. Auch der bei diesen niedrigen Temperaturen für die Verdampfung von Wasser benötigte niedrige Druck im Bereich von 5 bis 9 mbar ist zu berücksichtigen: [7], S. 1.15ff. Tabelle 2.1 fasst die Eigenschaften von $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ und $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ zusammen.

Tabelle 2.1: Eigenschaften Arbeitsstoffpaare, vgl. [5], S. 24

Eigenschaft	$\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$
Kältemittel		
<i>hohe latente Wärme</i>	<i>gut</i>	<i>exzellent</i>
<i>moderater Verdampfungsdruck</i>	<i>zu hoch</i>	<i>zu niedrig</i>
<i>niedriger Gefrierpunkt</i>	<i>exzellent</i>	<i>limitierte Anwendung</i>
<i>niedrige Viskosität</i>	<i>gut</i>	<i>gut</i>
Absorbens		
<i>niedriger Verdampfungsdruck</i>	<i>schlecht</i>	<i>exzellent</i>
<i>niedrige Viskosität</i>	<i>gut</i>	<i>gut</i>
Lösung		
<i>keine feste Phase</i>	<i>exzellent</i>	<i>limitierte Anwendung</i>
<i>niedrige Toxizität</i>	<i>schlecht</i>	<i>gut</i>
<i>hohe Affinität zwischen Kältemittel und Absorbens</i>	<i>gut</i>	<i>gut</i>

2.3 Bauformen

Grundsätzlich eignen sich viele Arbeitsmedien für den Betrieb einer Absorptionskältemaschine, industriell hergestellt werden hauptsächlich $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - und $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ - Absorptionskältemaschinen.

2.3.1 Wasser/Lithiumbromid Absorptionskältemaschine

Absorptionskältemaschinen mit Arbeitsmedium $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ werden seit ca. 1950 als kommerzielle Anlagen betrieben, die Kälteleistung reicht von 10 kW bis 5300 kW. Sie finden hauptsächlich in der Gebäudeklimatisierung und Prozesskühlung Einsatz. Die Temperatur der Heißwasserversorgung zum Betrieb des Generators fällt mit einer möglichen Temperatur ab 55 °C, vgl. [8], S. 2, relativ niedrig aus, weshalb diese Anlagen durch Abwärme von Motoren, Gasturbinen (Kraft-Wärme-Kopplung) oder Industrieprozessen, aber auch durch solar erzeugte Wärme, betrieben werden können. In diesen Anlagen dient Wasser als Kältemittel, welches im Gegensatz zu Lithiumbromid einen sehr niedrigen Siedepunkt besitzt (Lithiumbromid: 1282 °C). Aus diesem Grund besteht der Kältemitteldampf aus

reinem Wasser, auf eine Rektifikationskolonne kann daher verzichtet werden. Die niedrigste erreichbare Temperatur liegt in etwa bei 5 °C. Damit das Wasser bei dieser Temperatur verdampft, ist ein sehr niedriger Betriebsdruck im Bereich von 5 bis 9 mbar notwendig. Daraus resultieren große Behältervolumina und die Anlage muss dicht sein. Der erreichte COP dieser Anlagen liegt im Bereich von 0,7 bei einstufigen bis 1,2 bei zweistufigen Anlagen, vgl. [5], S. 107ff.

2.3.2 Ammoniak/Wasser Absorptionskältemaschine

Bei $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ - Absorptionskältemaschinen stellt Ammoniak das Kältemittel dar. Diese Maschinen sind seit dem späten 19. Jahrhundert in Verwendung, z. B. für die Produktion von Eis. Eingesetzt werden diese Anlagen in Campingkühlschränken und Hotelkühlschränken aufgrund des geräuscharmen Betriebes. Die Generatorenergie wird durch Verbrennung von Gas oder durch Heizung mit elektrischer Energie geliefert. Die Kapazität der kommerziellen Anlagen liegt bei 10 bis 90 kW. Da Ammoniak einen Gefrierpunkt von -77,7 °C besitzt, ist eine Kälteerzeugung bei sehr viel niedrigeren Temperaturen als bei $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - Anlagen möglich. Aufgrund der Toxizität von Ammoniak ist für eine stetige Belüftung am Aufstellort zu sorgen. Die Arbeitsplatzkonzentration darf einen Tagesmittelwert von 20 ppm und eine Kurzzeitbelastung von 50 ppm laut [8], S. 6 nicht überschreiten. Bei einer Konzentration von 16 bis 25 % Ammoniak in der Umgebungsluft entsteht ein explosives Gemisch. Eine Früherkennung ist allerdings durch den stark beißenden Geruch von Ammoniak zumeist gegeben. Da Ammoniak ein gutes Lösungsmittel für Kupfer ist, werden die Wärmetauscher aus Stahl oder Edelstahl gefertigt, wobei dies zu wesentlichen Unterschieden in der Konstruktion im Vergleich zu $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - Anlagen führt, da die Wärmeleitfähigkeit nur etwa 10 % jener von Kupfer beträgt. Da bei $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ - Absorptionskältemaschinen der Dampfdruck des Absorbens (Wasser) nicht vernachlässigbar ist, enthält der Kältemitteldampf etwa 5 % Wasserdampf, was zu Verlusten führt, da zusätzliche Wärme notwendig ist, um das Wasser zu verdampfen und keine Kühlleistung aus dem Wasser umgesetzt wird. Deshalb fällt der COP dieser Anlagen im Vergleich zu $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - Maschinen mit 0,5 niedriger aus.

Um möglichst reinen NH_3 - Dampf zu erzeugen muss daher eine Rektifikationskolonne vorgesehen werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einen Kondensatvorkühler einzusetzen, welcher zwischen Kondensatoraustritt und Verdampfereintritt geschaltet ist. Durch die Kühlung des Kondensats erhöht sich die Kühllast und das Wasser verdampft am Verdampferaustritt, vgl. [8], S. 187ff.

Die Rektifikationskolonne wird zwischen Generator und Kondensator geschaltet und mit dem vom Absorber kommenden Lösungsstrom an der Stelle 1 gespeist, welcher im Gegenstrom zum aufsteigenden Generatordampf über Platten tropft und in den Generator gelangt. Der Generatordampf steigt in der Kolonne auf und passiert das Kondensat des Rücklaufkühlers im Gegenstrom. Das rückströmende Kondensat kann, da es im Vergleich zum Dampfstrom einen relativ hohen Wasseranteil aber trotzdem einen wesentlich höheren Ammoniakanteil als der vom Absorber kommende Lösungsstrom besitzt, Wasser aus dem Dampf aufnehmen. Je höher der Dampf in der Kolonne steigt, desto mehr sinkt die Temperatur und das Wasser kondensiert bei gleichbleibendem Druck. Durch die hierbei frei werdende Wärme wird ein Teil des Ammoniaks im Kondensat verdampft und die Reinheit des Ammoniakdampfes steigt, vgl. [5], S. 90. Abbildung 2.7 zeigt das Schema einer Rektifikationskolonne.

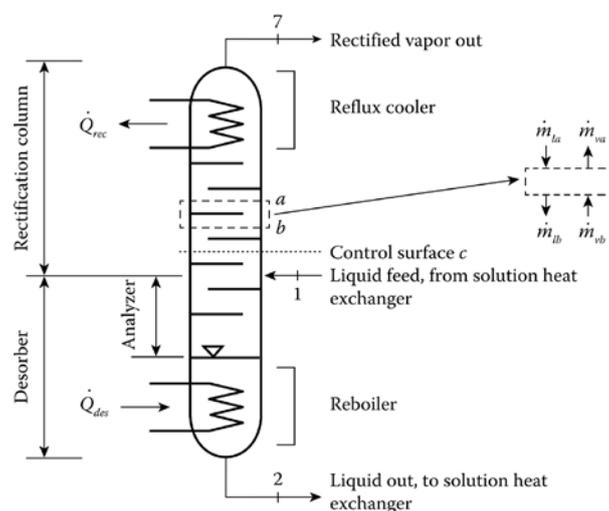


Abbildung 2.7: Rektifikationskolonne, vgl. [5], S. 90

2.4 Auslegung mittels Diagrammen

Eine $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - Absorptionskältemaschine lässt sich mit Diagrammen rasch überschlagsmäßig auslegen, um einen Einblick in Zustände und Stoffwerte zu gewinnen. Dies soll hier durch ein Beispiel gezeigt werden. Es sollen die Wärmeströme, COP, Druckniveaus sowie die Daten in den Zustandspunkten einer einstufigen Absorptionskältemaschine festgelegt werden. Die Anlage soll eine Kälteleistung von 1,5 kW mit 7 °C erzeugen. Für den Betrieb der Anlage steht Heißwasser zur Verfügung, welches die Lösung im Generator auf 85 °C erhitzt. Für die Wärmezufuhr von außen (Verdampfer und Absorber/Kondensator) steht Sole mit einer Temperatur von 15 °C zur Verfügung. Um Kristallisation zu vermeiden, soll der Massenanteil nicht über 60 % Lithiumbromid betragen. Die

Anlage arbeitet adiabatisch, die Pumpenleistung wird vernachlässigt und es wird von einer vollständigen Stofftrennung im Generator ausgegangen. Abbildung 2.8 zeigt ein Anlagenschema einer einstufigen H₂O/LiBr - Absorptionskältemaschine ohne Temperaturwechsler.

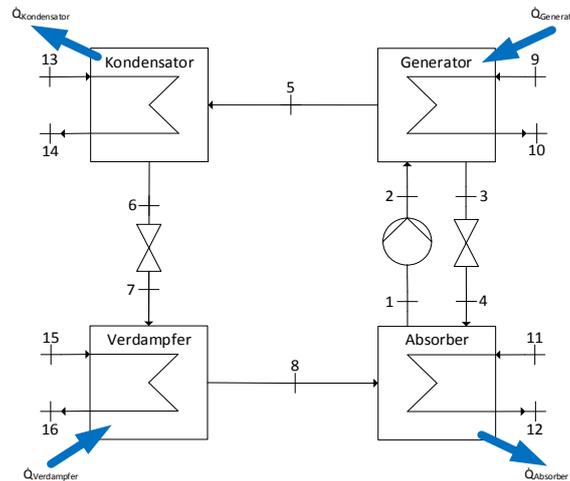


Abbildung 2.8: Anlagenschema einer einstufigen Absorptionskältemaschine

In den Zustandspunkten stellen sich folgende thermodynamische Zustände der Lösung ein:

Tabelle 2.2: Annahmen für thermodynamische Zustände, vgl. [5], S. 127

Zustandspunkt	Zustand
1	flüssige gesättigte Lösung
2	unterkühlte Lösung
3	gesättigte Lösung
4	Nassdampf /flüssig
5	Wasserdampf überhitzt
6	Wasser gesättigt
7	Wasser gesättigt
8	Wasserdampf gesättigt

Die Lösungstemperatur von 85 °C im Generator und der Massenanteil von $w_3 = 60\%$ Lithiumbromid in der Lösung definieren das obere Druckniveau, welches bei $PHD = 7,5\text{ kPa}$ liegt. Die Anlage soll Kälte mit 7 °C erzeugen. Daraus folgt, dass bei dieser Temperatur Wasser verdampfen soll. Das untere Druckniveau liegt somit bei $PND = 1\text{ kPa}$. Die Lösungszirkulationsrate f , welche den Massenstrom \dot{m}_2 in der Lösungspumpe ins Verhältnis zum Massenstrom \dot{m}_5 , der den Generator verlässt, stellt, liegt bei

Absorptionskältemaschinen typischerweise bei $f = 11$, vgl. [5], S. 126. Über diesen Zusammenhang lässt sich der Massenanteil w_2 berechnen.

$$f = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_5} = \frac{w_3}{w_3 - w_2} = 11 \tag{2.4}$$

Wird diese Formel auf w_2 umgeformt, so erhält man:

$$w_2 = \frac{f \cdot w_3 - w_3}{f} = 0,54545 \tag{2.5}$$

Die Anlagencharakteristik lässt sich nun ins Gleichgewichtsdiagramm für Lithiumbromidlösung eintragen.

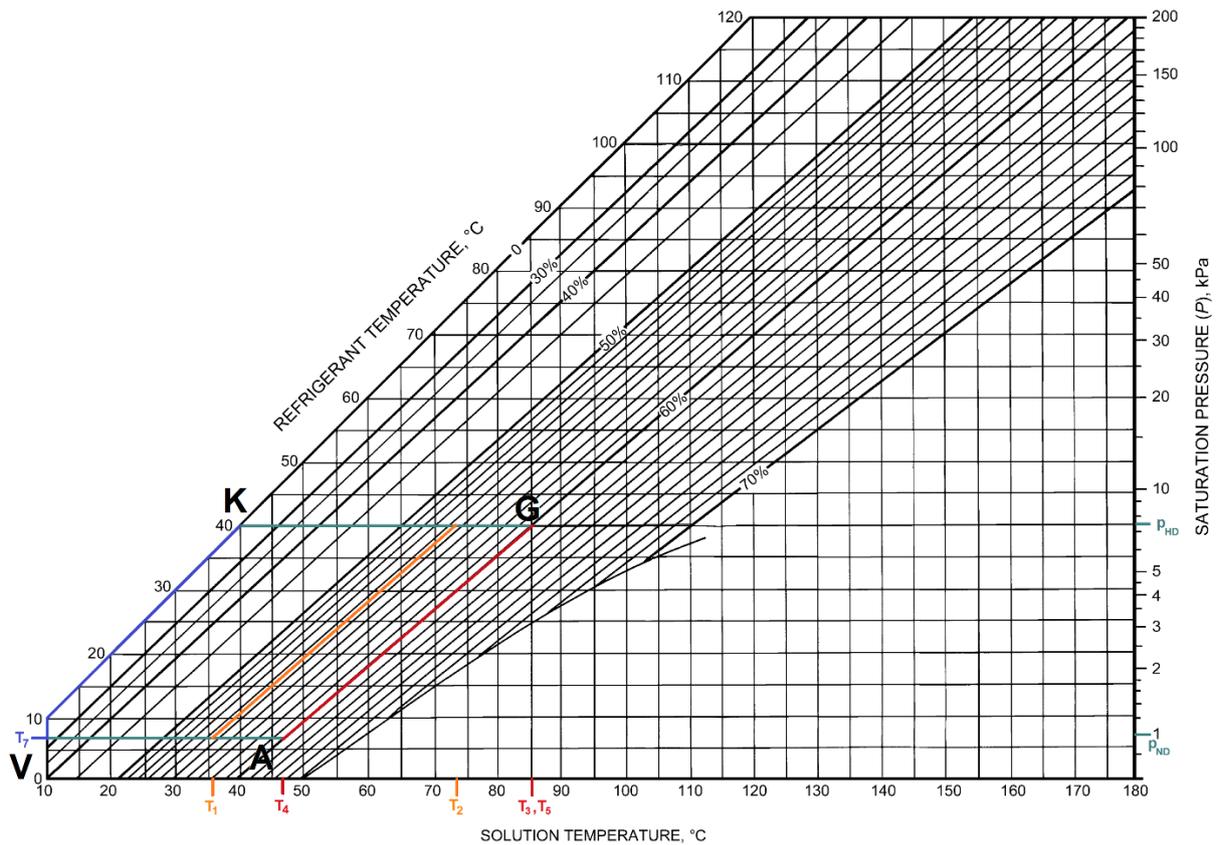


Abbildung 2.9: Gleichgewichtsdiagramm H₂O/LiBr - Lösung, vgl. [7], S. 20.71

Aus dem Diagramm 2.9 lassen sich die Temperaturen T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , und T_5 ablesen, die verbleibenden Temperaturen ergeben sich durch die Angabe. Mit Hilfe dieser Temperaturen werden die zugehörigen

Enthalpien aus dem Enthalpie-Konzentrationsdiagramm abgelesen. Die Enthalpien der Zustandspunkte 5, 6, 7 und 8 (reines Wasser) wurden mit Hilfe der Software EES, vgl. [2]. berechnet, können aber auch einer Wasserdampf tafel entnommen werden. Der Abbildung 2.10 werden die Enthalpien der Lithiumbromidlösung entnommen:

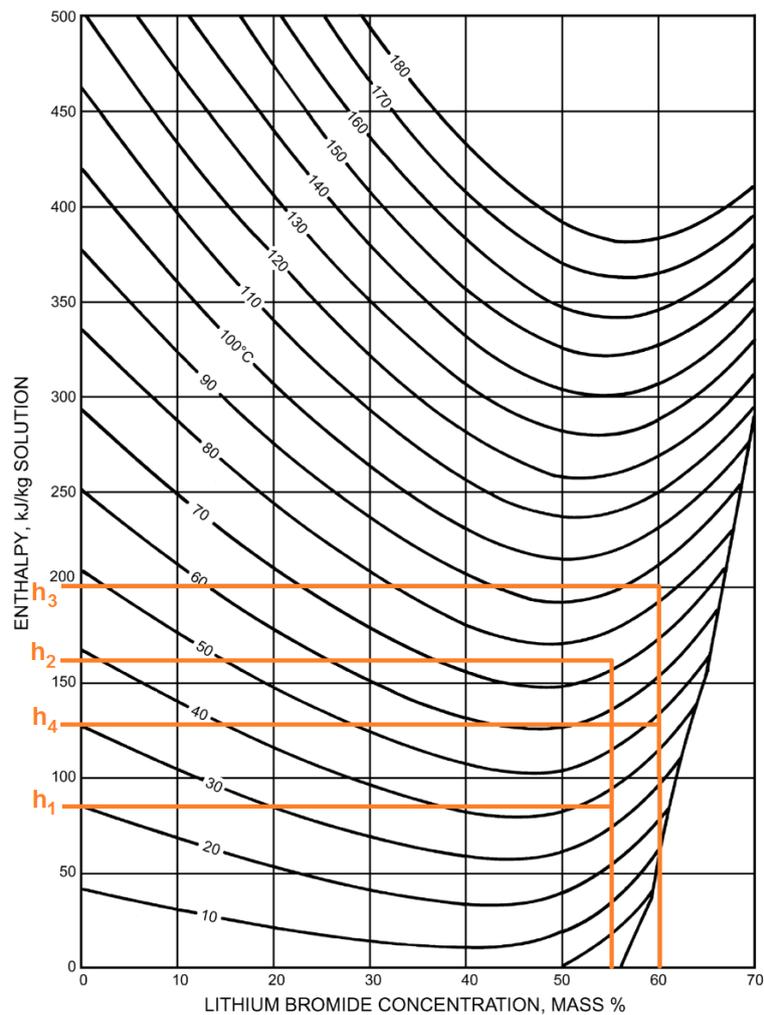


Abbildung 2.10: Enthalpie-Konzentrationsdiagramm, vgl. [7], S. 20.70

Um die Wärmeströme in Generator, Kondensator und Absorber zu berechnen, müssen die Massenströme berechnet werden. Die Massenströme in den jeweiligen Kreisläufen sind konstant. Da die Kälteleistung, welche im Verdampfer umgesetzt wird, bekannt ist, folgt für den Massenstrom \dot{m}_5 :

$$\dot{Q}_{Ver} = \dot{m}_2 \cdot (h_8 - h_7) \quad (2.6)$$

$$\dot{m}_5 = \frac{\dot{Q}_{Ver}}{h_8 - h_7} = 6,005 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (2.7)$$

Der Massenstrom \dot{m}_2 lässt sich über die Zirkulationsrate berechnen:

$$\dot{m}_2 = f \cdot \dot{m}_5 = 6,605 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (2.8)$$

Aus der Massenbilanz um den Generator folgt der dritte in der Anlage vorkommende Massenstrom \dot{m}_3 :

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 - \dot{m}_5 = 6,005 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (2.9)$$

Es sind nun alle Temperaturen, Enthalpien, Massenströme sowie Massenanteile in den jeweiligen Zustandspunkten bekannt. Tabelle 2.3 liefert eine Zusammenfassung der Daten:

Tabelle 2.3: Zustandsdaten überschlagsmäßige Auslegung

Zustandspunkt	$T [^\circ\text{C}]$	$h [\text{kJ/kg}]$	w (Massenanteil Lithiumbromid)	x (Massenanteil Dampf)	Druck [kPa]	Massenstrom [kg/s]
1	36	85	0,5454	-	0,8	$6,605 \cdot 10^{-3}$
2	73	161	0,5454	-	7,5	$6,605 \cdot 10^{-3}$
3	85	204	0,6	-	7,5	$6,005 \cdot 10^{-3}$
4	47	131	0,6	-	0,8	$6,005 \cdot 10^{-3}$
5	85	2651	0	1	7,5	$6,005 \cdot 10^{-4}$
6	15	63	0	0	7,5	$6,005 \cdot 10^{-4}$
7	7	30	0	0	0,8	$6,005 \cdot 10^{-4}$
8	15	2528	0	1	0,8	$6,005 \cdot 10^{-4}$

Die Wärmeströme in Generator, Kondensator und Absorber werden durch Bildung von Energiebilanzen berechnet. Für den Absorber ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\dot{Q}_{Abs} = \dot{m}_5 \cdot h_8 + \dot{m}_3 \cdot h_4 - \dot{m}_2 \cdot h_1 = 1,743 \text{ kW} \quad (2.10)$$

Die Energiebilanz um den Generator liefert:

$$\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_5 \cdot h_5 - \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_3 \cdot h_3 = 1,753 \text{ kW} \quad (2.11)$$

Der im Kondensator abgegebene Wärmestrom lautet:

$$\dot{Q}_{Kon} = \dot{m}_5 \cdot (h_5 - h_6) = 1,554 \text{ kW} \quad (2.12)$$

Die Leistungszahl, der COP (Coefficient of Performance), ergibt sich aus dem Verhältnis der erzeugten Kälteleistung zu der zugeführten Wärmeleistung.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Ver}}{\dot{Q}_{Gen}} = 0,855 \quad (2.13)$$

4 Aufbau der Anlage

In den folgenden Abschnitten werden das R&I - Fließschema der Anlage, eine technische Gesamtzeichnung der Anlage, die Elektroinstallation sowie die Aufbauarbeiten selbst behandelt.

4.1 Anlagenschema

Um die Absorptionskältemaschine im Labor betreiben zu können, wird eine Heißwasserversorgung für den Generator sowie eine Kaltwasserversorgung für den Verdampfer, Absorber und Kondensator benötigt. Die Absorptionskältemaschine sollte transportfähig sein und wird daher auf einer Europalette montiert. Die Heißwasserversorgung ist auf dieser Palette integriert, die Kaltwasserversorgung muss entweder durch den Laborkaltwassersatz oder einen externen Wasserbehälter realisiert werden. Da der Kaltwassersatz zu Beginn dieser Arbeit noch nicht zur Verfügung stand, wurde eine Pumpe integriert, welche die Anlage über einen Behälter mit Kaltwasser versorgt (P 006). Abbildung 4.1 zeigt das Anlagenschaltbild der Absorptionskältemaschine mit Heißwasser- und Kaltwasserversorgung.

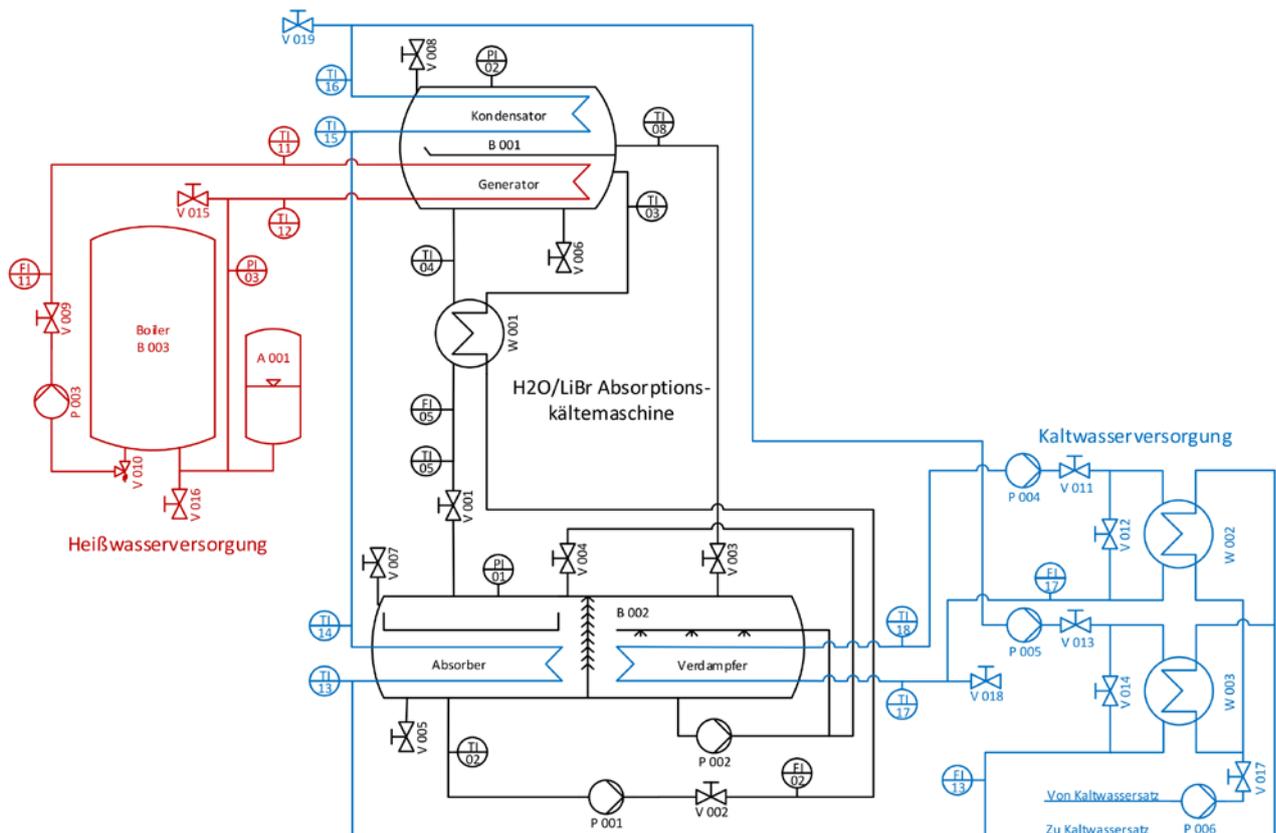


Abbildung 4.1: Anlagenschema mit Absorptionskältemaschine, Heißwasser- und Kaltwasserversorgung

Eine Legende zum Anlagenschema der Absorptionskältemaschine ist in Tabelle 4.1 dargestellt, um eine einfache Bedienung sicherzustellen. Die Funktion sämtlicher Messsensoren, Ventile, Behälter, Wärmetauscher und Pumpen wird erläutert.

Tabelle 4.1: Legende zum Anlagenschema

<i>Art</i>	<i>Benennung</i>	<i>Funktion</i>
Temperatur		
	TI 02	Temperatur Zustandspunkt 2 (Lösung nach Austritt Absorber)
	TI 03	Temperatur Zustandspunkt 3 (Lösung vor Eintritt Generator)
	TI 04	Temperatur Zustandspunkt 4 (Lösung vor Temperaturwechsler)
	TI 05	Temperatur Zustandspunkt 5 (Lösung nach Temperaturwechsler)
	TI 08	Temperatur Zustandspunkt 8 (Kältemittel Austritt Kondensator)
	TI 11	Temperatur Generator Eintritt
	TI 12	Temperatur Generator Austritt
	TI 13	Temperatur Absorber Eintritt
	TI 14	Temperatur Absorber Austritt
	TI 15	Temperatur Kondensator Eintritt
	TI 16	Temperatur Kondensator Austritt
	TI 17	Temperatur Verdampfer Eintritt
	TI 18	Temperatur Verdampfer Austritt
Druck		
	PI 01	Druckniveau Generator/Kondensator
	PI 02	Druckniveau Absorber/Verdampfer
	PI 03	Manometer Heißwasserversorgung, analog 0-4 bar
Volumenstrom		
	FI 02	Volumenstrom reiche Lösung Zustandspunkt 2
	FI 05	Volumenstrom arme Lösung Zustandspunkt 5
	FI 11	Volumenstrom Generator - Heißwasser
	FI 13	Volumenstrom Absorber/Kondensator - Kühlwasser
	FI 17	Volumenstrom Verdampfer - Kühlwasser
Ventil		
	V 001	Lösungsdrossel
	V 002	Regulierungsventil Volumenstrom Lösungspumpe
	V 003	Kältemitteldrossel
	V 004	Ventil Kristallisationsvorbeugung
	V 005	Entnahmeventil Absorber
	V 006	Entnahmeventil Generator
	V 007	Evakuierungsventil Absorber/Verdampfer
	V 008	Evakuierungsventil Generator/Kondensator
	V 009	Regulierungsventil Volumenstrom Heißwasserversorgung
	V 010	Sicherheitsventil Heißwasserversorgung, Ansprechdruck 3 bar

V 011	Regulierungsventil Volumenstrom Verdampfer
V 012	Regulierungsventil Temperatur Verdampfer
V 013	Regulierungsventil Volumenstrom Absorber/Kondensator
V 014	Regulierungsventil Temperatur Absorber
V 015	Entlüftungsventil Heißwasserversorgung
V 016	Einfüll-/Ablassventil Heißwasserversorgung
V 017	Regulierungsventil Volumenstrom Kaltwasser
V 018	Einfüll-/Ablassventil Kühlwasser Verdampfer
V 019	Einfüll-/Ablassventil Kühlwasser Absorber/Kondensator

Kessel

B 001	Kondensator-/Generatorbehälter
B 002	Absorber-/Verdampferbehälter
B 003	Boiler Heißwasserversorgung
A 001	Membranausgleichsbehälter Heißwasserversorgung

Wärmetauscher

W 001	Temperaturwechsler Lösung
W 002	Kaltwasser zu Kühlwasser Verdampfer
W 003	Kaltwasser zu Kühlwasser Absorber/Kondensator

Pumpe

P 001	Lösungspumpe
P 002	Verdampferpumpe
P 003	Heißwasserversorgungspumpe
P 004	Kühlwasserversorgungspumpe – Verdampfer
P 005	Kühlwasserversorgungspumpe – Absorber/Kondensator
P 006	Kaltwasserversorgungspumpe

4.2 Technische Gesamtzeichnung

Die hier dargestellte Abbildung 4.2 soll einen Überblick über die Hauptkomponenten der Absorptionskältemaschine bieten. Der Generator-/Kondensatorbehälter sowie der Absorber-/Verdampferbehälter werden hierzu geschnitten dargestellt, um einen Aufschluss über die verbauten Wärmetauscher zu geben. Eine technische Gesamtzeichnung mit Beschreibung aller Komponenten wie Ventile, Messensoren, Pumpen und Schalter sowie einer Stückliste, befindet sich im Anhang unter 12.1.

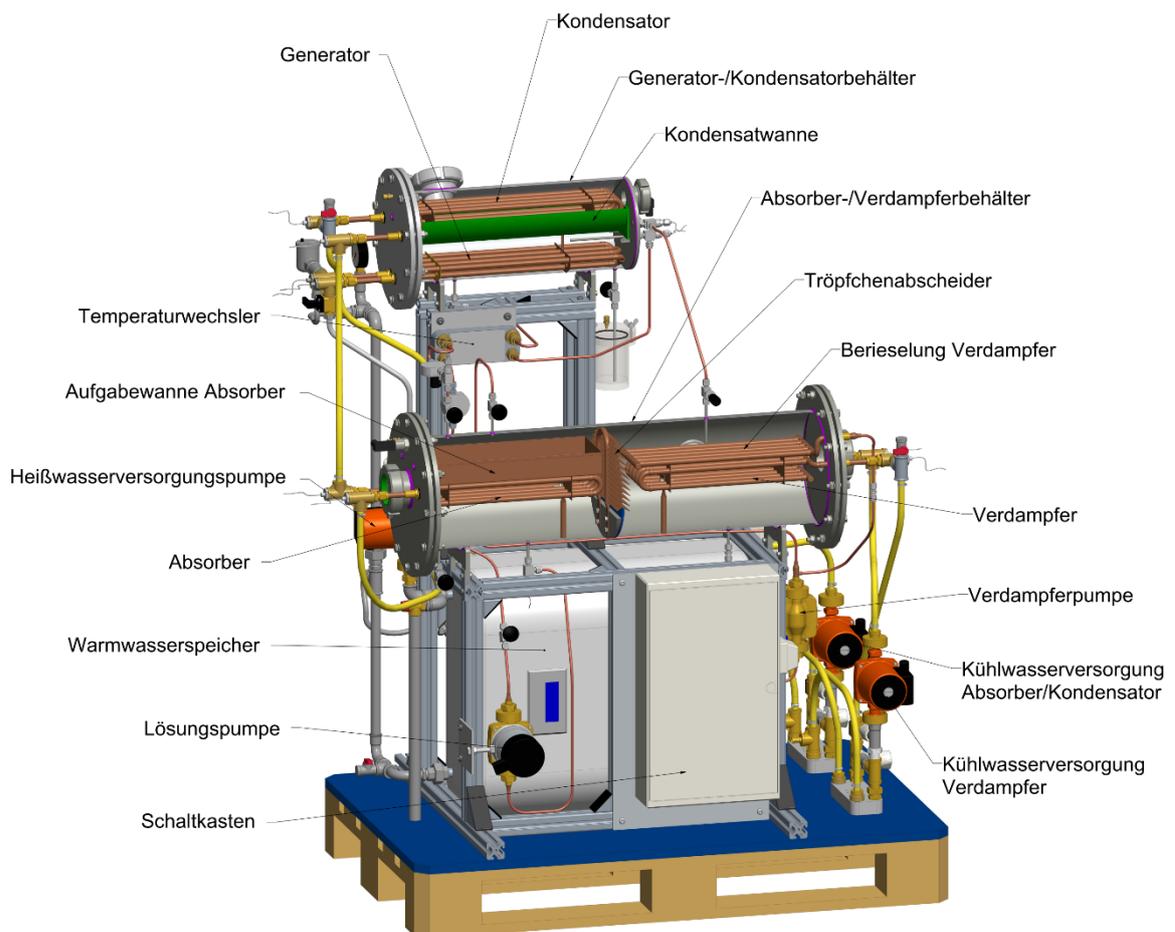


Abbildung 4.2: Überblick über die Hauptkomponenten der Absorptionskältemaschine

4.2.1 Änderungen zu vormaliger Konstruktion

Im Zuge der Aufbauarbeiten wurden einige Änderungen an der Konstruktion vorgenommen. So wurde entschieden, den Warmwasserspeicher in die Gesamtanlage zu integrieren, um die Absorptionskältemaschine transportfähiger zu gestalten und ein bei einem Transport notwendiges Abschrauben der Heißwasserversorgungsleitungen zu verhindern. Folgende Änderungen wurden des Weiteren durchgeführt:

- Verkleinerung des Volumens des Warmwasserspeichers von 80 l auf 50 l
- Anpassung des Rahmens an die Abmessungen des Warmwasserspeichers
- Reduktion der Gesamthöhe der Anlage, um einen besseren Einblick in den Generator-/Kondensatorbehälter zu ermöglichen
- Integration eines Ausgleichsbehälters in die Heißwasserversorgung, um die Druckerhöhung während des Aufheizvorganges auszugleichen
- Platzierung des Temperaturwechslers zwischen den beiden Behältern, um den Leitungsdruckverlust zu minimieren und möglichst geringe Leitungslängen zu erreichen
- Kupferwärmetauscher mit Edelstahlflanschen wurden schraubbar gestaltet anstatt verlötet, um den Ausbau zu vereinfachen
- Lötverbindungen der Kupferwärmetauscher wurden durch Klemmringverschraubungen ersetzt
- Ergänzung der Verrohrungen der Heißwasser- und Kühlwasserversorgung unter anderem durch Füllhähne

Ursprünglich war geplant, die Anlage an das Kaltwassernetz des Labors anzuschließen, dies wurde allerdings aufgrund der geplanten Transportfähigkeit verworfen. Die Anlage wird über einen externen Behälter mittels Pumpe mit Kaltwasser versorgt. Hierzu musste eine zusätzliche Pumpe, P 006, und ein zusätzliches Ventil, V 017, eingebaut werden. Die Elektrik der Anlage sowie die speicherprogrammierbare Steuerung mussten ebenso ergänzt werden. Im Zuge der ersten Versuche stellten sich die geplanten Pumpen des Typs Grundfos UPS 15-14 B PM, vgl. [9], als zu schwach heraus. Diese Pumpe besitzt eine maximale Leistung von 6 W, eine maximale Förderhöhe von 1,2 m und eine maximale Fördermenge von 0,8 m³/h. An jene Pumpen, welche im Vakuum arbeiten und mit Lithiumbromidlösung in Berührung kommen, die Lösungs- und Verdampferpumpe, werden besondere Anforderungen gestellt. So müssen die Pumpen eine hermetische Ausführung besitzen und unempfindlich gegenüber Korrosion sein. Es eignen sich insbesondere Nassläuferpumpen wie sie in Heizungssystemen Verwendung finden, da hier die Möglichkeit einer undichten Wellendichtung

entfällt. Für die Lösungs- und Verdampferpumpe wurde eine Hocheffizienzpumpe des Typs WITA Delta HE 55 LED, vgl. [10], ausgewählt. Diese Pumpe besitzt ein Messinggehäuse und liefert bei einer Leistungsaufnahme von 38 W eine maximale Förderhöhe von 6 m und eine maximale Fördermenge von 3,2 m³/h. Für die Kühlwasserversorgung wurden Pumpen des Typs IBO OHI 25-40/180, vgl. [11], gewählt, da diese kostengünstig waren und der Einsatz in diesen Kreisläufen keine besonders hohen Anforderungen bezüglich Material stellt. Diese Pumpen liefern bei einer Leistungsaufnahme von 72 W eine maximale Förderhöhe von 4,5 m und eine maximale Fördermenge von 2,88 m³/h. Es hat sich herausgestellt, dass die Pumpen in den Kühlwasserkreisläufen ausreichend dimensioniert sind, in der Heißwasserversorgung musste eine baugleiche Pumpe mit höherer Leistung des Typs IBO OHI 25-60/180 verbaut werden, um den angestrebten Volumenstrom von etwa 7,5 l/min zu erreichen. Diese Pumpe erreicht bei einer Maximalleistung von 93 W eine maximale Förderhöhe von 6 m und eine maximale Fördermenge von 3,33 m³/h. In Abbildung 4.3 sind die Änderungen zur vormaligen Konstruktion bildlich dargestellt.

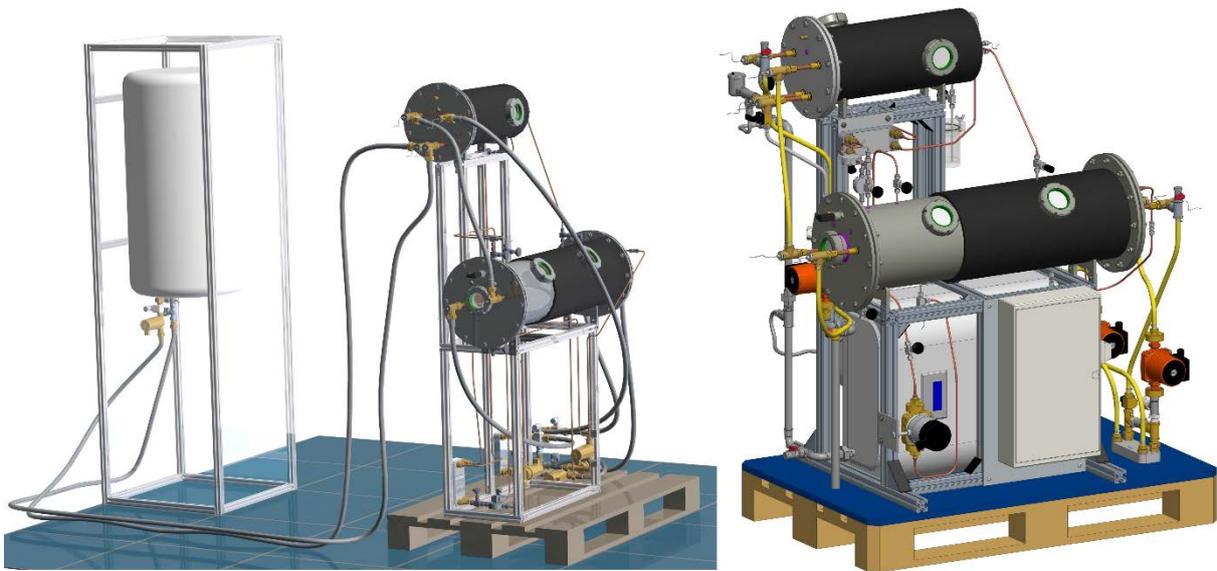


Abbildung 4.3: Ursprüngliche Konstruktion (links), vgl. [1], S. 37, und derzeitiger Aufbau (rechts) der Anlage

4.3 Elektrischer Schaltplan

Die Absorptionskältemaschine wurde mit 16 A Sicherungen abgesichert und wird mit 230 V Wechselspannung betrieben. Die maximal mögliche Leistungsaufnahme liegt somit bei 3680 W. Die Absorptionskältemaschine hat bei Betrieb aller Komponenten mit maximaler Leistung eine Leistungsaufnahme von 3230 W. Es sollte daher bei der derzeitigen Konfiguration zu keinen Überlastungen kommen. In Tabelle 4.2 ist eine Bilanz der Leistungsaufnahme der Absorptionskältemaschine ersichtlich.

Tabelle 4.2: maximale Leistungsaufnahme Absorptionskältemaschine

<i>Bezeichnung</i>	<i>Anzahl</i>	<i>max. Leistung [W]</i>
<i>Heizstab 1</i>	<i>1</i>	<i>1500</i>
<i>Heizstab 2</i>	<i>1</i>	<i>1000</i>
<i>Pumpe Kalt-/Kühlwasserversorgung</i>	<i>3</i>	<i>216</i>
<i>Pumpe Heißwasserversorgung</i>	<i>1</i>	<i>93</i>
<i>Lösungs-/Verdampferpumpe</i>	<i>2</i>	<i>76</i>
<i>Speicherprogrammierbare Steuerung</i>	<i>1</i>	<i>345</i>
<i>max. Gesamtleistungsaufnahme</i>		<i>3230 [W]</i>

Es wurde darauf geachtet, alle Komponenten in einem möglichst platzsparenden Schaltkasten unterzubringen. Im Schaltkasten erfolgt die Bedienung der Pumpen sowie der Messeinrichtung. Das Heizungsrelais wird über die SPS angesteuert. Die Einstellung der Leistungsstufe der Pumpen erfolgt direkt an der jeweiligen Pumpe. Um den elektrischen Schaltplan rasch nachvollziehen zu können, wurden alle Komponenten (Klemmen, Sensoren) beschriftet und ein entsprechender Schaltplan erstellt. Da die SPS eventuell in anderen Projekten Einsatz finden könnte, wurde darauf geachtet sie möglichst einfach entfernen zu können. Beim Anschluss an das Stromnetz sollte darauf geachtet werden, Nullleiter und Leiter richtig anzuschließen. Werden Arbeiten an der Absorptionskältemaschine durchgeführt, so ist in jedem Fall der Hauptschalter auszuschalten. Im Anhang unter 12.2 befinden sich der elektrische Schaltplan der Gesamtanlage sowie der Plan zum Anschluss der B&R SPS.

4.4 Messstellen

Da die Absorptionskältemaschine vorrangig für den Laborunterricht vorgesehen ist, wurde die Anlage nur mit den Messsensoren ausgestattet, die nötig sind, um hinreichende Daten zur Auswertung der wichtigsten Prozesse zu erhalten.

Um die Wärmeströme in Generator, Kondensator, Absorber, Verdampfer und Temperaturwechsler ermitteln zu können, wird die Temperatur des Mediums bei Ein- und Austritt des jeweiligen Wärmetauschers gemessen. Mit Hilfe der Temperatur wird die zugehörige Enthalpie errechnet. Zusätzlich zu den Temperatursensoren ist vor jedem Wärmetauscher ein Volumenstromsensor angebracht, mit dem bei Kenntnis der Dichte und der Temperatur der Massenstrom berechnet wird. Die Durchflusssensoren helfen des Weiteren bei der Einstellung eines stationären Zustandes. Um die Anlage zu evakuieren und den Druckanstieg durch den Heizvorgang messen zu können, ist in jedem Behälter ein Drucksensor eingeschraubt. Die Anordnung der Messstellen ist im Anlagenschema in Abbildung 4.1 in Abschnitt 4.1 erkenntlich.

4.5 Aufbauarbeiten

Die Aufbauarbeiten erfolgten größtenteils nach den technischen Plänen der Diplomarbeit [1]. Es wurde beim Zusammenbau besonderer Wert darauf gelegt, alle Bauteile ausgiebig zu reinigen und zu entfetten. Bei den aus Kupferrohren gelöteten Wärmetauschern wurden die Reste des Flussmittels gründlich entfernt. Die Abbildung 4.4, 4.5 und 4.6 zeigen die gelöteten Kupferbauteile, die in die jeweiligen Flansche verbaut wurden.



Abbildung 4.4: Kondensator, Kondensatwanne und Generator

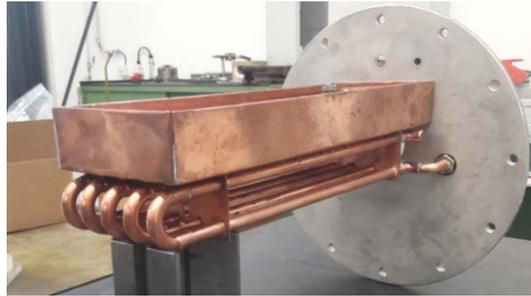


Abbildung 4.5: Absorberaufgabewanne und Absorber



Abbildung 4.6: Verdampferberieselung und Verdampfer

Die Behälterrohre wurden während der Schweißarbeiten mit Formiergas (Argon) geflutet um Oxidation und Verzundern zu unterbinden. Anschließend wurden die Behälter und Flansche mit Edelstahlbeize behandelt, um Oxidation zu entfernen. Die in den Flanschen zur Evakuierung angebrachten Schrader -Ventile wurden hartgelötet. Abbildung 4.7 zeigt die geschweißten Behälter.



Abbildung 4.7: Generator-/Kondensatorbehälter (links) und Absorber-/Verdampferbehälter (rechts)

Die Verschraubungen der Wärmetauscher und der Pumpen wurden durch PTFE Flachdichtungen abgedichtet. Alle Ventile, Sensoren, Pumpen, Wärmetauscher und Schalter wurden beschriftet, um während der Laborübung das Auffinden zu erleichtern. Abbildung 4.8 zeigt die Anlage vor dem Anbringen der Generator-/Kondensatorbehälterisolation und der Heißwasserversorgungsisolierung.



Abbildung 4.8: Absorptionskältemaschine vor dem Anbringen der Isolierung

4.5.1 Probleme während des Aufbaus

Schwierigkeiten während des Zusammenbaus gab es bei den Schweißarbeiten, da die Materialstärken teilweise sehr unterschiedlich ausfielen. Bei dem Absorberbehälter waren des Weiteren die Schaugläser in falschen Winkeln angeordnet und ein Laserausschnitt für das Schauglas welches auf den Absorber blicken lassen sollte, fehlte. Die geplanten Pumpen lieferten zu wenig Pumpenleistung, da die Förderhöhe, die Druckverluste durch die 4 mm dünnen Kupferleitungen sowie die durch die Durchflusssensoren entstehenden Druckverluste bei der Auslegung nicht berücksichtigt wurden. Die Kondensatwanne, die ursprünglich aus einem Kunststoffrohr gebaut wurde, hielt den Belastungen nicht stand und musste gegen eine aus Kupferblech getauscht werden.

5 Dichtheitsprüfung

An eine H₂O/LiBr - Absorptionskältemaschine werden hohe Anforderung bezüglich der Anlagendichtheit gestellt. Absorptionskältemaschinen mit Lithiumbromidlösung arbeiten typischerweise im Bereich von 5 mbar bis 8 mbar, was an der Charakteristik des Dampfdruckes des Arbeitsmediums liegt. Der Anlagendruck wird durch den Dampfdruck von reinem Wasser im Verdampfer und Kondensator vorgegeben. So liegt der Dampfdruck bei einer Verdampfertemperatur von 5 °C bei 8,72 mbar. Laut [12] sinkt die Absorberleistung bei einem Luftanteil von 0,1 %, was bei einem Betriebsdruck von 8,72 mbar im Absorber eine Druckerhöhung um 0,00872 mbar bedeuten würde, da die Luft den Wärme- und Stoffübergang negativ beeinflusst. Zusätzlich begünstigt ein Luftzutritt die Korrosion, vgl. [5], S. 113. Es ist daher notwendig, die Anlage vor Inbetriebnahme einer Dichtheitsprüfung zu unterziehen um potentielle Lecks zu finden und zu beseitigen.

5.1 Leckrate

Da in der Regel keine Vakuumanlage absolut dicht ist, wurde in der Vakuumtechnik der Begriff der Leckrate q_L eingeführt, vgl. [13], S. 469.

$$q_L = V \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (5.1)$$

mit:

Tabelle 5.1: Leckrate

q_L	<i>Leckrate [mbar·l·s⁻¹]</i>
V	<i>Volumen des Behälters [l]</i>
Δp	<i>Druckdifferenz [mbar]</i>
Δt	<i>Messdauer [s]</i>

Für Anlagen welche im Hochvakuum operieren gelten in etwa folgende Werte für die Gesamtleckrate der Anlage:

Tabelle 5.2: erforderliche Gesamtleckraten, vgl. [13], S. 471

Gesamtleckrate q_L	Dichtheit
$10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$	<i>sehr dicht</i>
$10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$	<i>hinreichend dicht</i>
$10^{-4} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$	<i>undicht</i>

Die hier gebaute Absorptionskältemaschine sollte daher bei einer geplanten Betriebszeit über 8 Stunden eine Gesamtleckrate von 10^{-5} mbar·l·s⁻¹ nicht überschreiten. Bei einem Anlagenvolumen von 60 l würde das eine Druckerhöhung von 0,0048 mbar erlauben.

5.2 Leckarten

Um potentielle Lecks ausfindig zu machen, müssen gefährdete Stellen und Bereiche genau untersucht werden. Grundsätzlich werden drei Leckarten unterschieden, Porenlecks, Lecks in lösbaren und nicht lösbaren Verbindungen und virtuelle oder scheinbare Lecks. Unter einem Porenleck versteht man feine Kanäle, Haarrisse oder Versetzungen, die durch mechanische oder thermische Bearbeitung entstehen. Diese Lecks besitzen eine Leckrate im Bereich von $q_L < 10^{-11}$ mbar·l·s⁻¹ und müssen daher bei der Absorptionskältemaschine nicht berücksichtigt werden. Lecks in lösbaren und nicht lösbaren Verbindungen umfassen Lecks in Verbindungen die durch Dichtungen hergestellt wurden, etwa Flanschverbindungen und Verschraubungen, sowie Verbindungen welche durch Schweißen oder Hartlöten hergestellt wurden. Diese Leckart ist die am ehesten mögliche bei dieser Absorptionskältemaschine. Es müssen daher sämtliche Schweißstellen (Flansche, Schaugläser, angeschweißte Rohre) sowie alle verschraubten Stellen (Flansche, Wärmetauscher, Schneidringverbindungen und dergleichen) einer Untersuchung unterzogen werden. Die dritte Art eines Lecks, ein virtuelles oder scheinbares Leck, liegt vor, wenn Hohlräume mit nur kleinem Querschnitt mit dem evakuierten Behälter verbunden sind, wie zum Beispiel Sacklöcher. Die Desorption der Innenwände und Wärmetauscher kann auch als virtuelles Leck angesehen werden. Die Evakuierung solcher Hohlräume dauert sehr lange und lässt auf ein echtes Leck schließen, vgl. [13], S. 472. In dieser Anlage besteht die Möglichkeit eines virtuellen Lecks bei der Trennwand zwischen Absorber- und Verdampferkammer, da diese Stelle mittels Hochtemperatursilikon abgedichtet wurde.

5.3 Lecksuchverfahren

Lecksuchverfahren dienen dazu, festzustellen, ob Anlagen dicht sind und falls nicht, die undichten Stellen zu lokalisieren. Es werden Überdruck- und Vakuumverfahren unterschieden. Anlagen die im Vakuum operieren, sollten bei Möglichkeit auch mittels eines Vakuumlecksuchverfahrens untersucht werden. Tabelle 5.3 und 5.4 zeigen eine Auswahl an Lecksuchverfahren im Überdruck- und Vakuumverfahren und die mittels dieser Methode nachweisbaren Leckraten.

Tabelle 5.3: Überdrucklecksuchverfahren, vgl. [13], S. 474ff.

<i>Method</i>	<i>Kleinste feststellbares Leck mbar·l·s⁻¹</i>	<i>Prüfstoff</i>
<i>Messen des Druckabfalls</i>	<i>1</i>	<i>Luft</i>
<i>Abdrücken mit Flüssigkeit</i>	<i>1</i>	<i>Wasser, Öl</i>
<i>Blasentest unter Wasser</i>	<i>ungefähr 10⁻⁵</i>	<i>Luft</i>
<i>Seifenblasentest</i>	<i>ungefähr 10⁻⁵</i>	<i>Luft</i>
<i>Ammoniak unter Druck</i>	<i>ungefähr 10⁻⁷</i>	<i>Ammoniak</i>
<i>Helium-Leckdetektor</i>	<i>10⁻⁷</i>	<i>Helium</i>
<i>Massenspektrometer</i>	<i>einige 10⁻⁷</i>	<i>Helium, Wasserstoff</i>

Tabelle 5.4: Vakuumlecksuchverfahren, vgl. [13], S. 480ff.

<i>Method</i>	<i>Kleinste feststellbares Leck mbar·l·s⁻¹</i>	<i>Druckbereich mbar</i>
<i>Hochfrequenz Vakuumprüfer</i>	<i>ungefähr 10⁻³</i>	<i>10⁻³ ... 10</i>
<i>Druckanstieg</i>	<i>ungefähr 10⁻⁵</i>	<i>10⁻⁵ ... 1000</i>
<i>Helium Massenspektrometer</i>	<i>10⁻¹⁰ ... 10⁻¹²</i>	
<i>Wärmeleitungs-Vakuummeter</i>	<i>10⁻³ ... 10⁻⁵</i>	<i>10⁻³ ... 10</i>
<i>Ionisations-V.M. mit heißer Kathode</i>	<i>ungefähr 10⁻⁶</i>	<i>10⁻⁶ ... 10⁻⁴</i>
<i>Ionisations-V.M. mit kalter Kathode</i>	<i>ungefähr 10⁻⁶</i>	<i>10⁻⁶ ... 10⁻³</i>

Wie bereits vorhin erwähnt reicht es bei dieser Anlage, eine Leckrate von 10^{-5} mbar·l·s⁻¹ einzuhalten.

Es werden daher folgende Lecksuchverfahren bei dieser Anlage angewandt:

Wärmetauscher:

- Überdrucklecksuche durch Abdrücken mit Flüssigkeiten
- Überdrucklecksuche durch Seifenblasentest

Gesamtanlage:

- Überdrucklecksuche durch Seifenblasentest
- Überdrucklecksuche durch Druckabfallmessung
- Vakuumlecksuche durch Druckanstiegmessung

Sollten diese Verfahren nicht das gewünschte Ergebnis liefern, so muss zur Lokalisierung der Lecks beispielsweise ein Heliumlecksuchverfahren durchgeführt werden. Um eine systematische Lecksuche durchzuführen, wurde ein Protokoll erstellt, um alle potentiellen Stellen zu erfassen, vgl. 12.3.

5.4 Prüfung der Wärmetauscher

Die gelöteten Wärmetauscher von Generator, Kondensator Absorber und Verdampfer wurden einzeln mittels Prüfpumpe auf Undichtigkeiten getestet, um Dichtheit gegenüber der evakuierten Anlage zu gewährleisten. Wären hier undichte Stellen, so wären diese bei der Dichtheitsprüfung der Gesamtanlage nicht beziehungsweise nur sehr schwer auszumachen.

5.4.1 Überdrucklecksuche durch Abdrücken mit Flüssigkeiten

Die Wärmetauscher wurden auf einer Seite verschlossen, mit Wasser befüllt und anschließend abgedrückt. Die Druckbeaufschlagung betrug 3 bar und die Prüfdauer lag bei 20 Minuten, die verwendete Prüfpumpe ist vom Typ RP 50 von der Firma Rothenberger und erlaubt eine Druckprüfung bis 60 bar [14]. Die kleinsten nachweisbaren Leckraten bei diesem Verfahren betragen etwa $1 \text{ mbar}\cdot\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$, was nicht der geforderten Leckrate von $10^{-5} \text{ mbar}\cdot\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ entspricht. Es ist daher ein weiteres, empfindlicheres, Lecksuchverfahren mittels Seifenblasentest notwendig.

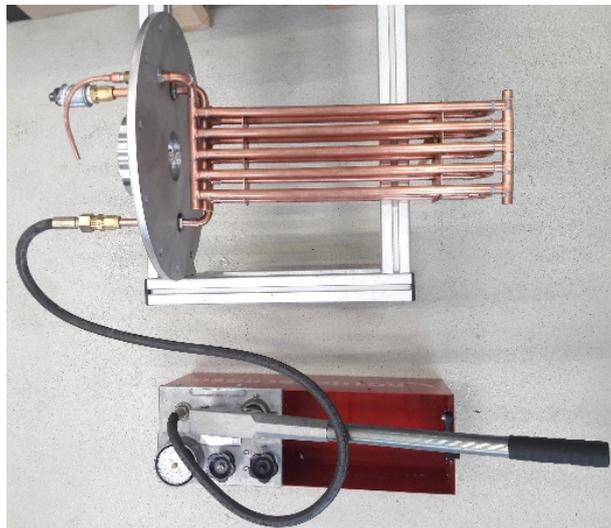


Abbildung 5.1: Abdrücken mit Flüssigkeit des Verdampferwärmetauschers

5.4.2 Überdrucklecksuche durch Seifenblasentest

Sämtliche Wärmetauscher wurden mit 7 bar Druck beaufschlagt. Anschließend wurde jede Lötstelle mit Lecksuchflüssigkeit untersucht. Dieser Vorgang wurde an allen Wärmetauschern durchgeführt.



Abbildung 5.2: Seifenblasentest am Kondensatorwärmetauscher

5.5 Prüfung der Gesamtanlage

Um eine systematische Dichtheitsüberprüfung der Gesamtanlage zu ermöglichen, wurde ein Protokoll mit allen möglichen Leckstellen erstellt, siehe Anhang 12.3. Die Gesamtanlage wurde zunächst mittels Seifenblasentest und anschließend mit einem über 152 Stunden dauernden Druckabfalltest geprüft. Nachdem Absolutdrucksensoren für den Vakuumeinsatz eingebaut wurden, wurde eine Druckanstiegmessung durchgeführt.

5.5.1 Überdrucklecksuche durch Seifenblasentest

Die Gesamtanlage wurde mit 2 bar Druck beaufschlagt. Anschließend erfolgte eine genaue Überprüfung jeder möglichen Leckstelle nach Prüfprotokoll. Alle undichten Verschraubungen wurden mittels Nachziehen oder Dichtungsaustausch gedichtet, auch eine undichte Stelle an einer Schweißnaht musste nachgebessert werden. Abbildung 5.3 zeigt die Seifenblasenbildung an einer undichten Stelle einer Schweißnaht.



Abbildung 5.3: Seifenblasenbildung an undichter Pore einer Schweißnaht

5.5.2 Überdrucklecksuche durch Druckabfallmessung

Nach positiv erfolgter Überdrucklecksuche mittels Seifenblasentest wurde die Gesamtanlage einer Druckabfallmessung über 152 Stunden unterzogen. Da für diesen Test nur Differenzdrucksensoren [15] zur Verfügung standen, musste die Messung mit dem während der Messung herrschenden Luftdruck [16] korrigiert werden. Da auch die Temperatur Einfluss auf den Anlagendruck nimmt, wurde mittels idealer Gasgleichung die Druckänderung unter Temperatureinfluss berechnet.

$$p_{Luft} = \rho_{Luft} \cdot R_{Luft} \cdot T \quad (5.2)$$

mit:

Tabelle 5.5: Druckänderung unter Temperatureinfluss

p_{Luft}	Luftdruck in Behälter, Anfangswert: 201,061 kPa
ρ_{Luft}	Dichte Luft, Anfangswert: 2,38 kg/m ³
R_{Luft}	Gaskonstante trockene Luft, 287,05 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
T	Temperatur, Anfangswert 294,45 K

Abbildung 5.4 zeigt den Umgebungsluftdruck, die Druckdifferenz zwischen Anlage und Umgebungsdruck und die berechnete Druckänderung unter Temperatureinfluss. Es ist ersichtlich, dass ein Anstieg des Umgebungsluftdruckes zu einem Fallen der gemessenen Druckdifferenz führt.

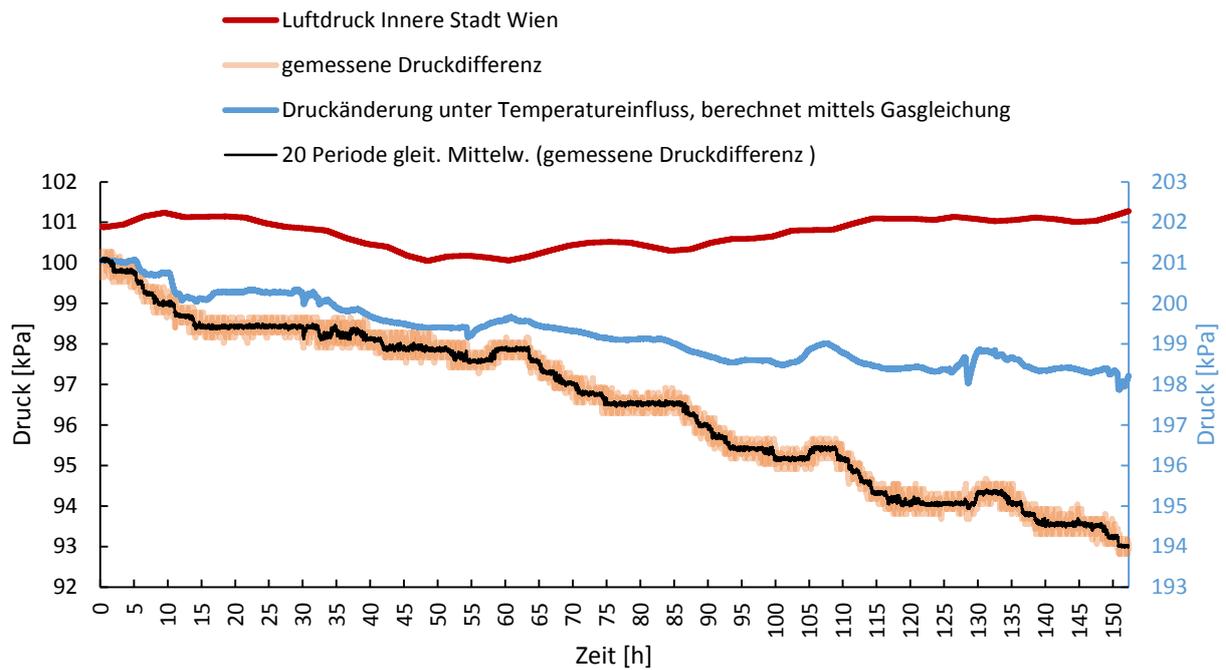


Abbildung 5.4: Druckabfall über 152 Stunden

Um den Druckverlust berechnen zu können, muss die Druckdifferenz um den Umgebungsluftdruck korrigiert werden. Der Absolutdruck, der in der Anlage herrscht, berechnet sich aus der Summe des Umgebungsluftdruckes und der gemessenen Druckdifferenz. Abbildung 5.5 zeigt den Absolutdruck sowie die Druckänderung unter Temperatureinfluss.

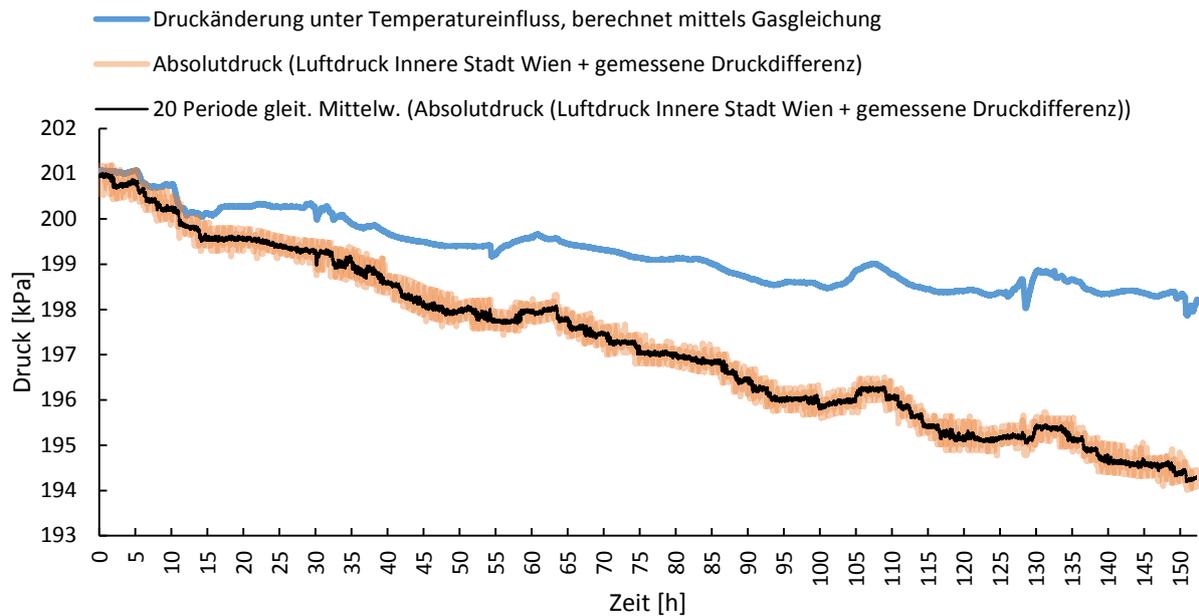


Abbildung 5.5: Absolutdruck und Druck unter Temperatureinfluss im Vergleich

Die Differenz zwischen dem Druck unter Temperatureinfluss und dem Absolutdruck spiegelt den realen Druckverlust wider. In Abbildung 5.6 wird der Druckverlust über 152 Stunden dargestellt.

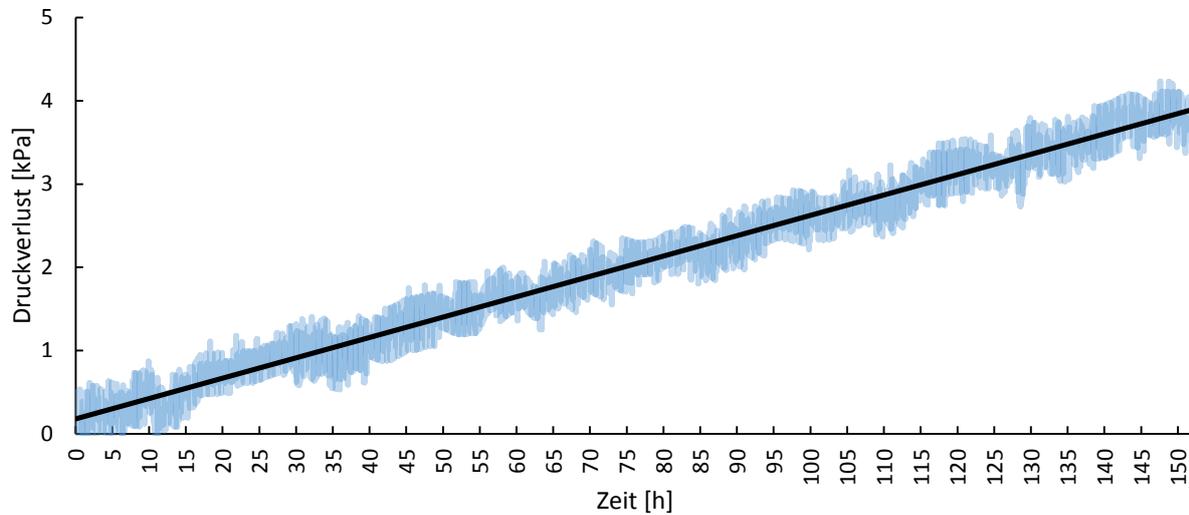


Abbildung 5.6: Druckverlust über 152 Stunden

Da der Drucksensor eine relativ große Schwankungsbreite aufweist, wurde eine Ausgleichsgerade erstellt. Die Ausgleichsgerade besitzt folgende Form:

$$\text{Druckverlust} = 0,0000678631425838752 \cdot t + 0,18228233068781 \quad (5.3)$$

Der absolute Druckverlust über 152 Stunden beträgt 3,894 kPa. Dies führt zu einer Leckrate q_L von $4,26 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$. Die geforderte Leckrate von $10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ wird daher deutlich überschritten.

5.5.3 Vakuumlecksuche durch Druckanstiegmessung

Bei dieser Methode wurde die Anlage auf etwa 5 mbar evakuiert und anschließend der Druckanstieg über einen gewissen Zeitraum gemessen. Die Leckrate q_L berechnet sich nach Gleichung 5.1. Zeigt sich zu Beginn ein rascher Druckanstieg, so könnte es sich um virtuelle Lecks oder Entgasung und Verdampfung von vorhandener Flüssigkeit handeln, vgl. [13], S. 481. Um potentielle Leckstellen besser Orten zu können, wurden Absorber-/Verdampferbehälter beziehungsweise Generator-/Kondensatorbehälter durch Schließen der Ventile zuerst jeweils einzeln einer Druckanstiegprüfung unterzogen. Abbildung 5.7 zeigt den Druckanstieg im Absorber-/Verdampferbehälter über 3 Stunden.

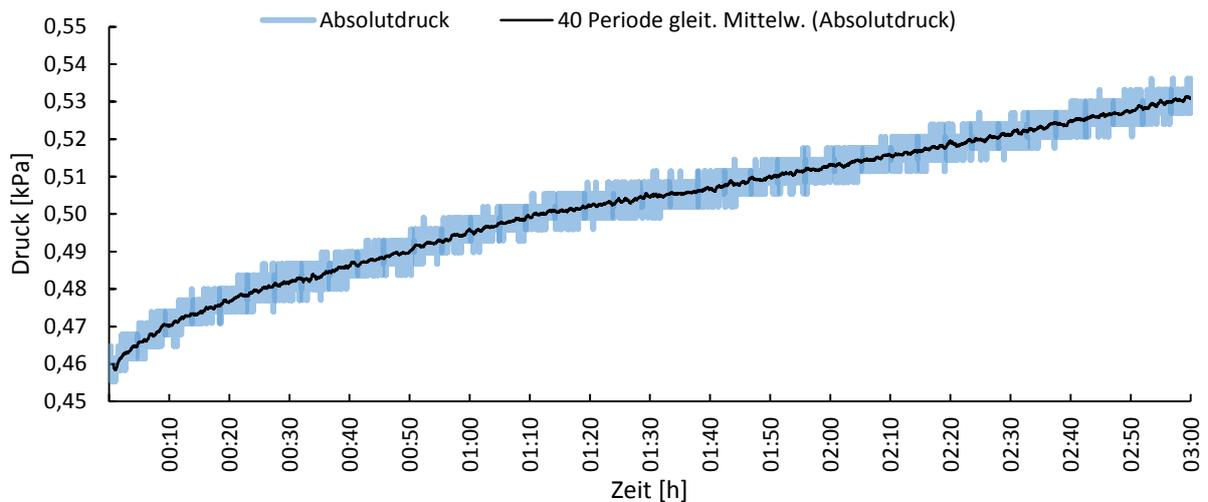


Abbildung 5.7: Druckanstiegmessung im Absorber-/Verdampferbehälter über 3 Stunden

Über 3 Stunden stieg der Druck im Absorber-/Verdampferbehälter um 0,694 mbar. Bei einem Behältervolumen von 44,18 l bedeutet dies eine Leckrate von $2,839 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$.

In Abbildung 5.8 ist der Druckanstieg über 3 Stunden im Generator-/Kondensatorbehälter ersichtlich. Der Druckanstieg lag bei 5,899 mbar und fiel wesentlich höher als im Absorber-/Verdampferbehälter aus. Die Leckrate liegt bei diesem Druckanstieg und einem Behältervolumen von 15,7 l bei $8,577 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$.

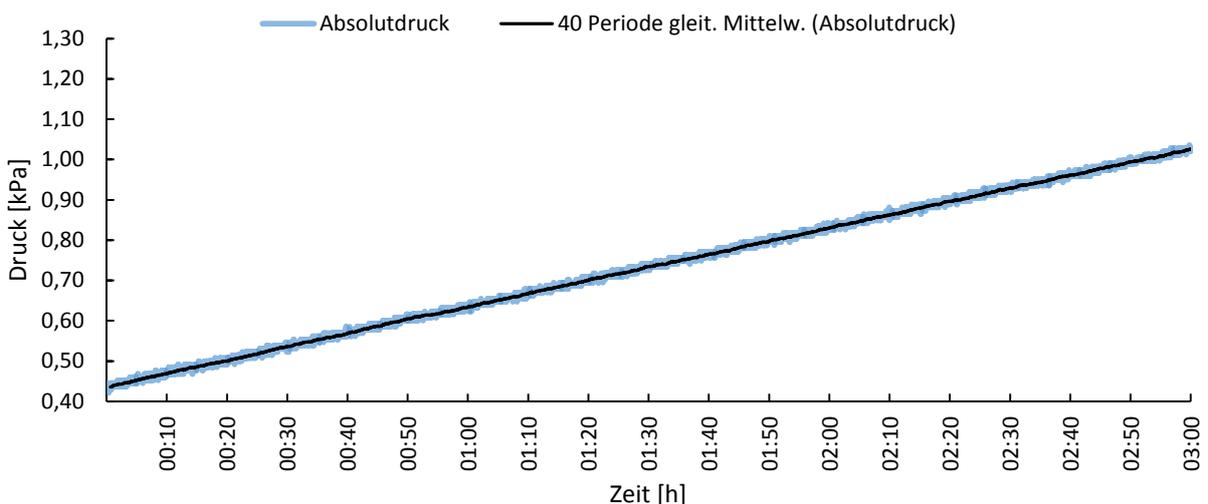


Abbildung 5.8: Druckanstiegmessung im Generator-/Kondensatorbehälter über 3 Stunden mit Volumenstromsensoren

Durch die Anordnung der Ventile zwischen den beiden Behältern fallen die Volumenstromsensoren in das Volumen des Generator-/Kondensatorbehälters. Diese Volumenstromsensoren sind nur bis zu einem Druck von -0,7 bar klassifiziert, vgl. Abschnitt 6.3.2, und könnten daher potentielle Leckstellen darstellen. Da der Druckanstieg im Generator-/Kondensatorbehälter um mehr als das Dreifache höher ausfiel, als jener in Absorber-/Verdampferbehälter, wurden die Durchflusssensoren für eine weitere Messung durch geschlossene Ventile ersetzt. Abbildung 5.9 zeigt den Druckanstieg im Generator-/Kondensatorbehälter ohne Volumenstromsensoren.

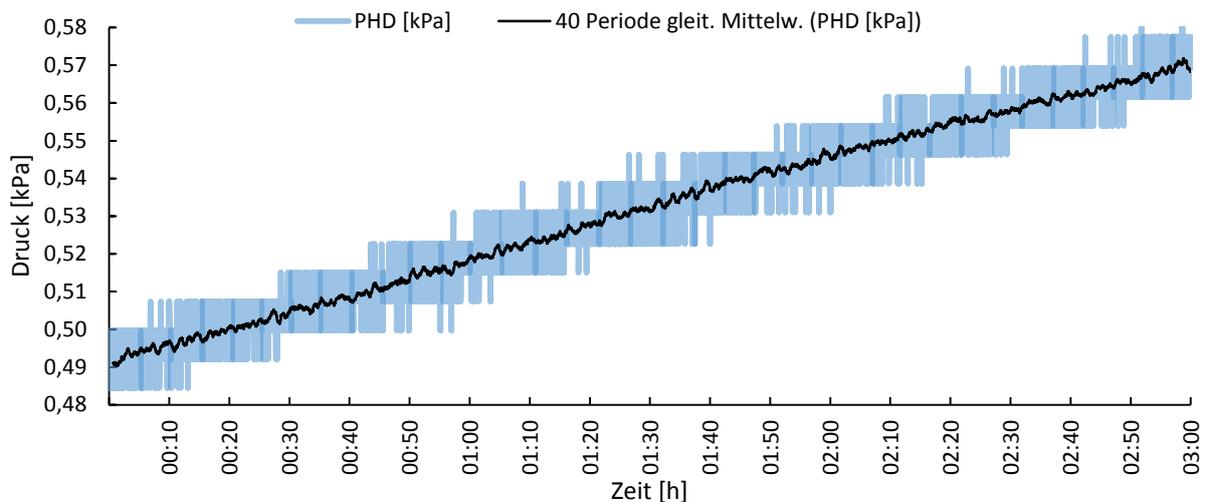


Abbildung 5.9: Druckanstiegmessung im Generator-/Kondensatorbehälter über 3 Stunden ohne Volumenstromsensoren

Der Absolutdruck stieg in 3 Stunden um 0,79 mbar, die Leckrate ohne Volumenstromsensoren liegt daher bei $1,149 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ und fällt wesentlich geringer aus, als jene mit verbauten Volumenstromsensoren. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Volumenstromsensoren den hohen Druckanstieg verursachen und eine Leckstelle darstellen. Nach diesen Tests wurden die Volumenstromsensoren wieder eingebaut und die Gesamtanlage einer Druckanstiegmessung unterzogen. Abbildung 5.10 stellt den Druckanstieg der Gesamtanlage gemessen über 3 Stunden dar.

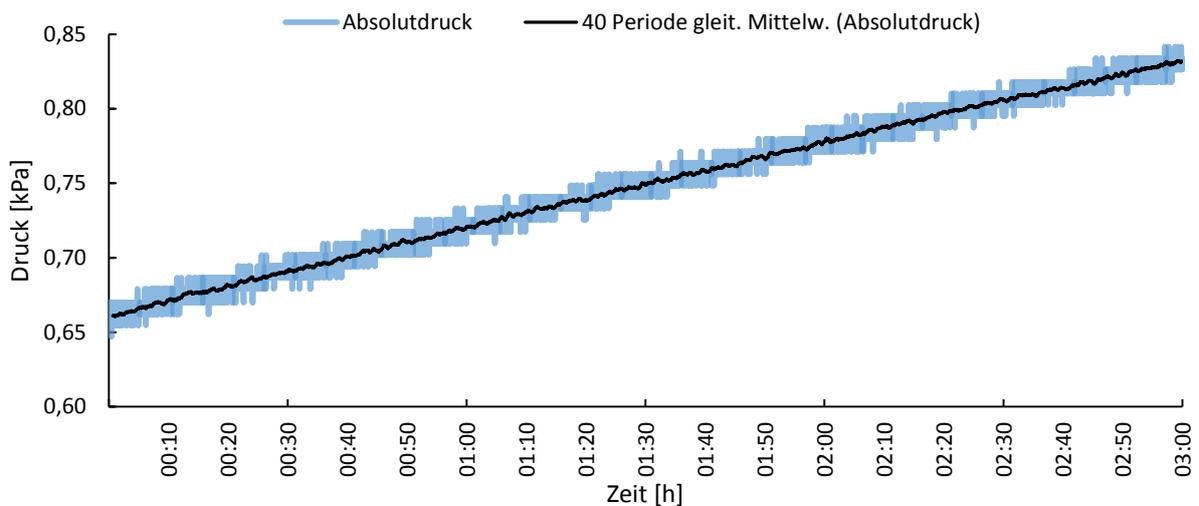


Abbildung 5.10: Druckanstiegmessung der Gesamtanlage über 3 Stunden

Der Druckanstieg in der Gesamtanlage über 3 Stunden betrug 1,705 mbar. Mit einem Behältervolumen von etwa 60 l ergibt dies eine Leckrate von $9,474 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$, was deutlich über der geforderten Leckrate von $10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ liegt.

Für die letzte Druckanstiegmessung wurde die Anlage mit 15 kg Lithiumbromidlösung befüllt. Alle Lösungskreisläufe wurden getestet, die Leitungen zwischen den beiden Behältern und der Temperaturwechsler waren folglich entlüftet und mit Lithiumbromidlösung gefüllt.

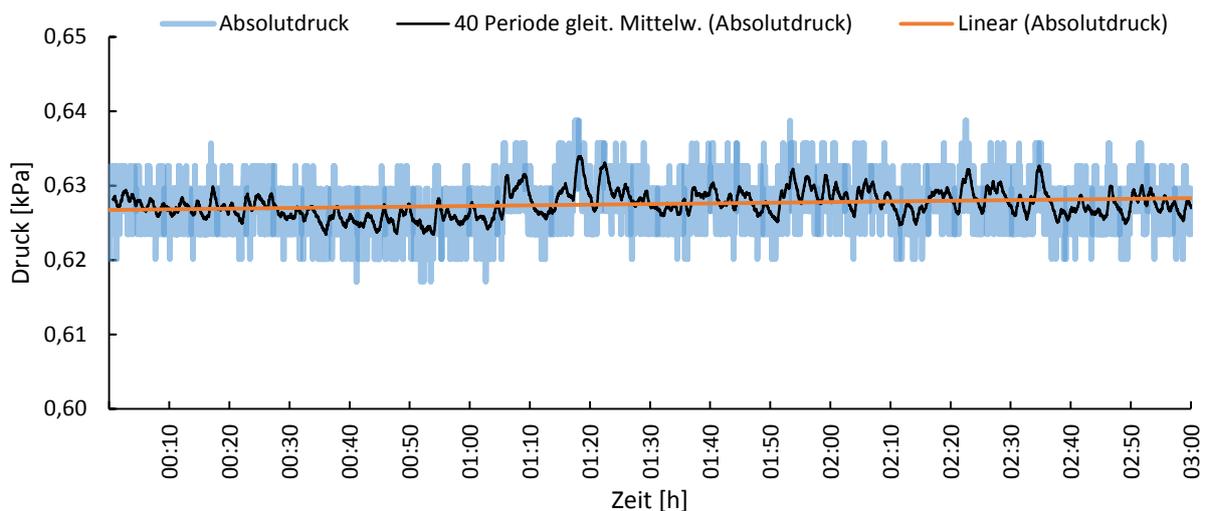


Abbildung 5.11: Druckanstiegmessung der gefüllten Gesamtanlage über 3 Stunden

Die Druckanstiegmessung der gefüllten Gesamtanlage über 3 Stunden erfolgte bei einer konstanten

Temperatur von 22 °C. Der Absolutdruckanstieg, aufgrund der starken Ausschläge des Drucksensors mit Hilfe der Ausgleichsgeraden berechnet, beträgt nach 3 Stunden 0,01599 mbar. Dies führt zu einer Leckrate von $8,881 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$, die dem Sollwert von $10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ für eine hinreichend dichte Anlage relativ nahe kommt.

5.6 Resümee Dichtheitsprüfung - Empfehlungen

Die geforderte Leckrate von $10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ für eine hinreichend dichte Anlage kann derzeit nur bei gefülltem Zustand der Anlage in etwa erfüllt werden. Durch die große Anzahl an Verschraubungen bleiben viele mögliche undichte Stellen über. Die Druckanstiegmessungen des Generator-/Kondensatorbehälters mit und ohne Volumenstromsensoren deuten darauf hin, dass die Volumenstromsensoren für den Vakuumbetrieb nicht geeignet sind. Es sollte daher über einen Austausch nachgedacht werden. Die Flanschverschraubungen dürften hingegen eine hohe Dichtigkeit aufweisen. Um weitere Lecks örtlich genau auszumachen, empfiehlt sich eine Überdrucklecksuche mittels Helium-Massenspektrometer, was auch dem derzeitigen technischen Stand bei kommerziellen Anlagen entspricht. Mit dieser Methode lassen sich Lecks mit Leckraten von $10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ aufspüren, vgl. [13], S. 476ff.

Da es sich hier um eine Versuchsanlage für den Laborunterricht handelt, welcher nur einen Betrieb von etwa 8 Stunden erfordert, könnten auch mit einem Druckverlust von 2 mbar in 8 Stunden Versuche durchgeführt werden. Dies würde einer Leckrate von $4,167 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ entsprechen. Diese Druckerhöhung hat eine Auswirkung auf die Verdampfungstemperatur von Wasser, so verdampft das Kühlwasser bei 8,33 mbar Anlagendruck laut Auslegung bei 4,34 °C, bei 10,33 mbar erst bei 7,44 °C. Diese Werte wurden mittels EES, vgl. [2], errechnet. Tabelle 5.6 gibt Auskunft über die mit unterschiedlichen Methoden gemessenen Leckraten.

Tabelle 5.6: Leckraten bei unterschiedlichen Dichtheitsmessungen

<i>Messung</i>	<i>Methode</i>	<i>Leckrate q_L</i>
<i>Gesamtanlage</i>	<i>Druckabfallmessung</i>	$4,26 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$
<i>Absorber-/Verdampferbehälter</i>	<i>Druckanstiegmessung</i>	$2,839 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$
<i>Generator-/Kondensatorbehälter mit Volumenstromsensoren</i>	<i>Druckanstiegmessung</i>	$8,577 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$
<i>Generator-/Kondensatorbehälter ohne Volumenstromsensoren</i>	<i>Druckanstiegmessung</i>	$1,149 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$
<i>Gesamtanlage</i>	<i>Druckanstiegmessung</i>	$9,474 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$
<i>Gesamtanlage gefüllt</i>	<i>Druckanstiegmessung</i>	$8,881 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$

Um die Leckrate der Absorptionskältemaschine nachhaltig zu senken, wird empfohlen die Durchflusssensoren auszutauschen, da diese nur bis zu einem Druck von -0,7 bar zertifiziert sind, vgl. [17].

6 Messtechnik

Die Messtechnik wurde so gestaltet, dass ein ausreichender Überblick über die Prozesse in der Anlage gegeben ist und eine Laborübung sinnvoll gestaltet werden kann. In der Anlage wurden folgende Komponenten verbaut:

Tabelle 6.1: Komponenten der Messtechnik

<i>Anzahl</i>	<i>Art</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Quelle</i>
8	Temperatursensoren	Einschraubfühler, PT 100, 4-Leiter	[18]
5	Temperatursensoren	Kabelfühler, PT 100, 4-Leiter	[19]
1	Drucksensor	PMC21-AA1A2CAWTJA+F3 (100 mbar)	[20]
1	Drucksensor	PMC21-AA1A1EAWTJA+F3 (250 mbar)	[20]
2	Volumenstromsensoren Lösung	FCH-m-ALU-IND	[21]
3	Volumenstromsensoren Wasser	FCH-C-Ms-N	[17]
1	Speicherprogrammierbare Steuerung	X20CP1585	[22]

6.1 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung bei den wasserführenden Kreisläufen erfolgt über 4-Leiter PT-100 Einschraubfühler, die über ein T-Stück an den Ein- und Austritten der Wärmetauscher montiert werden. Bei den internen Kreisläufen erfolgt die Montage der 4-Leiter Kabelfühler PT-100 Sensoren über T-Schneidringverschraubungen. Es wurden 4-Leiter Sensoren verbaut um Ungenauigkeiten durch den Leitungswiderstand zu unterbinden. Die Sensoren sind für Temperaturen bis 105 °C ausgelegt und besitzen eine von der Temperatur abhängige Abweichung, vgl. [23], S. 12.

$$\text{Abweichung} = \pm (0,15 + 0,002 \cdot |T|) \quad (6.1)$$

6.2 Druckmessung

Im Generator- beziehungsweise Kondensatorbehälter und im Absorber- beziehungsweise Verdampferbehälter ist jeweils ein Drucksensor vorgesehen. Die vorgesehenen Relativdrucksensoren, welche einen Messbereich von -1 bar bis 3 bar ausgehend vom Atmosphärendruck besitzen, stellten sich als zu ungenau für Messungen im Grobvakuum heraus. Es ist außerdem zu beachten, dass bei der Verwendung solcher Sensoren der Absolutdruck im Labor stets bekannt sein sollte. Diese Sensoren konnten daher nur zur Druckabfallmessung bei der Dichtheitsüberprüfung, vgl. Abschnitt 5.5.2, verwendet werden.

Für den Betrieb der Anlage wurden daher Sensoren des Typs Cerabar PMC21 von der Firma Endress+Hauser GmbH bezogen. Bei diesen Sensoren handelt es sich um Absolutdrucksensoren. Der Drucksensor für den Generator-/Kondensatorbehälter des Typs PMC21-AA1A2EAWTJA+F3 besitzt einen Messbereich von 0-250 mbar, der für den Absorber-/Verdampferbehälter des Typs PMC21-AA1A2CAWTJA+F3 arbeitet im Messbereich von 0-100 mbar, vgl. [20]. Die Sensoren geben den Druck mit einer Genauigkeit von $\pm 0,3\%$ an.

6.3 Volumenstrommessung

Die Volumenstrommessung dient dazu, Leistungen im Kreislauf zu berechnen und Komponenten mit einem definierten Volumenstrom zu versorgen. Derzeit werden Turbinenflusssensoren eingesetzt, welche allerdings einen hohen Druckverlust erzeugen. Eine Alternative können magnetisch-induktive Durchflussmesser darstellen. Hierbei fließt eine elektrisch leitende Flüssigkeit in einem Messrohr, welches mit elektrisch isolierender Oberfläche ausgestattet ist, durch ein von Feldspulen induziertes Magnetfeld. Dabei wird eine Spannung induziert, die von Elektroden abgegriffen wird und von dem Messumformer in skalierte Pulse umgewandelt wird. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass sie keine Druckverluste verursacht und dass eine Änderung von Viskosität oder Dichte keinen Einfluss auf die Messung hat, vgl. [24], S. 186. Diese Art der Volumenstrommessung wurde auch in anderen Absorptionsprojekten, vgl. [25] und [26], eingesetzt. Die Kosten dieser Sensoren liegen allerdings bei etwa dem Dreifachen der hier eingesetzten Sensoren.

6.3.1 Volumenstrommessung der wasserführenden Kreisläufe

Der Volumenstrom des Heißwassers, des Absorbers beziehungsweise des Kondensators sowie der des Verdampfers in den externen Kreisläufen wird mittels eines Turbinendurchflussmessers des Typs FCH-C-Ms-N [17] des Herstellers B.I.O-TECH e.K. durchgeführt. Der Messbereich dieses Sensors liegt bei 0,5–30 l/min bei Wasser mit 20 °C mit einer Messgenauigkeit von $\pm 2\%$ bei gleichbleibenden Betriebsbedingungen. Die Temperaturbeständigkeit ist mit einem Maximalwert von 80 °C angegeben, erste Heißwassertests bei 100 °C verliefen allerdings problemlos. Die verbauten Sensoren arbeiten mit einer Impulszahl von 450 Imp./l.

6.3.2 Volumenstrommessung der Kreisläufe mit Lithiumbromid

Die Volumenstrommessung der lithiumbromidführenden Kreisläufe erfolgt mittels Turbinendurchflusssensoren des Typs FCH-m-ALU-IND [21] des Herstellers B.I.O-TECH e.K. Der

Messbereich der Sensoren liegt bei 0,015–1,0 l/min bei Wasser mit 20 °C. Der Volumenstrommesser führt zu Dichtheitsproblemen, wie in 5.5.3 beschrieben wurde und ist nur für einen Druckbereich zwischen -0,7 und 10 bar vorgesehen. Der Sensor ist ursprünglich mit einem Gleichrichter mit Durchmesser D=1 mm ausgestattet um Verwirbelungen in der Strömung zu glätten und eine definierte Anströmung des Turbinenrads zu ermöglichen. Dieser Gleichrichter verursacht bei einem Volumenstrom von 0,3 l/min (Volumenstrom der reichen Lösung laut Auslegung: 0,2789 l/min) immerhin einen Druckverlust von 135 mbar, vergleiche Abbildung 6.1:

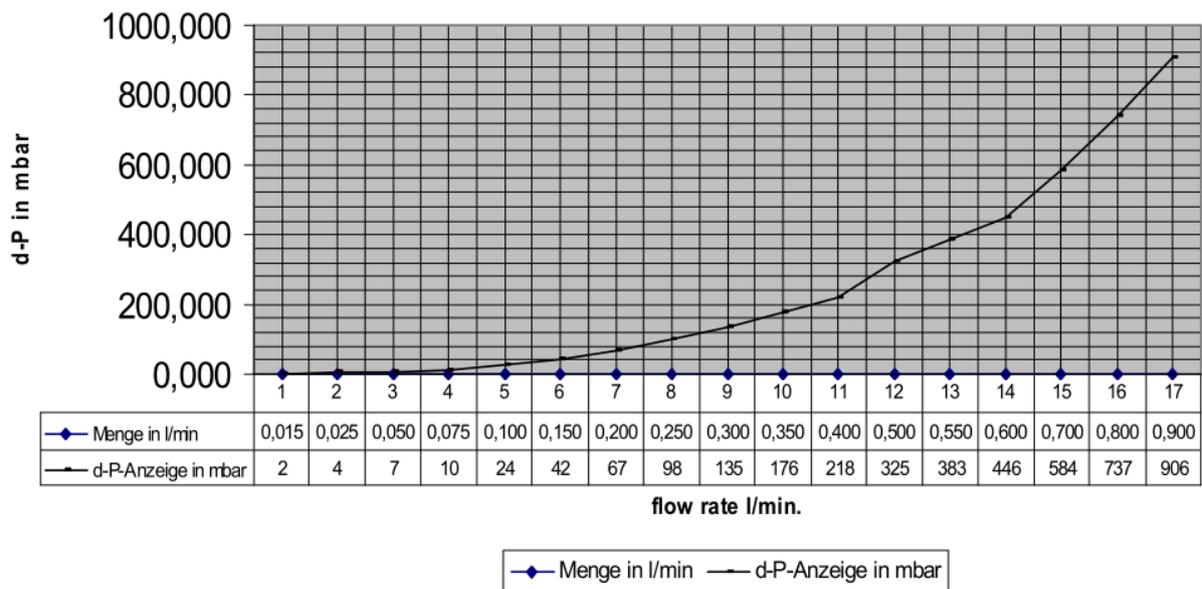


Abbildung 6.1: Druckverlust Volumenstromsensor FCH-m-ALU-IND in Abhängigkeit vom Volumenstrom, vgl. Anhang 12.5.1

Der Druckverlust des Volumenstrommessers führt zu Problemen in der Rohrleitung der armen Lösung, deren Volumenstrom nur auf dem Druckunterschied zwischen dem Generator-/Kondensatorbehälter und dem Absorber-/Verdampferbehälter sowie dem hydrostatischen Druck durch den Höhenunterschied zwischen Generator-/Kondensatorbehälter und Volumenstrommesser basiert. Im Generator-/Kondensatorbehälter herrscht laut Auslegungsdaten ein Druck von 72,86 mbar, vgl. Abschnitt 1.3. Der hydrostatische Druck, der auf dem Volumenstrommesser der armen Lösung ruht, berechnet sich bei einem Flüssigkeitsspiegel welcher 0,2 m über dem Volumenstrommesser liegt folgendermaßen:

$$p(h) = \rho \cdot g \cdot h = 1662 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,2 \text{ m} = 32,61 \text{ mbar} \tag{6.2}$$

Der Gesamtdruck liegt daher bei 105,47 mbar (Rohrleitungsdruckverluste nicht berücksichtigt) und ist

damit zu gering, um den Volumenstrommesser zu betreiben. Auch in der Praxis hat sich gezeigt, dass kein Volumenstrom in dieser Rohrleitung zu Stande kommt. Da der Volumenstrom der reichen Lösung trotz Pumpe ebenfalls nicht zufriedenstellend war, wurden die Gleichrichter entfernt und eine Kalibrierung der Volumenstrommesser durchgeführt, was aufgrund der Lithiumbromidlösung sowieso notwendig gewesen wäre. Hierbei ist aufgefallen, dass die beiden Volumenstrommesser eine sehr unterschiedliche Anzahl an Impulsen bei ähnlichem Volumenstrom erzeugen, was auf einen Defekt oder eventuell eine Verschmutzung hinweist. Die Kalibrierung erfolgt durch Aufnahme der erzeugten Impulse und Zeitmessung während des Befüllens eines Messbehälters mit einem Volumen von einem Liter bei unterschiedlichen Volumenströmen in einem Intervall +/-0,15 l/min um den Betriebspunkt der Volumenstrommesser (FI 02: 0,2789 l/min, FI 05: 0,2395 l/min).

Tabelle 6.2 zeigt die gemessenen und auf Liter/Minute umgerechneten Daten für die Kalibrierung des Volumenstromsensors FI 02:

Tabelle 6.2: Kalibrierdaten Volumenstromsensor FI 02

<i>Impulszahl/Liter</i>	<i>Sekunden/Liter</i>	<i>Liter/Minute</i>	<i>Impulszahl/Minute</i>
4389	276,78	0,2168	951,4416
4422	252,7	0,2374	1049,9406
4354	245,29	0,2446	1065,0251
4409	233,09	0,2574	1134,9264
4501	211,89	0,2832	1274,5292
4510	192,13	0,3123	1408,4214
4604	184,92	0,3245	1493,8352
4622	160,29	0,3743	1730,1142
4638	157,99	0,3798	1761,3773
4625	153,18	0,3917	1811,5942

Diagramm 6.2 zeigt die Impulszahlen pro Minute über den Litern pro Minute des Sensors FI 02. Da die zehn Messpunkte in etwa auf einer Gerade liegen, wird eine Regressionsgerade erzeugt welche als Berechnungsgrundlage für die B&R Software dient.

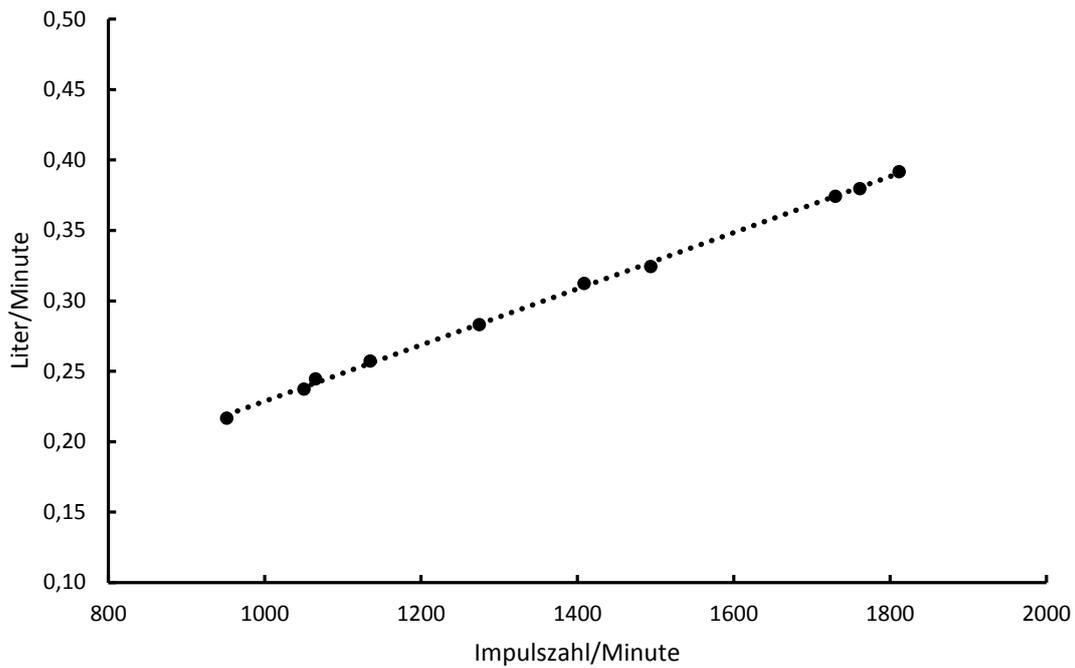


Abbildung 6.2: Kalibrierdaten Volumenstromsensor FI 02 und Ausgleichsgerade y_{FI02}

Die Ausgleichsgerade y_{FI02} zur Berechnung des Volumenstromes des Durchflusssensors FI 02 besitzt die Form:

$$y_{FI02} = 0,000199417560677136 \cdot x_{FI02} + 0,0293668961922508 \tag{6.3}$$

Die gleiche Vorgehensweise wurde auch für den Volumenstrommesser FI 05 angewandt. Tabelle 6.3 zeigt die gemessenen und auf Liter/Minute umgerechneten Daten für die Kalibrierung des Volumenstromsensors FI 05:

Tabelle 6.3: Kalibrierdaten Volumenstromsensor FI 05

<i>Impulszahl/Liter</i>	<i>Sekunden/Liter</i>	<i>Liter/Minute</i>	<i>Impulszahl/Minute</i>
1552	398,5	0,1506	233,6763
1524	367,98	0,1631	248,4918
1908	332,1	0,1807	344,7154
1868	317,94	0,1887	352,5193
2383	250,62	0,2394	570,5051
2375	243,44	0,2465	585,3598
2360	243,04	0,2469	582,6201
2647	171,73	0,3494	924,8239
2722	161,84	0,3707	1009,1448
2687	161,13	0,3724	1000,5586

Diagramm 6.3 zeigt die Impulszahlen pro Minute über den Litern pro Minute des Sensors FI 05. Eine durch die zehn Messpunkte gelegte Ausgleichsgerade dient als Berechnungsgrundlage für die B&R Software.

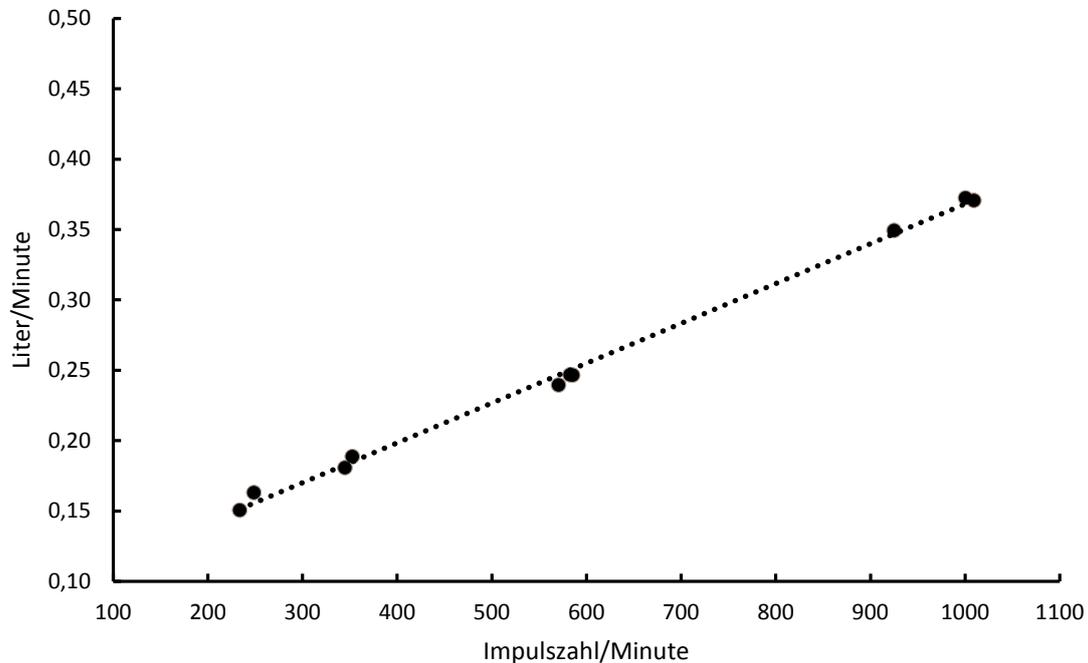


Abbildung 6.3: Kalibrierdaten Volumenstromsensor FI 05 und Ausgleichsgerade y_{FI05}

Die Ausgleichsgerade y_{FI05} zur Berechnung des Volumenstromes des Durchflusssensors FI 05 besitzt die Form:

$$y_{FI05} = 0,000282947422381376 \cdot x_{FI05} + 0,0852313328313332 \quad (6.4)$$

Die Volumenstromsensoren sind nun in einem Intervall +/-0,15 l/min um die Auslegungspunkte kalibriert.

6.4 Konzentrationsmessung

Bei Arbeitsstoffgemischen kann die Konzentration nur über die Dichte und Temperatur durchgeführt werden. Da bei dieser Anlage die Konzentrationskontrolle im Vordergrund steht und Coriolis-Massendurchflussmesser den preislichen Rahmen weit überschreiten, wurde eine diskontinuierliche Messmethode über einen Entnahmebehälter angewandt. Der Entnahmebehälter kann am Kondensator-/Generatorbehälter und Absorber-/Verdampferbehälter mittels Schneidring-

verschraubung angeschlossen werden. Anschließend wird der Druck im Behälter unter den Anlagendruck abgesenkt und ein definiertes Volumen von 0,25 l der Lösung entnommen. Danach wird der Behälter gewogen, um einen Rückschluss auf die Dichte nehmen zu können. Nach Eingabe der gemessenen Dichte in die Visualisierung wird die Konzentration ausgegeben. Die Lösung im Behälter kann durch Belüftung fast vollständig wieder in das System zurückgeleitet werden. Eine genaue Beschreibung des Entnahmeproganges befindet sich unter 9.3.

6.5 Speicherprogrammierbare Steuerung

Die Verarbeitung und Speicherung der Messdaten, die Steuerung der Heißwasserversorgung und die Visualisierung der Anlage erfolgen mittels einer speicherprogrammierbaren Steuerung des Typs X20CP1585 von der Firma B&R Industrial Automation GmbH, vgl. [22]. Für die Verarbeitung der Messdaten beziehungsweise das Ansteuern des Heizungsrelais wurde die Steuerung um folgende Module ergänzt:

- Temperatur: 4x X20ATB312 Modul für dreizehn Temperaturfühler, [27]
- Volumenstrom: 3x X20DI2377 Modul für fünf Volumenstrommesser, [28]
- Druck: 1x X20AI4622 Modul für zwei Drucksensoren, [29]
- Heizungsrelais: 1x X20DO4332 Modul für ein Heizungsrelais, [30]

Die gesamte B&R Steuerung ist folgendermaßen aufgebaut:



Abbildung 6.4: Aufbau der B&R Steuerung

7 Software

Die Software wurde mittels B&R Automation Studio 4.2 [31] programmiert und in der Programmiersprache „Structured Text“ (ST) verfasst. Eine genauere Beschreibung der Funktionen und der Visualisierung befindet sich in Abschnitt 7.2.2.

7.1 Anforderungen an Software

Nachfolgende Anforderungen wurden an die Software gestellt und umgesetzt:

- Umrechnung der gemessenen Werte in sinnvolle Einheiten
- Speicherung der Messdaten und Zugriff mittels Ethernet
- Visualisierung der Anlage mittels Anlagenschaltbild und Wiedergabe der aktuellen Messdaten
- Visualisierung der Anlage mittels Fließschaltbild, um eine Anlagenübersicht zu erlangen und einfache Bedienung der Ventile und Pumpen sicherzustellen
- Trends für Temperaturen, Drücke, Volumenströme, Wärmeströme sowie COP
- Berechnung der Wärmeströme in Generator, Kondensator, Absorber, Verdampfer sowie Temperaturwechsler
- Berechnung der Leistungszahl (COP)
- Berechnung der Enthalpie der wasserführenden Kreisläufe und der Lithiumbromidlösung-führenden Kreisläufe
- Berechnung der Konzentration der Lithiumbromidlösung bei Eingabe der aktuellen Dichte
- Kontrollmöglichkeit der Konzentration (nur möglich nach vorheriger Eingabe der gemessenen Dichte) und Warnung bei Kristallisationsgefahr (über 65 % Lithiumbromid in der Lösung)
- Ein- und Ausschalten der Heizung
- Zweipunktregelung der Heizung mit Eingabe der unteren und oberen Temperaturgrenze der Heißwasserversorgung

7.2 Anlagenvisualisierung

Um die Anlage während des Betriebs zu überwachen und zu steuern, wurde eine mehrere Seiten umfassende Visualisierung erstellt. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Funktionen der Visualisierung erklärt, wie eine Verbindung mit der SPS hergestellt wird und wie die Messdaten erhoben werden können.

7.2.1 Verbindung mit der SPS

Die Verbindung mit der SPS erfolgt über Ethernet mit Internetprotokoll TCP/IPv4. Der SPS wurden folgende Parameter manuell zugewiesen:

Tabelle 7.1: Netzwerkparameter SPS

<i>IP Adresse</i>	<i>10.0.0.60</i>
<i>Netzmaske</i>	<i>255.255.255.0</i>
<i>Port Nummer</i>	<i>5900</i>

Die Netzwerkeinstellungen des Geräts mit welchem der Zugriff auf die SPS erfolgen soll müssen dahingehend angepasst werden. Der Zugriff auf die Visualisierung der SPS kann anschließend mittels eines VNC (Virtual Network Computing) Viewers erfolgen.

7.2.2 Funktionen der Visualisierung

Die Visualisierung dient primär der Anzeige der aktuellen Messdaten der Absorptionskältemaschine, der Steuerung der Heißwasserversorgung sowie der Speicherung von Messdaten. Im Folgenden werden die Funktionen der Visualisierung erläutert. Die Visualisierung besteht aus sechs Seiten in der Größe von 1366x768 Pixel, welche durch Buttons am oberen Rand der Seiten gewechselt werden können.

Anlagenschema

Die Startseite, ersichtlich in Abbildung 7.1, zeigt den Kreisprozess mit allen Temperaturen, dem Druck in Generator-/Kondensatorbehälter sowie in Absorber-/Verdampferbehälter, den Volumenströmen sowie den errechneten Wärmeströmen und die Leistungszahl (COP).

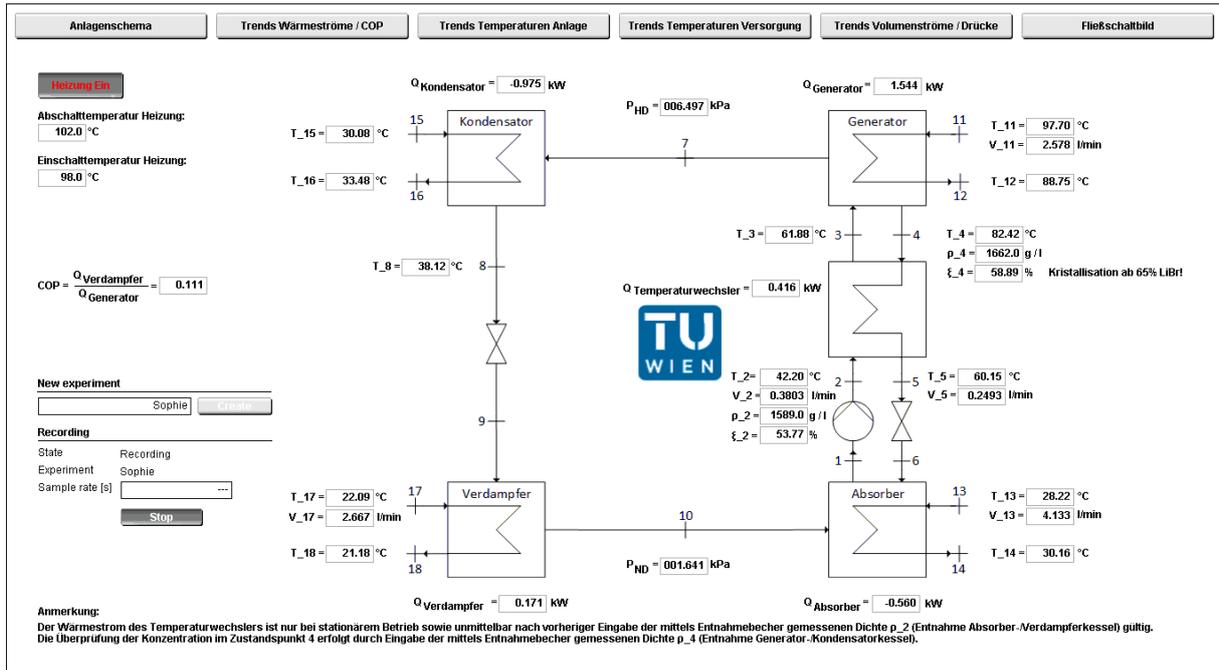


Abbildung 7.1: Startseite der Visualisierung, Anlagenschema

Da die Konzentrationsberechnung der Lithiumbromidlösung nur durch vorherige Messung der Dichte nach Entnahme mit dem Entnahmebehälter möglich ist, wurden die Felder ρ_2 und ρ_4 als Eingabefelder ausgeführt. Nach Eingabe der gemessenen Dichte mittels Ziffernblock, siehe Abbildung 7.2, wird die von der Temperatur abhängige Konzentration ausgegeben. Es gilt zu beachten, dass die ausgegebene Konzentration sowie der im Temperaturwechsler übertragene Wärmestrom nur bei stationärem Betrieb nach vorheriger Dichtemessung korrekt sind. Ein entsprechender Hinweis für Laborübungen wird am unteren Rand dieser Seite angezeigt. Eine genaue Beschreibung der Berechnung der Konzentration befindet sich in Abschnitt 7.2.4.

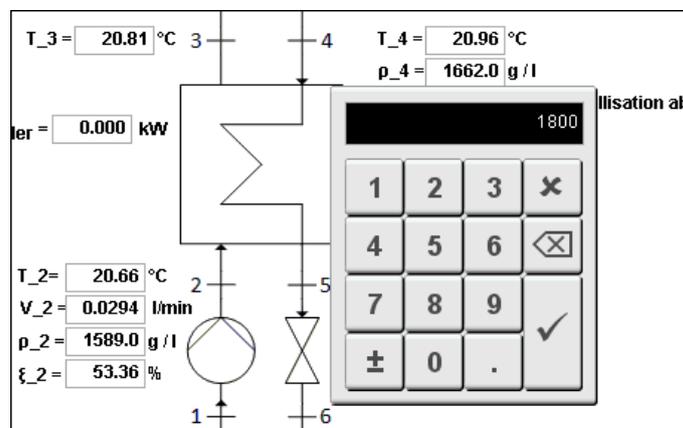
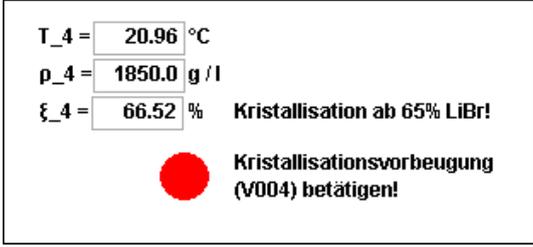


Abbildung 7.2: Eingabe der Dichte

Da eine Konzentration über 65 % zu einem Auskristallisieren des Lithiumbromids führen kann, wurde ein entsprechender Warnhinweis erstellt, welcher nach Eingabe einer Dichte die zu über 65 % Lithiumbromid führt, eingeblendet wird. In so einem Fall ist Ventil V 004 zu betätigen, welches Wasser aus dem Verdampferkreislauf in den Absorber einleitet und zu einer Verdünnung der Lithiumbromidlösung führt. Die höchste Konzentration an Lithiumbromid ist im Generator (Zustandspunkt 4) zu erwarten. Werden Dichtemessungen zur Konzentrationskontrolle durchgeführt sollten diese folglich durch Entnahme der Lösung am Kondensator-/Generatorbehälter (Ventil V 006) erfolgen. Abbildung 7.3 zeigt den Warnhinweis bei überhöhter Lithiumbromidkonzentration:



T_4 = 20.96 °C
rho_4 = 1850.0 g / l
xi_4 = 66.52 % **Kristallisation ab 65% LiBr!**
Kristallisationsvorbeugung (V004) betätigen!

Abbildung 7.3: Konzentrationswarnung bei einer Lithiumbromidkonzentration über 65 %

Eine weitere Funktion auf dieser Seite ist die Heizungssteuerung. Die Heizung wird über einen Button ein- und ausgeschaltet. Da die Heizungsregelung als Zweipunkregler ausgeführt ist, besteht die Möglichkeit, die Einschalt- sowie Abschalttemperatur per Ziffernblock einzugeben. Die maximale Abschalttemperatur wurde auf 110 °C begrenzt, um Beschädigungen zu vermeiden. Die Standardwerte der Heizungssteuerung liegen bei 98 °C für die Einschalttemperatur und bei 102 °C für die Abschalttemperatur, siehe Abbildung 7.4.



Heizung Ein

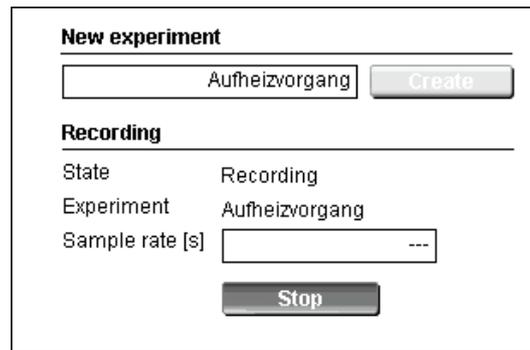
Abschalttemperatur Heizung:
102.0 °C

Einschalttemperatur Heizung:
98.0 °C

Abbildung 7.4: Steuerung der Heizung mit Temperatureingabemöglichkeit

Die aktuellen Anlagenbetriebsdaten werden nicht automatisch aufgezeichnet. Um Messdaten aufzuzeichnen, besteht die Möglichkeit, ein Experiment zu starten. Hierzu wird zuerst ein Experiment mittels Eingabe einer Bezeichnung und Drücken des „Create“-Buttons erstellt. Unter „State“ erscheint

nun der Wert „Ready“. Anschließend kann noch die „Sample Rate“ (Aufzeichnungsrate) in Sekunden angegeben werden. Durch Drücken des „Start“ - beziehungsweise „Stop“ - Buttons wird eine Messung gestartet beziehungsweise gestoppt. Während einer Aufzeichnung wird unter „State“ „Recording“ angezeigt. Bei einem Aufzeichnungsfehler wird bei „State“ „Error“ ausgegeben. Die Messdatenaufzeichnung ist in Abbildung 7.5 ersichtlich.



New experiment

Recording

State Recording
Experiment Aufheizvorgang
Sample rate [s]

Abbildung 7.5: Messdatenaufzeichnung

Trends/Wärmeströme/COP

Auf dieser Seite der Visualisierung werden Trenddaten der Wärmeströme sowie des COP angezeigt sowie die aktuellen Werte dieser Daten ausgegeben. Der Verlauf zeigt die vergangenen zehn Minuten an. Der Achsenwert reicht bis 2,5 kW, was der maximalen Heizleistung entspricht.

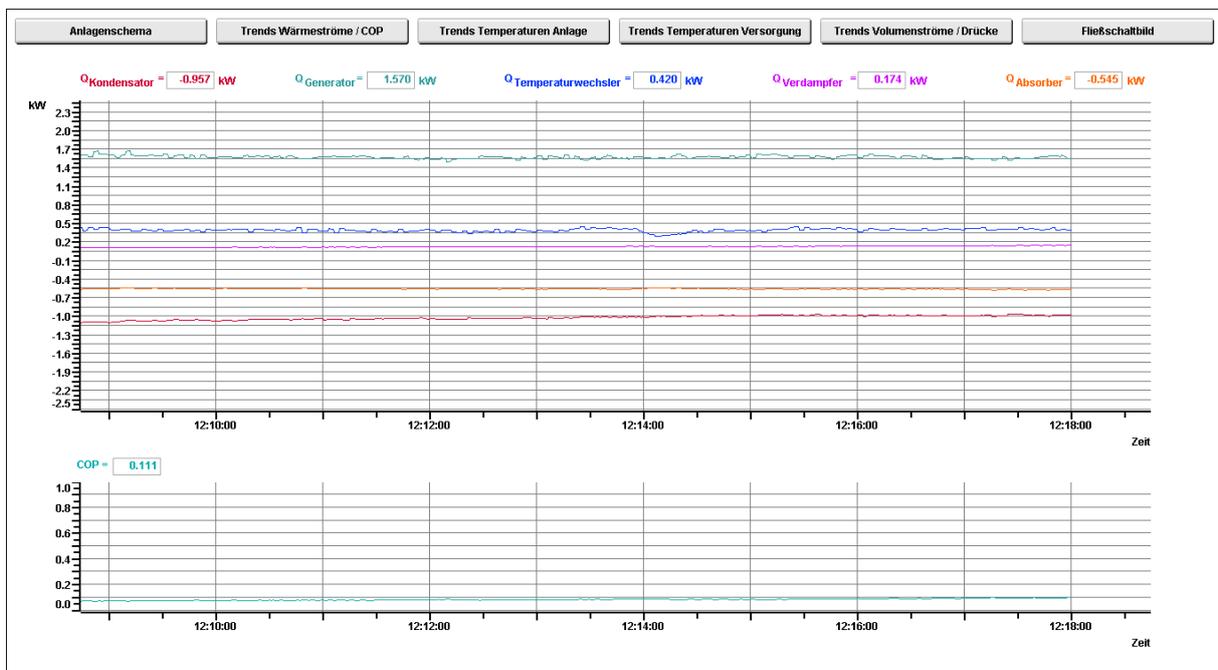


Abbildung 7.6: Trenddaten der Wärmeströme und COP

Trends Temperaturen Anlage

Die Temperaturen der Kreisläufe in der Anlage werden hier im 10 - Minuten Verlauf dargestellt.

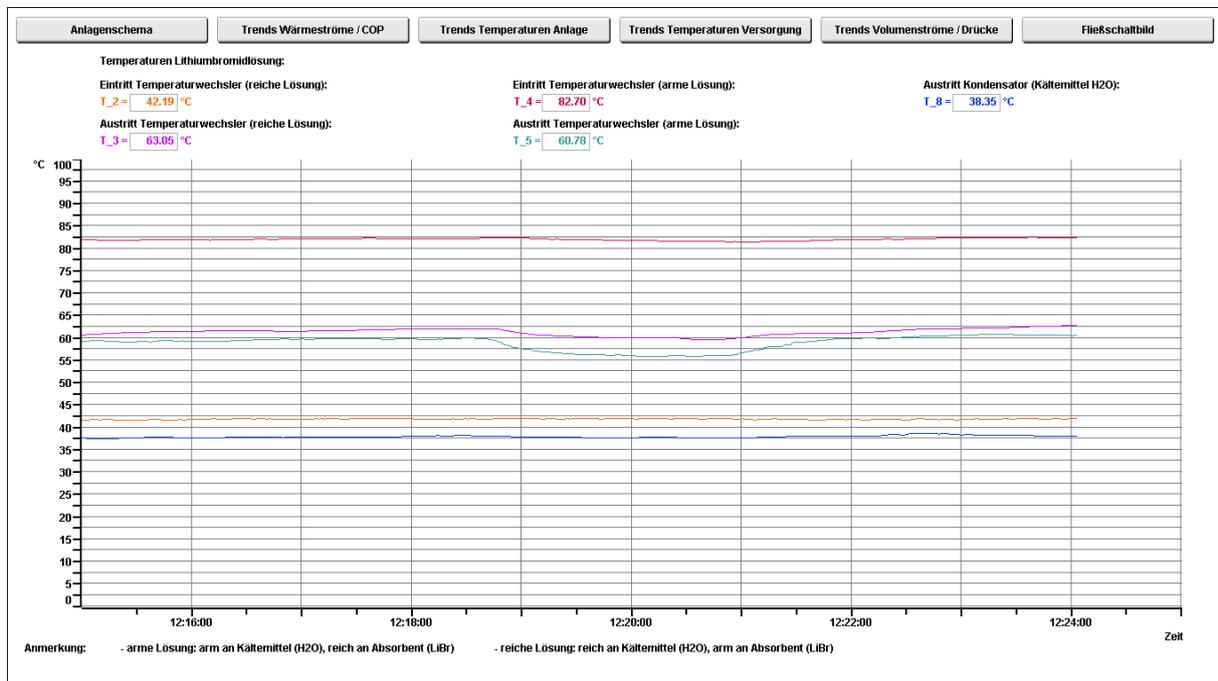


Abbildung 7.7: Trends Temperaturen in der Anlage

Trends der Temperaturen der Versorgungsseite

Auf dieser Seite werden die Temperaturverläufe der Versorgung (Heißwasser, Kühlwasser) angezeigt. Da die Wärmetauscher unterschiedliche Temperaturbereiche abdecken, werden die Verläufe in mehreren Diagrammen angezeigt.

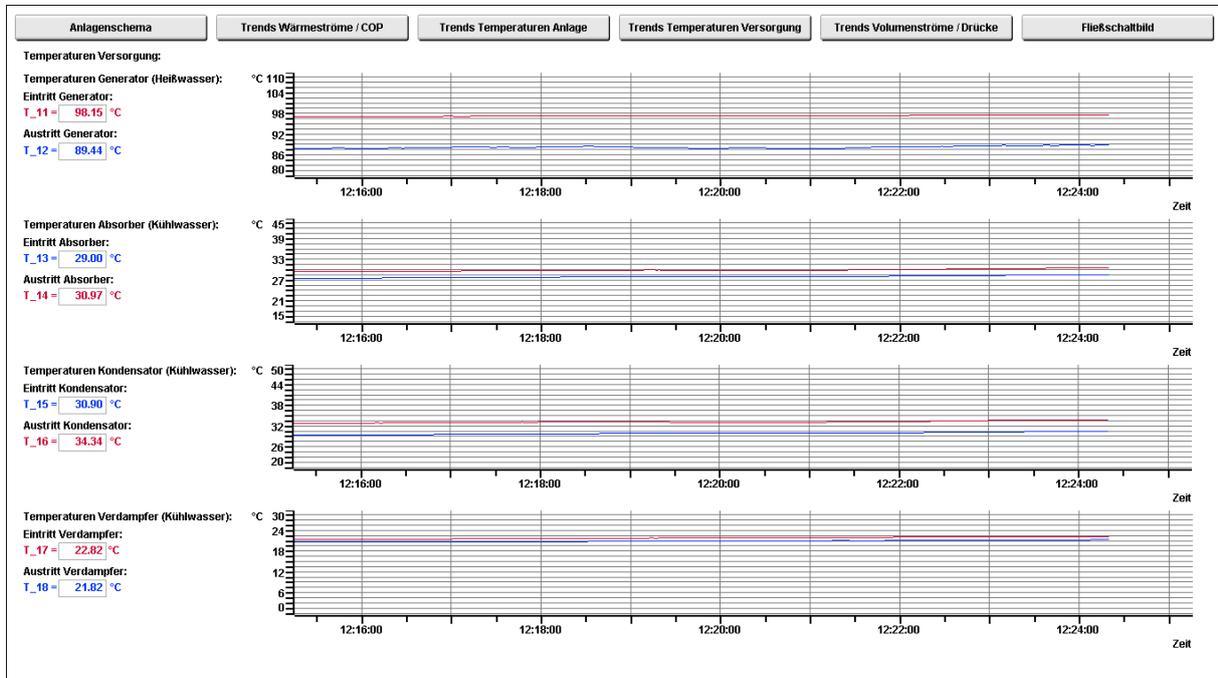


Abbildung 7.8: Trends Temperaturen Versorgung

Trends Volumenströme/Drücke

Es werden die Verläufe der Volumenströme der Lithiumbromidlösung und der Versorgung sowie die Betriebsdrücke in Generator-/Kondensatorbehälter beziehungsweise in Absorber-/Verdampferbehälter dargestellt.

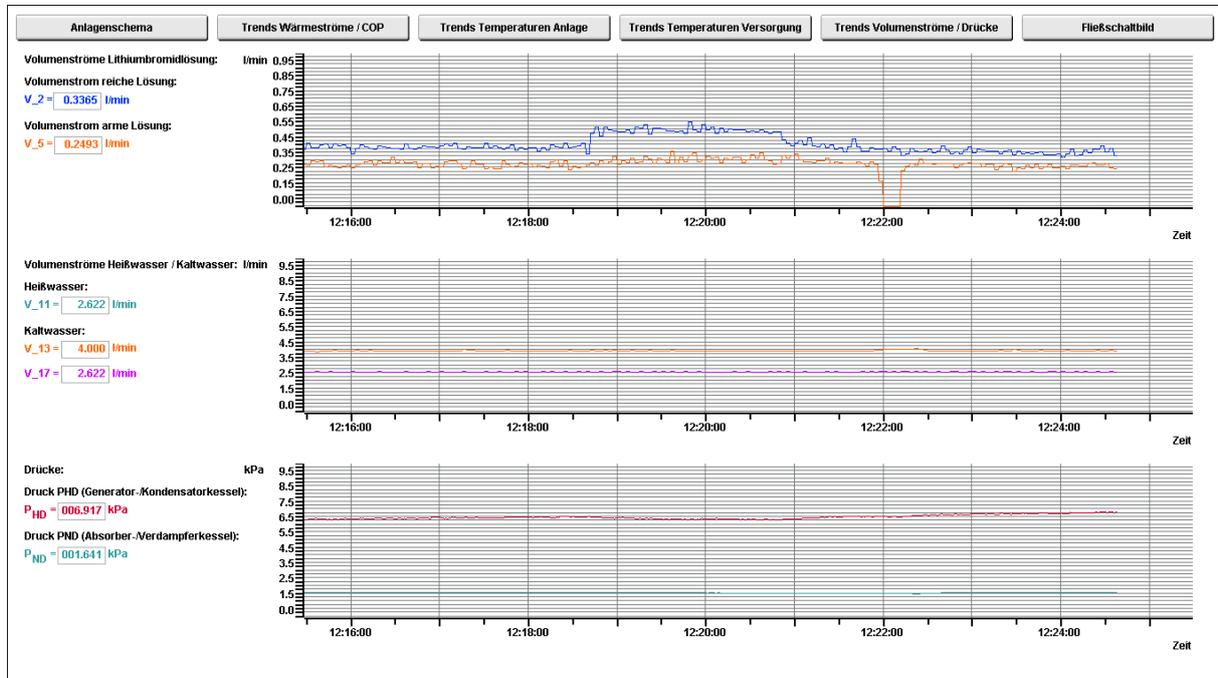


Abbildung 7.9: Trends Volumenströme/Drücke

Fließschaltbild

Um eine einfache Bedienbarkeit und Verständlichkeit der Anlage während einer Laborübung sicherzustellen, wird auf dieser Seite das gesamte Fließschaltbild angezeigt. Die Ventile, Pumpen, Messsensoren und Wärmetauscher wurden zum einfacheren Auffinden auch auf der Anlage direkt beschriftet. Eine Beschreibung der Funktion der Ventile erleichtert zusätzlich das Betätigen des korrekten Ventils. Des Weiteren bietet diese Seite die Möglichkeit, die Stellung der Ventile einzugeben und aufzuzeichnen, um bei einem erneuten Betrieb der Anlage das Einstellen eines stationären Zustandes zu vereinfachen. Die Ventile der Lösungskreisläufe können neun, die der Versorgung drei Umdrehungen geöffnet werden. Der Standardwert wurde mit 0 festgesetzt und steht für ein geschlossenes Ventil.

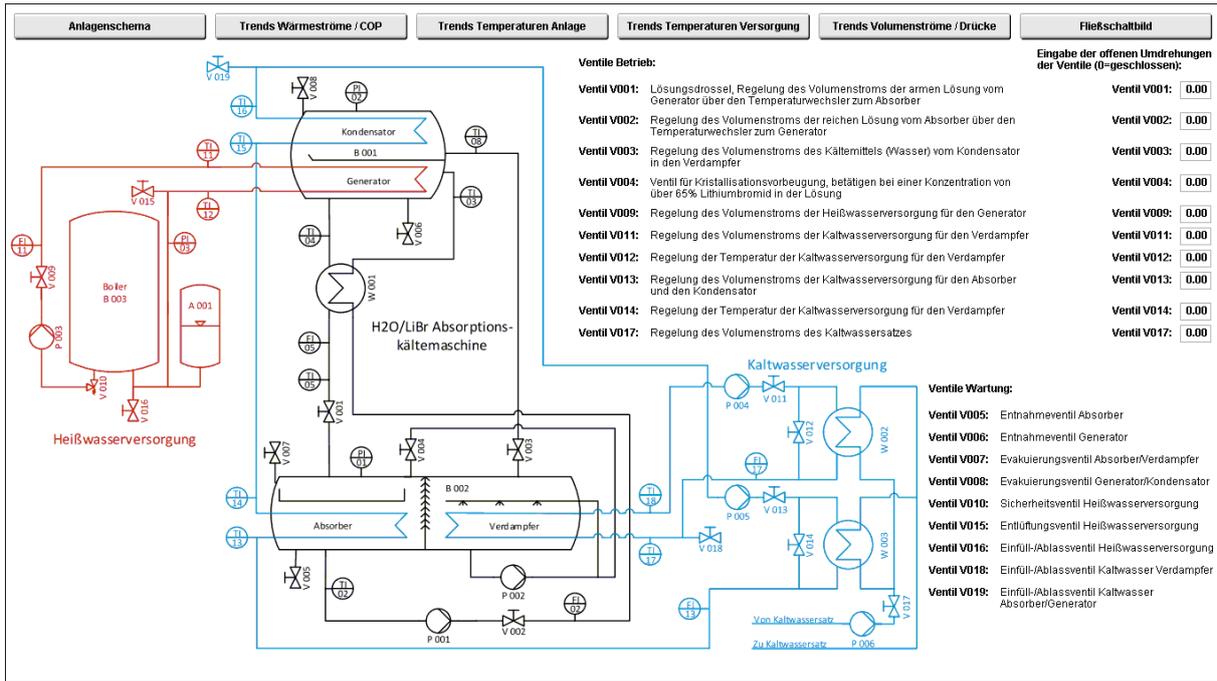


Abbildung 7.10: Fließschaltbild

7.2.3 Erhebung der Messdaten

Die Aufzeichnung von Messdaten wird unter 7.2.1 beschrieben. Die Messwerte werden in einer Datei des Typs CSV angelegt. Auf diese Dateien kann über FTP zugegriffen werden. Hierzu im Explorer in der Taskleiste ftp://10.0.0.60 eingeben um auf die SPS zuzugreifen. Sollen die Messdaten verarbeitet werden, so ist zu beachten, dass die Datensätze in der CSV-Datei durch Komma getrennt werden. Kommastellen in Werten werden durch Punkte dargestellt. Folgende Werte werden aufgezeichnet:

Tabelle 7.2: aufgezeichnete Messdaten

<i>Bezeichnung</i>	<i>Einheit</i>
<i>Timestamp</i>	<i>s</i>
<i>T_2</i>	<i>°C</i>
<i>T_3</i>	<i>°C</i>
<i>T_4</i>	<i>°C</i>
<i>T_5</i>	<i>°C</i>
<i>T_8</i>	<i>°C</i>
<i>T_11</i>	<i>°C</i>
<i>T_12</i>	<i>°C</i>
<i>T_13</i>	<i>°C</i>
<i>T_14</i>	<i>°C</i>
<i>T_15</i>	<i>°C</i>
<i>T_16</i>	<i>°C</i>

<i>T_17</i>	°C
<i>T_18</i>	°C
<i>P_{HD}</i>	kPa
<i>P_{ND}</i>	kPa
<i>V_2</i>	l/min
<i>V_5</i>	l/min
<i>V_11</i>	l/min
<i>V_13</i>	l/min
<i>V_17</i>	l/min
<i>Q_Kondensator</i>	kW
<i>Q_Generator</i>	kW
<i>Q_Temperaturwechsler</i>	kW
<i>Q_Verdampfer</i>	kW
<i>Q_Absorber</i>	kW
<i>COP</i>	%/100
<i>Dichte_Wasser_11</i>	g/l
<i>Dichte_Wasser_13</i>	g/l
<i>Dichte_Wasser_15</i>	g/l
<i>Dichte_Wasser_17</i>	g/l
<i>Dichte_4</i>	g/l
<i>Dichte_2</i>	g/l
<i>Konzentration_4</i>	%
<i>Konzentration_2</i>	%
<i>Abschalttemperatur_Heizung</i>	°C
<i>Einschalttemperatur_Heizung</i>	°C
<i>Status_Heizung</i>	Ein=1
<i>Status_V001</i>	0=geschlossen
<i>Status_V002</i>	0=geschlossen
<i>Status_V003</i>	0=geschlossen
<i>Status_V004</i>	0=geschlossen
<i>Status_V009</i>	0=geschlossen
<i>Status_V011</i>	0=geschlossen
<i>Status_V012</i>	0=geschlossen
<i>Status_V013</i>	0=geschlossen
<i>Status_V014</i>	0=geschlossen
<i>Status_V017</i>	0=geschlossen

Das Programm zur Speicherung der Messdaten sowie zum Anlegen einer CSV-Datei (siehe „DataFile“ beziehungsweise „Main“, Anhang 12.4.7 beziehungsweise 12.4.8), wurde zum großen Teil von einer vorhandenen B&R Software übernommen, welche von Projektassistent Dipl.-Ing. Felix Birkelbach [32] erarbeitet wurde.

7.2.4 Berechnungsgrundlagen für die Software

Für die Berechnungen der Software stehen Temperaturen, Volumenströme und Dichtemessungen zur Verfügung. Die Berechnung der Wärmeströme \dot{Q}_W in Generator, Kondensator, Absorber und Verdampfer (Wasser) wurden mit folgender Gleichung getätigt:

$$\dot{Q}_W = \dot{m}_W \cdot c_W \cdot \Delta T_W \quad (7.1)$$

Da als Messdaten nur die Volumenströme \dot{V}_W , aber nicht die Massenströme \dot{m}_W vorliegen, werden die Massenströme durch Dichten und Volumenströme berechnet:

$$\dot{Q}_W = \dot{V}_W \cdot \rho_W \cdot c_W \cdot \Delta T_W \quad (7.2)$$

Die spezifische Wärmekapazität c_W beträgt bei flüssigem Wasser 4,182 kJ/kg·K⁻¹ bei 20 °C und wurde als konstant angenommen.

Die Dichte von Wasser hängt von der Temperatur und dem Druck ab. Die Abhängigkeit der Dichte vom Druck ist vergleichsweise gering, normale Druckschwankungen haben auf die Dichte des Wassers praktisch keinen Einfluss, daher wurde bei der Berechnung nur die Temperaturabhängigkeit berücksichtigt. Die Berechnung der Dichte ρ_W erfolgt mittels der Gleichung von George S. Kell für luftfreies Wasser bei Atmosphärendruck, vgl. [33], S. 99. Die Abweichungen zu luftgesättigtem Wasser sind sehr gering und bei Temperaturen über 20 °C vernachlässigbar, vgl. [34], S. 336.

$$\rho_W = \frac{a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 + a_5 \cdot T^5}{1 + b \cdot T} \quad (7.3)$$

mit:

Tabelle 7.3: Zeichen und Koeffizienten der Gl. (7.3)

ρ_W	Dichte, Wasser, luftfrei [g/l]
T	Temperatur [°C]
a_0	999,83952
a_1	16,945176 (°C) ⁻¹
a_2	-7,9870401·10 ⁻³ ·(°C) ⁻²
a_3	-4,6170461·10 ⁻⁵ (°C) ⁻³
a_4	1,0556302·10 ⁻⁷ (°C) ⁻⁴
a_5	-2,8054253·10 ⁻¹⁰ (°C) ⁻⁵
b	0,01687985

Um während des Betriebs Rückschlüsse auf die Lithiumbromidkonzentration sowie den übertragenen Wärmestrom im Temperaturwechsler ziehen zu können muss, zunächst die Dichte mittels Entnahmebecher gemessen werden. Die errechneten Werte für Konzentration der Lithiumbromidlösung und Wärmestrom im Temperaturwechsler sind folglich nur direkt nach Auswertung der Dichte der Lithiumbromidlösung bei stationärem Betrieb gültig. Die Berechnung der Konzentration in Abhängigkeit von der Dichte und Temperatur erfolgt aufgrund der Funktionen und Gleichungen aus [35]. Auf diesen Artikel bezieht sich auch die Software EES (Engineering Equation Solver) von F-Chart Software LLC [2] in der Bibliothek „LiBrH2O“, welche als Berechnungsgrundlage dieser Absorptionskältemaschine dient. Die Dichte der Lithiumbromidlösung ρ_L , in Abhängigkeit von der Temperatur T [K] und des Stoffmengenanteils χ , ergibt sich aus:

$$\rho_L = \left[(1-\chi) \cdot \rho' + \rho_c \cdot \sum_{i=1}^2 a_i \cdot \chi \cdot \left(\frac{T}{T_c} \right)^{t_i} \right] \cdot [\chi \cdot M_{LiBr} + (1-\chi) \cdot M_W] \quad (7.4)$$

mit:

Tabelle 7.4: Koeffizienten und Exponenten der Gl.(7.4)

i	t_i	a_i
1	0	1,746
2	6	4,709

und mit ρ' (molare Dichte von gesättigtem, flüssigem Wasser):

$$\rho' = \rho_c \cdot \left[1 + \sum_{i=1}^6 a_i \cdot \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^{\beta_i} \right] \quad (7.5)$$

mit:

Tabelle 7.5: Exponenten und Koeffizienten der Gl.(7.5)

i	β_i	a_i
1	1/3	1,99274064
2	2/3	1,09965342
3	5/3	-0,510839303
4	16/3	-1,75493479
5	43/3	-45,5170352
6	110/3	-6,7469445 · 10 ⁵

Setzt man ρ' in ρ_L ein und formt auf χ um, so erhält man:

$$\chi = \frac{\sqrt{\left[-a_1 \cdot \rho_c \cdot M_W - a_2 \cdot \rho_c \cdot \left(\frac{T}{T_c} \right)^6 \cdot M_W - \rho' \cdot M_{LiBr} + 2 \cdot \rho' \cdot M_W \right]^2 - 4 \cdot \left(\frac{\rho_L}{1000} - \rho' \cdot M_W \right) \cdot \left[-a_1 \cdot \rho_c \cdot M_{LiBr} + a_1 \cdot \rho_c \cdot M_W - a_2 \cdot \rho_c \cdot \left(\frac{T}{T_c} \right)^6 \cdot M_{LiBr} + a_2 \cdot \rho_c \cdot \left(\frac{T}{T_c} \right)^6 \cdot M_W + \rho' \cdot M_{LiBr} - \rho' \cdot M_W \right] - a_1 \cdot \rho_c \cdot M_W - a_2 \cdot \rho_c \cdot \left(\frac{T}{T_c} \right)^6 \cdot M_W - \rho' \cdot M_{LiBr} + 2 \cdot \rho' \cdot M_W}}{2 \cdot (M_{LiBr} - M_W) \cdot \left[a_1 \cdot \rho_c + a_2 \cdot \rho_c \cdot \left(\frac{T}{T_c} \right)^6 - \rho' \right]} \quad (7.6)$$

Der Stoffmengenanteil χ wird nun auf den Massenanteil w , die Konzentration, umgerechnet.

$$w = \frac{\chi \cdot M_{LiBr}}{\chi \cdot M_{LiBr} + (1 - \chi) \cdot M_W} \quad (7.7)$$

Die Berechnung der spezifischen Enthalpie h_L der Lithiumbromidlösung, die für die Berechnung des Wärmestroms im Temperaturwechsler notwendig ist, erfolgt mittels folgender Gleichung aus [7], S. 20.70, Fig. 34:

$$h_L = \sum_{i=1}^4 A_i \cdot \chi^i + T \cdot \sum_{i=1}^4 B_i \cdot \chi^i + T^2 \cdot \sum_{i=1}^4 C_i \cdot \chi^i \quad (7.8)$$

mit den Koeffizienten:

Tabelle 7.6: Koeffizienten der Gl. (7.8)

i	A_i	B_i	C_i
0	-2024,33	18,2829	$-3,7008214 \cdot 10^{-2}$
1	163,309	-1,1691757	$2,8877666 \cdot 10^{-3}$
2	-4.88161	$3,248041 \cdot 10^{-2}$	$-8,1313015 \cdot 10^{-5}$
3	$6,302948 \cdot 10^{-2}$	$-4,034184 \cdot 10^{-4}$	$9,9116628 \cdot 10^{-7}$
4	$-2,913705 \cdot 10^{-4}$	$1,8520569 \cdot 10^{-6}$	$-4,444120710^{-9}$

Mit den temperaturabhängigen Enthalpien vor und nach dem Temperaturwechsler, der Dichte und dem Volumenstrom wird der übertragene Wärmestrom im Temperaturwechsler \dot{Q}_{TW} berechnet.

$$\dot{Q}_{TW} = \dot{V}_L \cdot \rho_L \cdot \Delta h_L \quad (7.9)$$

8 Auslegungsprogramm EES - Erweiterung

Um gemessene Daten während des Betriebs der Anlage mit den Werten des Auslegungsprogrammes vergleichen zu können, wurde das ursprüngliche Programm, vgl. [1], S. 46ff., erweitert. Es ist somit möglich, die für die Berechnung vorgegebenen Werte anzupassen und direkt die Auswirkungen auf die Anlage zu berechnen. Die Ausgabewerte erscheinen direkt in der grafischen Oberfläche. Das Programm wurde in EES [2] erstellt und anschließend als „Distributable Program“ gespeichert. Das Programm kann somit während der Laborübung ausgeführt und bedient werden. Abbildung 8.1 zeigt die Oberfläche des erweiterten Auslegungsprogrammes.

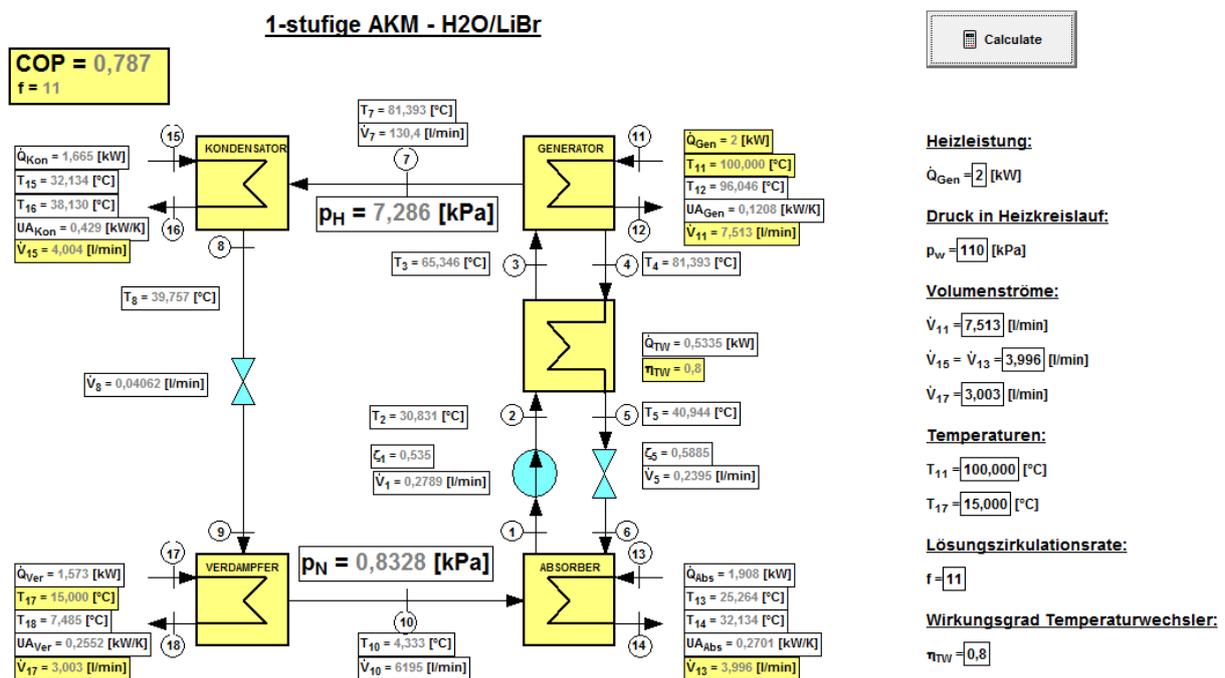


Abbildung 8.1: Erweiterung des Auslegungsprogrammes um Eingabemöglichkeit

9 Betrieb der Anlage

Es wird auf die notwendigen Verfahren und Prüfungen vor der Inbetriebnahme eingegangen. Des Weiteren erfolgt eine Beschreibung der ersten drei Versuche.

9.1 Prüfung vor Inbetriebnahme

Bevor die Anlage in Betrieb genommen wird, sollten alle Kreisläufe befüllt, entlüftet und auf ihre Funktion getestet werden. Weiters sollte das Innere der Anlage, insbesondere die Kupferwärmetauscher, durch Begutachtung durch die Schaugläser auf Korrosion untersucht werden. Tabelle 9.1 zeigt die Sollwerte der Kreisläufe sowie die erreichbaren Maximalwerte bei vollständiger Entlüftung.

Tabelle 9.1: Prüfung der Kreisläufe vor Inbetriebnahme

<i>Funktion</i>	<i>Sensor</i>	<i>Sollwert</i>	<i>erreichter Wert</i>	<i>Funktion gegeben</i>	<i>Anmerkung</i>
<i>Temperatur Generator Eintritt</i>	<i>TI 11</i>	<i>100 °C</i>	<i>100,19 °C</i>	<i>ja</i>	<i>nicht höher getestet</i>
<i>Volumenstrom Generator - Heißwasser</i>	<i>FI 11</i>	<i>7,513 l/min</i>	<i>8,489 l/min</i>	<i>ja</i>	
<i>Volumenstrom reiche Lösung Zustandspunkt 2</i>	<i>FI 02</i>	<i>0,2789 l/min</i>	<i>0,392 l/min</i>	<i>ja</i>	
<i>Volumenstrom arme Lösung Zustandspunkt 5</i>	<i>FI 05</i>	<i>0,2395 l/min</i>	<i>0,888 l/min</i>	<i>ja</i>	
<i>Volumenstrom Absorber/Kondensator - Kühlwasser</i>	<i>FI 13</i>	<i>4 l/min</i>	<i>7,022 l/min</i>	<i>ja</i>	
<i>Volumenstrom Verdampfer - Kühlwasser</i>	<i>FI 17</i>	<i>3 l/min</i>	<i>8,356 l/min</i>	<i>ja</i>	
<i>Verdampferpumpe</i>	-	-	-	<i>ja</i>	<i>kein Volumenstromsensor in diesem Kreislauf</i>
<i>Kristallisationsvorbeugung</i>	-	-	-	<i>ja</i>	<i>Ventil V 004 betätigen</i>
<i>Kaltwasserversorgung</i>	-	-	-	<i>ja</i>	<i>kein Volumenstromsensor in diesem Kreislauf</i>

9.2 Füllen und Entlüften der wasserführenden Kreisläufe

Die Kreisläufe der Heißwasser- und Kühlwasserversorgung werden mit Wasser gefüllt und anschließend entlüftet, um Luftblasen in den Wärmetauschern zu vermeiden.

9.2.1 Heißwasserversorgung

Der Druck im Membranausgleichsbehälter A 001 wird auf 0,7 bar Vordruck eingestellt. Anschließend erfolgt das Füllen des Warmwasserspeichers über das Ventil V 016 auf etwa 1,2 bar. Der Heißwasserkreislauf besitzt ein automatisches Entlüftungsventil V 015, es sollte allerdings trotzdem die Heißwasserpumpe zusätzlich entlüftet werden. Hierzu die Entlüftungsschraube der Pumpe in ausgeschaltetem Zustand leicht öffnen, die Pumpe auf maximaler Stufe einschalten und warten bis statt Luft Wasser austritt und anschließend die Entlüftungsschraube schließen. Eventuell ist es notwendig, diesen Vorgang mehrmals zu wiederholen bis der maximale Volumenstrom, vgl. Tabelle 9.1, erreicht wird. Die Aufheizdauer auf eine Temperatur von 100 °C beträgt bei einem Heißwasservolumenstrom von 5 l/min etwa 2 Stunden.

9.2.2 Kühlwasserversorgung

Die Kreisläufe der Kühlwasserversorgung, Verdampfer- beziehungsweise Absorber-/Kondensatorkreislauf, stehen nicht unter Druck. Etwaige Druckerhöhungen durch die Temperaturunterschiede werden durch die verwendeten Schläuche leicht ausgeglichen. Das Füllen der Kreisläufe erfolgt über das Ventil V 018 für den Verdampferkreislauf beziehungsweise über das Ventil V 019 für den Absorber-/Kondensatorkreislauf. Während des Füllens ist die entsprechende Pumpe, P 004 beziehungsweise P 005, einzuschalten und wie vorhin bei der Heißwasserversorgung beschrieben zu entlüften. Die Kreisläufe sind vollständig entlüftet, wenn die Maximalwerte aus Tabelle 9.1 erreicht werden.

9.3 Befüllen der Anlage mit Lithiumbromidlösung

Das Befüllen der Anlage mit Lithiumbromidlösung (55 %) erfolgt über die M12-Bohrung im Generator-/Kondensatorbehälter. Die Füllmenge der Gesamtanlage beträgt laut [1], S. 44 20 kg Lithiumbromidlösung. Derzeit befinden sich nur 16 kg Lithiumbromidlösung in der Anlage, da ansonsten der Pegelstand in der Absorberkammer zu hoch wäre und die Lösung in den Verdampfer gelangen würde. Bei der Hantierung mit Lithiumbromidlösung ist geeignete Schutzausrüstung

(Handschuhe, Kleidung, Augen- und Gesichtsschutz) zu tragen. Die Lösung stammt vom Hersteller Leverton-Clarke Ltd. und wurde über die Firma BS NOVA Apparatebau GmbH bezogen. Die Lösung ist mit dem Korrosionsschutzadditiv Lithiummolybdat inhibiert.

9.4 Evakuierung

Die Anlage kann mit einer herkömmlichen Vakuumpumpe evakuiert werden. Um nichtkondensierbare Gase aus der Anlage zu evakuieren, kann die Anlage durch Einschalten der Generatorheizung mit Wasserdampf gespült werden. Da bei einer Evakuierung auf 1 mbar der Dampfdruck von Wasser unterschritten wird, gelangt Wasserdampf in den Verdichterteil der Pumpe. Um Wasser im Öl der Pumpe zu vermeiden, sollte daher das Gasballastventil der Pumpe während der Entnahme geöffnet werden. Dadurch gelangt nicht gesättigte Umgebungsluft in den Verdichter, die den Wasserdampf aufnimmt und eine Kondensation verhindert. Die Entnahme des Wasserdampfes während der Evakuierung wirkt sich auf die Lösungskonzentration aus. Allerdings fällt die Konzentrationsänderung sehr gering aus, so erhöht sich nach [1], S. 44 die Lithiumbromidkonzentration bei einer Evakuierung auf 1 mbar um lediglich 0,0047 % und ist daher bei dieser Anwendung vernachlässigbar.

Die Vakuumpumpe wird über einen Adapter an das Schrader - Ventil des Kondensator-/Generatorbehälters oder an das des Absorber-/Verdampferbehälters angeschlossen. Die Evakuierung wurde mit einer Drehschieber-Vakuumpumpe des Typs 322002 des Herstellers Ilmvac GmbH durchgeführt. Wird der Enddruck von 1 mbar nicht gehalten, so ist eine Dichtheitsprüfung durchzuführen.

9.5 Konzentrationsmessung

Die Berechnung der Konzentration erfolgt nach Entnahme der Lithiumbromidlösung über Ventil V 006 aus dem Generator-/Kondensatorbehälter (kritischste Konzentration) oder über Ventil V 005 aus dem Absorber-/Verdampferbehälter und nach Messung der Dichte der entnommenen Lithiumbromidlösung durch Eingabe in die Visualisierung. Es gilt zu beachten, dass der Wert der Konzentration folglich nur bei stationärem Betrieb und unmittelbar nach der Entnahme gültig ist. Die Entnahme der Lithiumbromidlösung, Messung der Dichte und Berechnung der Konzentration erfolgt in dieser Weise:

1. Anziehen der Flügelmuttern auf Entnahmebehälter
2. Abwiegen des Entnahmebehälters

3. Anschrauben des Entnahmebehälters an Ventil V 006 oder V 005
4. Anschließen der Vakuumpumpe an das Schrader - Ventil des Entnahmebehälters und Evakuierung auf ein Druckniveau, welches sich unter jenem der Absorptionskältemaschine befindet
5. Öffnen des Ventils V 006 oder V 005 und Füllen des Entnahmebehälters bis zur 0,25 l - Kennzeichnung, Schließen des Ventils V 006 oder V 005
6. Abschrauben des Entnahmebehälters
7. Wiegen des Entnahmebehälters samt Lithiumbromidlösung
8. Abziehen des Gewichts des Entnahmebehälters und Umrechnen der Dichte auf g/l
9. Eingabe der Dichte in Visualisierung, um Konzentration zu berechnen
10. Anschrauben des Entnahmebehälters an Ventil V 006 oder V 005
11. Öffnen des Ventils V 006 oder V 005, um eine Rückführung der Lösung in den Behälter zu erreichen
12. Schließen des Ventils V 006 oder V 005, bevor der Lösungsstand unter dem Niveau des Entnahmebehälterrohrs ist, um ein Eindringen von Luft in die Anlage zu vermeiden

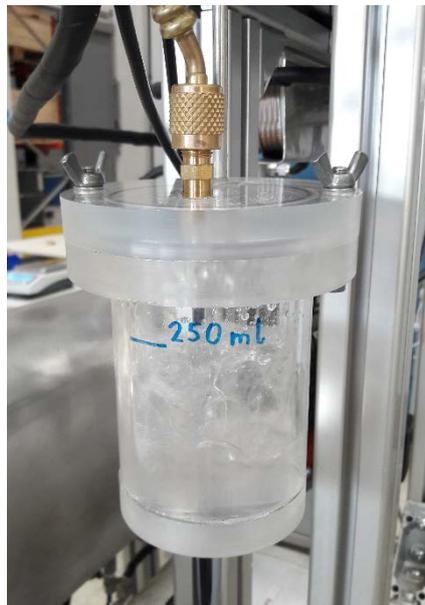


Abbildung 9.1: Entnahmebehälter während Entnahmevorgang

9.6 Stillstand

Da die Anlage voraussichtlich nur ein bis zweimal im Jahr im Ablauf einer Laborübung in Betrieb genommen werden soll, ist es notwendig, die Anlage bei Stillstand mit Stickstoff oder einem anderen

Inertgas zu füllen, um Sauerstoff und dadurch ausgelöste Korrosion in der Anlage zu vermeiden. Es ist zu beachten, dass jeder Behälter einzeln gefüllt werden sollte. Bevor die Anlage unter Druck gesetzt wird, sollten die Ventile V 001 und V 002 geschlossen werden, um eine Beschädigung der Durchflusssensoren durch den hohen Volumenstrom des einströmenden Stickstoffes zu verhindern. Die Anlage ist mit Stickstoff auf ein Druckniveau über dem Umgebungsdruck zu befüllen. Die wasserführenden Kreisläufe sollten nach Möglichkeit vollständig entlüftet sein, um Korrosion in den Rohrleitungen zu vermeiden.

9.7 Versuche

Die Anlage wurde mit 15 kg Lithiumbromidlösung befüllt. Ursprünglich waren 20 kg vorgesehen, vgl. [1], S. 44, allerdings würde dies zu einem zu hohen Flüssigkeitsstand im Absorber führen und es bestünde die Möglichkeit, dass Lösung durch den Tropfenabscheider in den Verdampferteil gelangt.

9.7.1 Versuch 1

Die Absorptionskältemaschine wurde auf einen Druck von 4,44 mbar evakuiert. Eine Evakuierung auf einen niedrigeren Druck war nicht möglich, da Wasser aus der Lösung ausdampft und von der Vakuumpumpe angesaugt wird. Alle Kreisläufe wurden aktiviert und auf die Auslegungswerte eingestellt. Die Kaltwasserversorgung erfolgte aus einem mit Wasser befüllten Behälter, wobei die Wassertemperatur während des Versuchs anstieg. Trotz einer Leistung des Warmwasserspeichers von 2,5 kW, gelang es nicht mehr als 1,5 kW an den Generator abzuführen. Es wurde beobachtet, dass das in der aus Kupferblech gefertigten Kondensatwanne aufgefangene Wasser teilweise wieder verdampft. Die Turbinenräder der Durchflusssensoren der Lösungskreisläufe fielen hin und wieder aus, können aber mit leichten Hammerschlägen wieder in Gang gesetzt werden. Die Anlage war bei diesem Versuch noch nicht isoliert. Es gelang, kurzfristig eine Kälteleistung von 190 W bei einer Generatorleistung von 1,4 kW zu erreichen, ein stationärer Zustand stellte sich nicht ein.

9.7.2 Versuch 2

Vor dem zweiten Versuch wurde der Generator-/Kondensatorbehälter mit einer 20 mm starken Isolierung versehen, um den Wärmeverlust an die Umgebung zu verringern. Auch die Heißwasserversorgungsleitungen wurden isoliert. Die Anlage wurde auf 4,45 mbar evakuiert. Es konnte eine stationäre Kälteleistung von 150 W bei einer Heizleistung von 1,38 kW erzeugt werden.

Dies ergibt einen COP von 0,11, welcher allerdings deutlich unter dem berechneten COP von etwa 0,7 liegt. Während dieses Versuchs wurde im stationären Zustand eine Konzentrationsmessung durchgeführt, die eine Dichte von 1686,2 g/l und somit eine Konzentration von 60,04 % Lithiumbromid in der Lösung ergab. Wurde die Verdampferberieselung durch ein Schauglas betrachtet, so war ersichtlich, dass die Benetzung des Verdampferwärmetauschers nur auf einigen wenigen Stellen funktionierte. Es ist daher notwendig, bei den nächsten Versuchen den Absorber-/Verdampferbehälter so auszurichten, dass eine optimale Benetzung des Verdampferwärmetauschers gelingt. Auch der Generator-/Kondensatorbehälter sollte so ausgerichtet werden, dass das in der Kondensatwanne gesammelte Wasser in Richtung des Entnahmerohrs fließt. Die Kaltwasserversorgung erfolgte durch einen mit Wasser gefüllten Behälter, dessen Temperatur sich während des Versuchs erhöhte. Durch diese Temperaturerhöhung stieg der Druck im Absorber-/Kondensatorbehälter an. Abbildung 9.2 zeigt das Anlagenschema der Anlagensvisualisierung während des stationären Zustandes in Versuch 2.

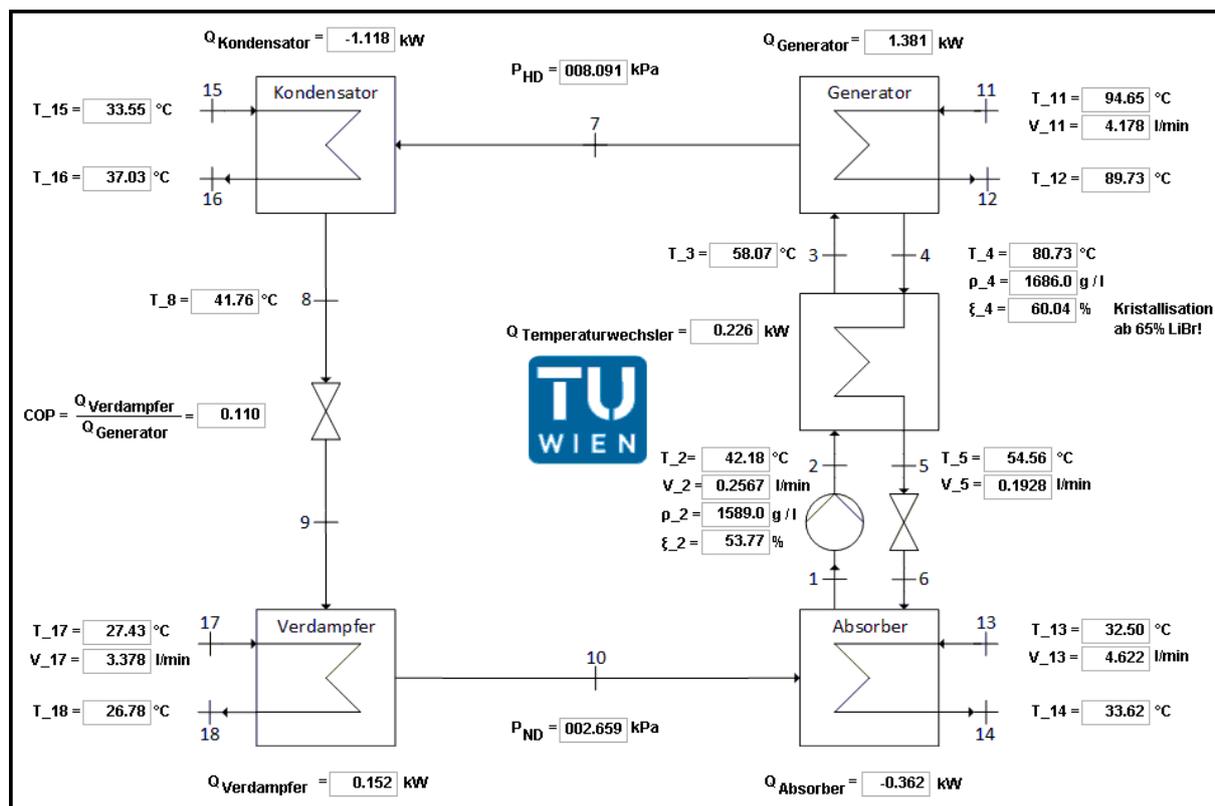


Abbildung 9.2: Stationärer Zustand bei 150 W Kälteleistung und einem COP von 0,11 in Versuch 2

Diese Werte können nun mit der Auslegung verglichen werden. Es ist allerdings zu beachten, dass das Auslegungsprogramm im Zustandspunkt 17 nur eine maximale Temperatur von 20 °C zulässt. Die Temperaturen des Verdampferwärmetauschers und somit auch der Druck im Absorber-

/Verdampferbehälter können daher nicht sinnvoll verglichen werden. Die im Temperaturwechsler übertragene Wärmeleistung deutet darauf hin, dass der Wirkungsgrad des Wärmetauschers nur im Bereich von etwa $\eta_{TW}=0,6$ liegt. Tabelle 9.2 zeigt die im zweiten Versuch gemessenen Werte im Vergleich zu den Auslegungswerten.

Tabelle 9.2: Vergleich zwischen Betriebs- und Auslegungsdaten Versuch 2

Bezeichnung	Betriebsdaten	Auslegungsdaten
<i>COP</i>	0,11	0,769
<i>Q_{Kondensator}</i>	1,118 kW	1,115 kW
<i>Q_{Generator}</i>	1,381 kW	1,381 kW
<i>Q_{Verdampfer}</i>	0,152 kW	1,062 kW
<i>Q_{Absorber}</i>	0,362 kW	1,328 kW
<i>Q_{Temperaturwechsler}</i>	0,226 kW	0,2481 kW
<i>P_{HD}</i>	8,091 kPa	9,224 kPa
<i>P_{ND}</i>	2,659 kPa	1,537 kPa
<i>V₂</i>	0,2567 l/min	0,1949 l/min
<i>V₅</i>	0,1928 l/min	0,1686 l/min
<i>V₁₁</i>	4,178 l/min	4,178 l/min
<i>V₁₃=V₁₅</i>	4,622 l/min	4,622 l/min
<i>V₁₇</i>	3,378 l/min	3,378 l/min
<i>T₂</i>	42,18 °C	36,292 °C
<i>T₃</i>	58,07 °C	59,149 °C
<i>T₄</i>	80,73 °C	79,880 °C
<i>T₅</i>	54,56 °C	53,292 °C
<i>T₈</i>	41,76 °C	44,246 °C
<i>T₁₁</i>	94,65 °C	94,650 °C
<i>T₁₂</i>	89,73 °C	89,750 °C
<i>T₁₃</i>	32,50 °C	36,083 °C
<i>T₁₄</i>	33,62 °C	40,229 °C
<i>T₁₅</i>	33,55 °C	40,229 °C
<i>T₁₆</i>	37,03 °C	43,713 °C
<i>T₁₇</i>	27,43 °C	20,000 °C
<i>T₁₈</i>	26,78 °C	15,484 °C

9.7.3 Versuch 3

Für die dritte Inbetriebnahme wurde der Generator-/Kondensatorbehälter sowie der Absorber-/Verdampferbehälter ausgerichtet. Es war zunächst geplant, ein externes Thermostat zur Kaltwasserversorgung einzusetzen, jedoch war die Leistung des vorhandenen Thermostats des Typs

Julabo F33-MA, vgl. [36], mit 0,5 kW nicht ausreichend. Die Kaltwasserversorgung erfolgte daher wieder über einen Wasserbehälter. Abbildung 9.3 zeigt die isolierte Absorptionskältemaschine.



Abbildung 9.3: Isolierte Absorptionskältemaschine mit Thermostat für Kaltwasserversorgung

Die Absorptionskältemaschine wurde vor Versuch 3 zusätzlich mit 1 kg Lithiumbromidlösung befüllt, die Gesamtfüllmenge liegt damit bei 16 kg Lithiumbromidlösung. Die Evakuierung gelang zunächst nicht unter ein Druckniveau von etwa 110 mbar, da die Vakuumpumpe Wasser aus dem Verdampferteil, welches bei diesem Druckniveau verdampfte, ansaugte. Das Wasser wurde deshalb über die Kristallisationsvorbeugung, V 004, in den Absorber gepumpt. Anschließend konnte die Evakuierung auf 4,7 mbar durchgeführt werden. Bei diesem Versuch wurde eine stationäre Kälteleistung von 190 W bei einem COP von 0,12 erreicht. Abbildung 9.4 zeigt das Anlagenschema der Anlagensvisualisierung während des stationären Zustandes in Versuch 3.

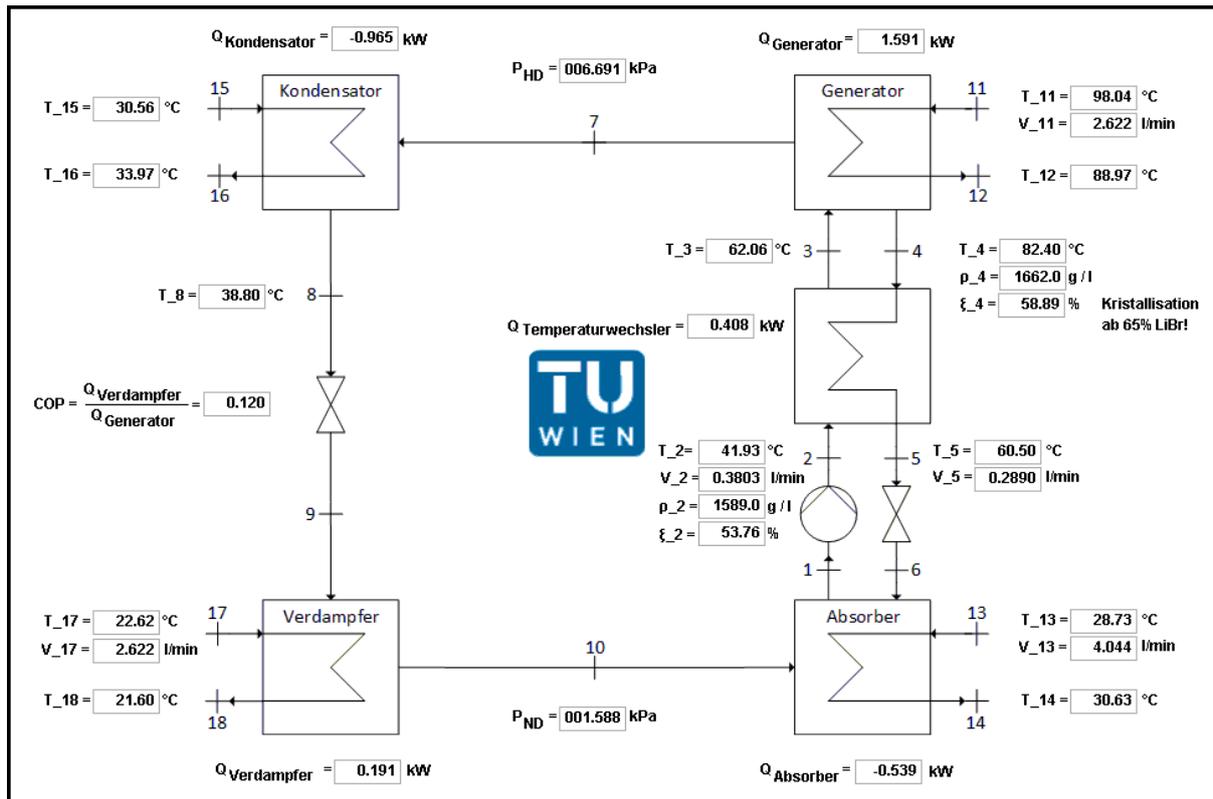


Abbildung 9.4: Stationärer Zustand bei 190 W Kälteleistung und einem COP von 0,12 in Versuch 3

Tabelle 9.3 stellt die realen Betriebsdaten den berechneten Betriebswerten gegenüber.

Tabelle 9.3: Vergleich zwischen Betriebs- und Auslegungsdaten Versuch 3

<i>Bezeichnung</i>	<i>Betriebsdaten</i>	<i>Auslegungsdaten</i>
<i>COP</i>	0,12	0,765
<i>Q_{Kondensator}</i>	0,965 kW	1,279 kW
<i>Q_{Generator}</i>	1,591 kW	1,591 kW
<i>Q_{Verdampfer}</i>	0,191 kW	1,217 kW
<i>Q_{Absorber}</i>	0,539 kW	1,529 kW
<i>Q_{Temperaturwechsler}</i>	0,408 kW	0,2943 kW
<i>P_{HD}</i>	6,691 kPa	8,798 kPa
<i>P_{ND}</i>	1,588 kPa	1,315 kPa
<i>V₂</i>	0,3803 l/min	0,2239 l/min
<i>V₅</i>	0,2890 l/min	0,1938 l/min
<i>V₁₁</i>	2,622 l/min	2,662 l/min
<i>V₁₃=V₁₅</i>	4,044 l/min	4,044 l/min
<i>V₁₇</i>	2,622 l/min	2,622 l/min
<i>T₂</i>	41,93 °C	33,276 °C

<i>T_3</i>	<i>62,06 °C</i>	<i>56,883 °C</i>
<i>T_4</i>	<i>82,40 °C</i>	<i>78,243 °C</i>
<i>T_5</i>	<i>60,50 °C</i>	<i>50,813 °C</i>
<i>T_8</i>	<i>38,80 °C</i>	<i>43,333 °C</i>
<i>T_11</i>	<i>98,04 °C</i>	<i>98,040 °C</i>
<i>T_12</i>	<i>88,97 °C</i>	<i>89,163 °C</i>
<i>T_13</i>	<i>28,73 °C</i>	<i>32,440 °C</i>
<i>T_14</i>	<i>30,63 °C</i>	<i>38,891 °C</i>
<i>T_15</i>	<i>30,56 °C</i>	<i>37,891 °C</i>
<i>T_16</i>	<i>33,97 °C</i>	<i>42,453 °C</i>
<i>T_17</i>	<i>22,62 °C</i>	<i>20,000 °C</i>
<i>T_18</i>	<i>21,60 °C</i>	<i>13,330 °C</i>

10 Résumé

Durch Änderung des Verlaufes der Lösungsleitungen, Austausch der vormals zu schwachen Pumpen sowie durch Entfernen des Gleichrichters in den Lösungsdurchflusssensoren und anschließender Kalibrierung sind alle Lösungskreisläufe funktionstüchtig. Die externen Kreisläufe der Heißwasser- und Kühlwasserversorgung wurden ebenfalls getestet und die erforderlichen Volumenströme erreicht. Die elektrische Verschaltung wurde dokumentiert und von einem Elektriker überprüft.

Die Übersichtlichkeit der Maschine ist durch die Anlagenvisualisierung und Beschriftung aller Ventile, Sensoren, Pumpen und Schalter gegeben und es ist möglich, direkt über die Visualisierung Stoffwerte der Lithiumbromidlösung zu berechnen.

Die Anlagendichtheit, die bei der Druckabfallmessung nachgewiesen wurde, ist für einen Betrieb unter Laborbedingungen ausreichend. Ist die Anlage mit Lithiumbromidlösung gefüllt, so ist die Dichtheit der Drucksensoren des Lösungskreislaufes kein Problem, obwohl die Sensoren nur bis zu einem Druck von -0,7 bar klassifiziert sind.

Die Anlage wurde in Betrieb genommen und es konnte eine Kühlleistung von 0,19 kW bei einem COP von 0,12 erreicht werden. Auch die Entnahme von Lithiumbromidlösung aus dem Generator zur Bestimmung der Konzentration wurde durchgeführt und hat sich als funktional erwiesen.

Durch weitere Maßnahmen, wie eine Erhöhung der Heizleistung und den Anschluss an das Kaltwassernetz des Labors, könnten gleichmäßigere Betriebsbedingungen geschaffen werden und möglicherweise die Leistungsdaten verbessert werden. Die Verdampferleistung fällt derzeit sehr schwach aus. Der Verdampferwärmetauscher wird nur unzureichend durch die Verdampferberieselung benetzt. Vor allem im Nahbereich zur Absorberkammer funktioniert die Berieselung derzeit nur ungenügend. Um die Verdampferleistung zu erhöhen, sollte die Berieselung neu ausgerichtet werden. Zusätzlich könnte die Anzahl der Bohrungen der Berieselung reduziert werden. Die Verdampferpumpenleistung könnte durch tiefer setzen der Verdampferpumpe erhöht werden, da dadurch der für diese Art von Pumpen notwendige Vordruck erhöht werden würde.

Die derzeitigen Leistungsdaten belegen die Funktionalität der Anlage, es ist jedoch Verbesserungspotential vorhanden. Eine Laborübung, um das Funktionsprinzip einer Absorptionskältemaschine zu zeigen, kann durchgeführt werden. Eventuell ist auch ein Betrieb bei unterschiedlichen Heizkurven und Temperaturen möglich, um die Funktionsweise in Richtung solarer Kühlung zu testen.

Die Kosten des Projekts belaufen sich derzeit auf etwa 6300 €. Hierbei wurden allerdings keine Arbeitszeit und auch keine vorhandenen Bauteile des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik einberechnet.

11 Verzeichnisse

11.1 Abkürzungen

<i>Bezeichnung</i>	<i>Bedeutung</i>
<i>H₂O</i>	<i>Summenformel für Wasser</i>
<i>LiBr</i>	<i>Verhältnisformel für Lithiumbromid</i>
<i>SPS</i>	<i>Speicherprogrammierbare Steuerung</i>
<i>EES</i>	<i>Engineering Equation Solver</i>
<i>AKM</i>	<i>Absorptionskältemaschine</i>
<i>COP</i>	<i>Coefficient of Performance, Leistungszahl</i>
<i>AWP</i>	<i>Absorptionswärmepumpe</i>
<i>NH₃</i>	<i>Summenformel für Ammoniak</i>
<i>R&I Fließschema</i>	<i>Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema</i>
<i>PTFE</i>	<i>Polytetrafluorethylen, umgangssprachlich oft als Teflon bezeichnet</i>
<i>V.M.</i>	<i>Vakuummeter</i>
<i>B&R</i>	<i>Bernecker&Rainer</i>
<i>ST</i>	<i>Structured Text</i>
<i>TCP/IP</i>	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
<i>VNC</i>	<i>Virtual Network Computing</i>
<i>CSV</i>	<i>Comma-separated values</i>
<i>FTP</i>	<i>File Transfer Protocol</i>

11.2 Formelzeichen

Mathematische Symbole - Latein

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bedeutung</i>
\dot{Q}	W	Wärmestrom
\dot{V}	$m^3/h, l/min$	Volumenstrom
T	$^{\circ}C$	Temperatur
\dot{W}	W	Arbeit
P, p	kPa, mbar, bar	Druck
f	-	Zirkulationsrate
\dot{m}	$kg \cdot s^{-1}$	Massenstrom
h	J/kg	spezifische Enthalpie
h	m	Höhe
x	-	Massenanteil Wasserdampf
V	m^3, l	Volumen
q_L	$mbar \cdot l \cdot s^{-1}$	Leckrate
t	s	Zeit
ρ	$kg/m^3, g/l$	Dichte
R	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Gaskonstante
D	mm	Durchmesser
c	$kJ/kg \cdot K^{-1}$	spezifische Wärmekapazität
w	-	Massenanteil Lithiumbromid

Mathematische Symbole - Griechisch

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bedeutung</i>
η	-	Wirkungsgrad
χ	-	Stoffmengenanteil Lithiumbromid
ρ'	mol/m	molare Dichte von gesättigtem, flüssigem Wasser
Δ	-	Differenz
ρ	$kg/m^3, g/l$	Dichte

Mathematische Symbole - Indizes

<i>Symbol</i>	<i>Bedeutung</i>
TW	Temperaturwechsler
AKM	Absorptionskältemaschine
AWM	Absorptionswärmepumpe
TV	Temperaturverstärker
H	Hoch
N	Niedrig
Kon	Kondensator
Gen	Generator

<i>Abs</i>	<i>Absorber</i>
<i>Ver</i>	<i>Verdampfer</i>
<i>h</i>	<i>heating, Heizung</i>
<i>c</i>	<i>condenser, Kondensator</i>
<i>e</i>	<i>evaporator, Verdampfer</i>
<i>ND</i>	<i>Niederdruck</i>
<i>HD</i>	<i>Hochdruck</i>
<i>L</i>	<i>Lithiumbromid</i>
<i>Luft</i>	<i>Luft</i>
<i>FI02</i>	<i>Volumenstromsensor FI02</i>
<i>FI05</i>	<i>Volumenstromsensor FI05</i>
<i>W</i>	<i>Wasser</i>
<i>LiBr</i>	<i>Lithiumbromid</i>

Physikalische Größen

Symbol	Einheit	Bedeutung
g	m/s^2	<i>Erdbeschleunigung, 9,81 m/s²</i>
R_{Luft}	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	<i>Gaskonstante trockene Luft, 287,05 J·kg⁻¹·K⁻¹</i>
c_w	$kJ/kg \cdot K^{-1}$	<i>spezifische Wärmekapazität Wasser, 4,182 kJ/kg·K⁻¹</i>
T_c	K	<i>kritische Temperatur Wasser, 657,096 K</i>
ρ_c	mol/m^3	<i>kritische molare Dichte Wasser, 17,873 mol/m³</i>
M_{LiBr}	kg/mol	<i>molare Masse Lithiumbromid, 0,08685 kg/mol</i>
M_w	kg/mol	<i>molare Masse Wasser, 0,018015268 kg/mol</i>

11.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Auslegungsdaten, EES Berechnung, vgl. [1], S.14	4
Abbildung 2.1: Schema einer einstufigen Absorptionskältemaschine, vgl. [5], S. 2	7
Abbildung 2.2: Prinzip Typ I Wärmepumpe, vgl. [5], S. 3	8
Abbildung 2.3: Idealisierte Darstellung einer Absorptionskältemaschine mittels links- und rechtsläufigem Carnot-Prozess, vgl. [5], S. 10.....	8
Abbildung 2.4: Prinzip Typ II Wärmepumpe, vgl. [5], S. 4	9
Abbildung 2.5: Idealisierte Darstellung eines Temperaturverstärkers mittels rechts- und linksläufigem Carnot-Prozess, vgl. [5], S. 11	10
Abbildung 2.6: Dühring-Diagramm einer zweistufige H ₂ O/LiBr - Absorptionskältemaschine (paralleler Lösungsfluss), vgl. [5], S. 158.....	11
Abbildung 2.7: Rektifikationskolonne, vgl. [5], S. 90.....	15
Abbildung 2.8: Anlagenschema einer einstufigen Absorptionskältemaschine.....	16
Abbildung 2.9: Gleichgewichtsdiagramm H ₂ O/LiBr - Lösung, vgl. [7], S. 20.71.....	17
Abbildung 2.10: Enthalpie-Konzentrationsdiagramm, vgl. [7], S. 20.70	18
Abbildung 4.1: Anlagenschema mit Absorptionskältemaschine, Heißwasser- und Kaltwasserversorgung	21
Abbildung 4.2: Überblick über die Hauptkomponenten der Absorptionskältemaschine.....	24
Abbildung 4.3: Ursprüngliche Konstruktion (links), vgl. [1], S. 37, und derzeitiger Aufbau (rechts) der Anlage.....	26
Abbildung 4.4: Kondensator, Kondensatwanne und Generator	28
Abbildung 4.5: Absorberaufgabewanne und Absorber.....	29
Abbildung 4.6: Verdampferberieselung und Verdampfer	29
Abbildung 4.7: Generator-/Kondensatorbehälter (links) und Absorber-/Verdampferbehälter (rechts)	29
Abbildung 4.8: Absorptionskältemaschine vor dem Anbringen der Isolierung	30
Abbildung 5.1: Abdrücken mit Flüssigkeit des Verdampferwärmetauschers	34
Abbildung 5.2: Seifenblasentest am Kondensatorwärmetauscher.....	35
Abbildung 5.3: Seifenblasenbildung an undichter Pore einer Schweißnaht.....	36
Abbildung 5.4: Druckabfall über 152 Stunden	37
Abbildung 5.5: Absolutdruck und Druck unter Temperatureinfluss im Vergleich	37
Abbildung 5.6: Druckverlust über 152 Stunden	38
Abbildung 5.7: Druckanstiegmessung im Absorber-/Verdampferbehälter über 3 Stunden	39

Abbildung 5.8: Druckanstiegmessung im Generator-/Kondensatorbehälter über 3 Stunden mit Volumenstromsensoren.....	39
Abbildung 5.9: Druckanstiegmessung im Generator-/Kondensatorbehälter über 3 Stunden ohne Volumenstromsensoren.....	40
Abbildung 5.10: Druckanstiegmessung der Gesamtanlage über 3 Stunden.....	41
Abbildung 5.11: Druckanstiegmessung der gefüllten Gesamtanlage über 3 Stunden	41
Abbildung 6.1: Druckverlust Volumenstromsensor FCH-m-ALU-IND in Abhängigkeit vom Volumenstrom, vgl. Anhang 12.5.1.....	46
Abbildung 6.2: Kalibrierdaten Volumenstromsensor FI 02 und Ausgleichsgerade y_{FI02}	48
Abbildung 6.3: Kalibrierdaten Volumenstromsensor FI 05 und Ausgleichsgerade y_{FI05}	49
Abbildung 6.4: Aufbau der B&R Steuerung.....	50
Abbildung 7.1: Startseite der Visualisierung, Anlagenschema.....	53
Abbildung 7.2: Eingabe der Dichte.....	53
Abbildung 7.3: Konzentrationswarnung bei einer Lithiumbromidkonzentration über 65 %.....	54
Abbildung 7.4: Steuerung der Heizung mit Temperatureingabemöglichkeit	54
Abbildung 7.5: Messdatenaufzeichnung.....	55
Abbildung 7.6: Trenddaten der Wärmeströme und COP.....	55
Abbildung 7.7: Trends Temperaturen in der Anlage.....	56
Abbildung 7.8: Trends Temperaturen Versorgung.....	57
Abbildung 7.9: Trends Volumenströme/Drücke	58
Abbildung 7.10: Fließschaltbild	59
Abbildung 8.1: Erweiterung des Auslegungsprogrammes um Eingabemöglichkeit	65
Abbildung 9.1: Entnahmebehälter während Entnahmevorgang	69
Abbildung 9.2: Stationärer Zustand bei 150 W Kälteleistung und einem COP von 0,11 in Versuch 2..	71
Abbildung 9.3: Isolierte Absorptionskältemaschine mit Thermostat für Kaltwasserversorgung	73
Abbildung 9.4: Stationärer Zustand bei 190 W Kälteleistung und einem COP von 0,12 in Versuch 3..	74

11.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Kenndaten laut Auslegung.....	5
Tabelle 2.1: Eigenschaften Arbeitsstoffpaare, vgl. [5], S. 24.....	13
Tabelle 2.2: Annahmen für thermodynamische Zustände, vgl. [5], S. 127	16
Tabelle 2.3: Zustandsdaten überschlagsmäßige Auslegung.....	19
Tabelle 4.1: Legende zum Anlagenschema	22
Tabelle 4.2: maximale Leistungsaufnahme Absorptionskältemaschine	27
Tabelle 5.1: Leckrate	31
Tabelle 5.2: erforderliche Gesamtleckraten, vgl. [13], S. 471	31
Tabelle 5.3: Überdrucklecksuchverfahren, vgl. [13], S. 474ff.	33
Tabelle 5.4: Vakuumlecksuchverfahren, vgl. [13], S. 480ff.	33
Tabelle 5.5: Druckänderung unter Temperatureinfluss.....	36
Tabelle 5.6: Leckraten bei unterschiedlichen Dichtheitsmessungen.....	42
Tabelle 6.1: Komponenten der Messtechnik	44
Tabelle 6.2: Kalibrierdaten Volumenstromsensor FI 02.....	47
Tabelle 6.3: Kalibrierdaten Volumenstromsensor FI 05.....	48
Tabelle 7.1: Netzwerkparameter SPS.....	52
Tabelle 7.2: aufgezeichnete Messdaten.....	59
Tabelle 7.3: Zeichen und Koeffizienten der Gl. (7.3).....	61
Tabelle 7.4: Koeffizienten und Exponenten der Gl.(7.4)	62
Tabelle 7.5: Exponenten und Koeffizienten der Gl.(7.5)	62
Tabelle 7.6: Koeffizienten der Gl. (7.8).....	63
Tabelle 9.1: Prüfung der Kreisläufe vor Inbetriebnahme.....	66
Tabelle 9.2: Vergleich zwischen Betriebs- und Auslegungsdaten Versuch 2	72
Tabelle 9.3: Vergleich zwischen Betriebs- und Auslegungsdaten Versuch 3	74

11.5 Formelverzeichnis

(2.1): COP einer Typ I - Absorptionswärmepumpe	9
(2.2) : COP einer Typ I - Absorptionskältemaschine	9
(2.3): COP einer Typ II - Absorptionswärmepumpe	10
(2.4): Zirkulationsrate f	17
(2.5): Massenanteil w_2	17
(2.6): Verdampferwärmestrom \dot{Q}_{Ver}	18
(2.7): Massenstrom \dot{m}_5	19
(2.8): Massenstrom \dot{m}_2	19
(2.9): Massenstrom \dot{m}_3	19
(2.10): Absorberwärmestrom \dot{Q}_{Abs}	19
(2.11): Generatorwärmestrom \dot{Q}_{Gen}	20
(2.12): Kondensatorwärmestrom \dot{Q}_{Kon}	20
(2.13): COP der Schnellauslegung	20
(5.1): Leckrate q_L	31
(5.2): Luftdruck in Behälter p_{Luft}	36
(5.3): Ausgleichsgerade <i>Druckverlust</i>	38
(6.1): Abweichung Temperatur PT-100	44
(6.2): Hydrostatischer Druck auf Volumenstrommesser FI 05	46
(6.3): Ausgleichsgerade y_{FI02}	48
(6.4) : Ausgleichsgerade y_{FI05}	49
(7.1): Wärmestrom Wasser \dot{Q}_w – mit Massenstrom	61
(7.2): Wärmestrom Wasser \dot{Q}_w – mit Volumenstrom	61
(7.3): Dichte Wasser ρ_w	61
(7.4): Dichte Lithiumbromidlösung ρ_L	62
(7.5): molare Dichte von gesättigtem, flüssigem Wasser ρ'	62
(7.6): Stoffmengenanteil χ	63
(7.7): Massenanteil w	63
(7.8): spezifische Enthalpie Lithiumbromidlösung h_L	63
(7.9): Wärmestrom Temperaturwechsler \dot{Q}_{TW}	64

11.6 Literaturverzeichnis

- [1] MATTHIAS MAIR-ZEININGER: *Auslegung und Konstruktion einer H₂O/LiBr Absorptionskältemaschine für den Laborunterricht*. Wien, Technische Universität Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik E302. Diplomarbeit. 2017
- [2] F-CHART SOFTWARE, L. L.C.: *EES Engineering Equation Solver : Gleichungssolver, Software*. URL <http://www.fchart.com/ees> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [3] YUAN Z.; HEROLD, Keith E.: *Thermodynamic Properties of Aqueous Lithium Bromide Using a Multiproperty Free Energy Correlation*. In: *HVAC&R Research* (Juli 2005), Vol. 11, No. 3, S. 377–393
- [4] YUAN Z.; HEROLD, Keith E.: *Specific Heat Measurements on Aqueous Lithium Bromide*. In: *HVAC&R Research* (Juli 2005), Vol. 11, No. 3, S. 361–375
- [5] HEROLD, Keith E.; RADERMACHER, Reinhard; KLEIN, Sanford A.: *Absorption Chillers and Heat Pumps*. Second Edition. Boca Raton, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016
- [6] BAEHR, Hans Dieter; KABELAC, Stephan: *Thermodynamik : Grundlagen und technische Anwendungen*. 15. Auflage. Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag, 2012
- [7] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (Hrsg.): *2005 ASHRAE Handbook: Fundamentals - SI Edition*. 1791 Tullie Cir NE, Atlanta, GA 30329, USA: ASHRAE, 2005
- [8] BUNDESGESETZBLATT: *BGBl. II Nr. 429/2011: Anhang I*. URL https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2011_II_429/COO_2026_100_2_721131.html – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [9] GRUNDFOS PUMPEN VERTRIEB GES.M.B.H.: *Grundfos COMFORT 15-14 B PM: Trinkwasserzirkulationspumpe*. URL <https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?frequency=50&lang=DEU&productnumber=98358985&qcid=357413246> – Überprüfungsdatum 2018-04-17

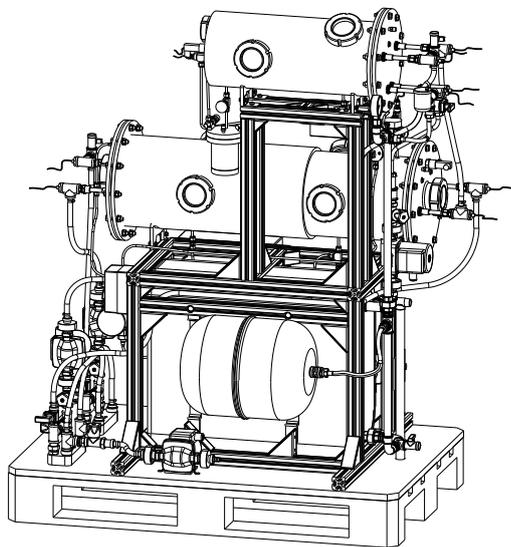
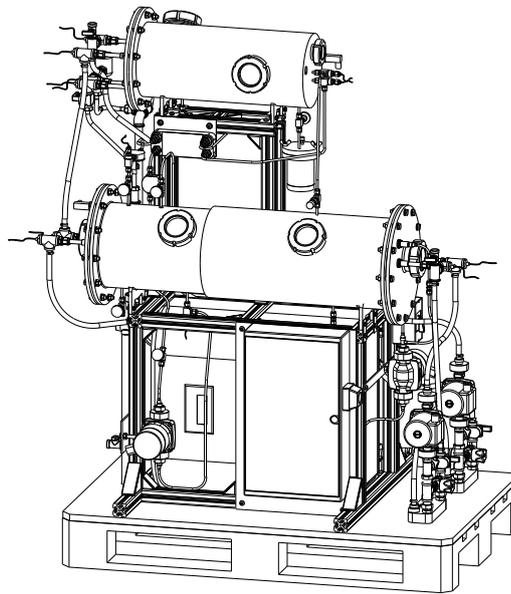
- [10] WITA-WILHELM TAAKE GMBH: *WITA Delta HE 55 LED: Hocheffizienz Umwälzpumpe*. URL <https://www.wita.de/produkte/pumpentechnik/hoch-effizienzpumpen/wita-delta-he-55-led/> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [11] PHU DAMBAT: *IBO OHI 25-40/180: Heizungsumwälzpumpe*. URL <http://www.dambat.com/ohi-circulating-glandless-pumps.html> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [12] COSENZA, F.; VLIET, G. C.: *Absorption in Falling Water/LiBr Films on Horizontal Tubes*. In: *ASHRAE Transactions* (1990), 96 (Pt. 1), S. 693–701
- [13] WUTZ, Max; ADAM, Hermann; WALCHER, Wilhelm; JOUSTEN, Karl: *Handbuch Vakuumtechnik: Theorie und Praxis*. 7. Auflage. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH, 2000
- [14] ROTHENBERGER WERKZEUGE GMBH: *Rothenberger RP-50: Prüfpumpe*. URL <https://rothenberger.com/de-de/prufpumpe-rp.html> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [15] TITEC TEMPERATURMESSTECHNIK GMBH: *Drucktransmitter DT1: 4-20 mA, -1...3 bar*. URL https://www.titec-gmbh.de/wp-content/uploads/2018/02/Datenblatt-DT1_de_en.pdf – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [16] ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK: *Luftdruck Wien Innere Stadt: (reduziert auf Meeresniveau)*. URL https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetterwerte-analysen/tawes-verlaufsgraphiken/wien_innere_stadt/luftdruck/?mode=geo&druckang=red – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [17] B.I.O-TECH E.K.: *Durchflussmesser FCH-C-Ms-N: Artikel-Nr.: 97478387*. URL <https://www.btiowater.com/flowmeter-produkte/wasser-durchflussmesser-water-flow-meters-durchflussmesser-fuer-wasser-wasser-durchflussmessung-dfm-messing-r-12-1/durchflussmesser-fuer-wasser-fch-c-ms-n-30-l-min.html> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [18] OTOM GROUP GMBH: *Einschraubfühler EF1P-PT100A-3.0-50-4L: G 1/2" x 50 mm, 4-Leiter*. URL <https://www.sensorshop24.de/tpl/download/EF1.pdf> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [19] OTOM GROUP GMBH: *Kabelfühler KP-PT100A-3.0-650-4L : 6 x 50 mm, 4-Leiter*. URL <https://www.sensorshop24.de/tpl/download/KP.pdf> – Überprüfungsdatum 2018-04-17

- [20] ENDRESS+HAUSER GMBH: *Absolutdrucksensor Cerabar PMC21*. URL https://portal.endress.com/wa001/dla/5001041/2232/000/04/TI01133PEN_0517.pdf – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [21] B.I.O-TECH E.K.: *Durchflussmesser FCH-m-ALU-IND: Artikel-Nr.: 97478035*. URL <https://www.btiowater.com/flowmeter-produkte/flowmeter-mini-durchflussmesser-turbinen-durchflussmessgeraete-schaufelrad-durchfluss-messgeraete-q-0010-1000-lmin-uebersicht/mini-oeldurchflussmesser-oel-durchflussmesser-oeldurchflussmessgeraet-kraftstoffverbrauch-durchflussmessgeraete-fuer-ethanol-methanol-oel-benzin-diesel-oel-serie-fch-mini-alu/fch-m-alu-ind-10-lmin-art-nr-97478035.html> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [22] B&R INDUSTRIAL AUTOMATION GMBH: *X20CP1585: Zentraleinheit*. URL <https://www.br-automation.com/de-at/produkte/steuerungssysteme/x20-system/x20-cpus/x20cp1585> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [23] DIN EN 60751. 2009-05. *Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren*
- [24] LOY UPP, E.; LANASA, Paul J.: *Fluid Flow Measurement: A Practical Guide to Accurate Flow Measurement*. Second Edition: Gulf Professional Publishing, 2002
- [25] BEUTLER A.: *Stoff- und Wärmeübergang bei der Rieselfilmabsorption am horizontalen Rohr Rohr*. München, Technische Universität München. Dissertation. 1997
- [26] LOTTER F.: *Inbetriebnahme einer Versuchsanlage zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung*. München, Hochschule für angewandte Wissenschaften München. Bachelorarbeit. 2015
- [27] B&R INDUSTRIAL AUTOMATION GMBH: *X20ATB312: Temperatur-Eingangsmodule*. URL <https://www.br-automation.com/de/produkte/steuerungssysteme/x20-system/temperaturmessung/x20atb312> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [28] B&R INDUSTRIAL AUTOMATION GMBH: *X20DI2377: Ereigniszählermodul*. URL <https://www.br-automation.com/de/produkte/io-systeme/x20-system/digitale-eingange/x20di2377> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [29] B&R INDUSTRIAL AUTOMATION GMBH: *X20AI4622: Analoges Eingangsmodule*. URL <https://www.br-automation.com/de/produkte/steuerungssysteme/x20-system/analoge-eingange/x20ai4622/> – Überprüfungsdatum 2018-04-17

- [30] B&R INDUSTRIAL AUTOMATION GMBH: *X20DO4332: Digitales Ausgangsmodul*. URL <https://www.br-automation.com/de/produkte/steuerungssysteme/x20-system/digitale-ausgange/x20do4332> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [31] B&R INDUSTRIAL AUTOMATION GMBH: *B&R Automation Studio 4.2: Entwicklungs- und Laufzeitumgebung für alle Aspekte der Automatisierung von Steuerungs- und Antriebstechnik über Visualisierung und Bedienung bis zur integrierten Sicherheitstechnik*. URL <https://www.br-automation.com/de-at/produkte/software/automation-studio/> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [32] DIPL.-ING. FELIX BIRKELBACH, TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN, INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK UND THERMODYNAMIK: *Software für Speicherung von Messdaten in Automation Studio 4.2*. 2017-12-06.
- [33] GEORGE S. KELL: *Density, Thermal Expansivity, and Compressibility of Liquid Water from 0° to 150°C: Correlations and Tables for Atmospheric Pressure and Saturation Reviewed and Expressed on 1968 Temperature Scale*. In: *Journal of Chemical & Engineering Data* (1975), 20(1), S. 97–105
- [34] FRANK E. JONES; GEORGIA L. HARRIS: *ITS-90 Density of Water Formulation for Volumetric Standards Calibration*. In: *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* 1992, 97(3), S. 335–340
- [35] J. PATEK ; J. KLOMFAR: *A computationally effective formulation of the thermodynamic properties of LiBr–H₂O solutions from 273 to 500 K over full composition range*. In: *International Journal of Refrigeration* (2006), Nr. 29, S. 566–578
- [36] JULABO GMBH: *Julabo F33-MA: Thermostat*. URL <https://www.julabo.com/sites/default/files/downloads/manuals/german/19500366-V4.pdf?q=1524528087> – Überprüfungsdatum 2018-04-25

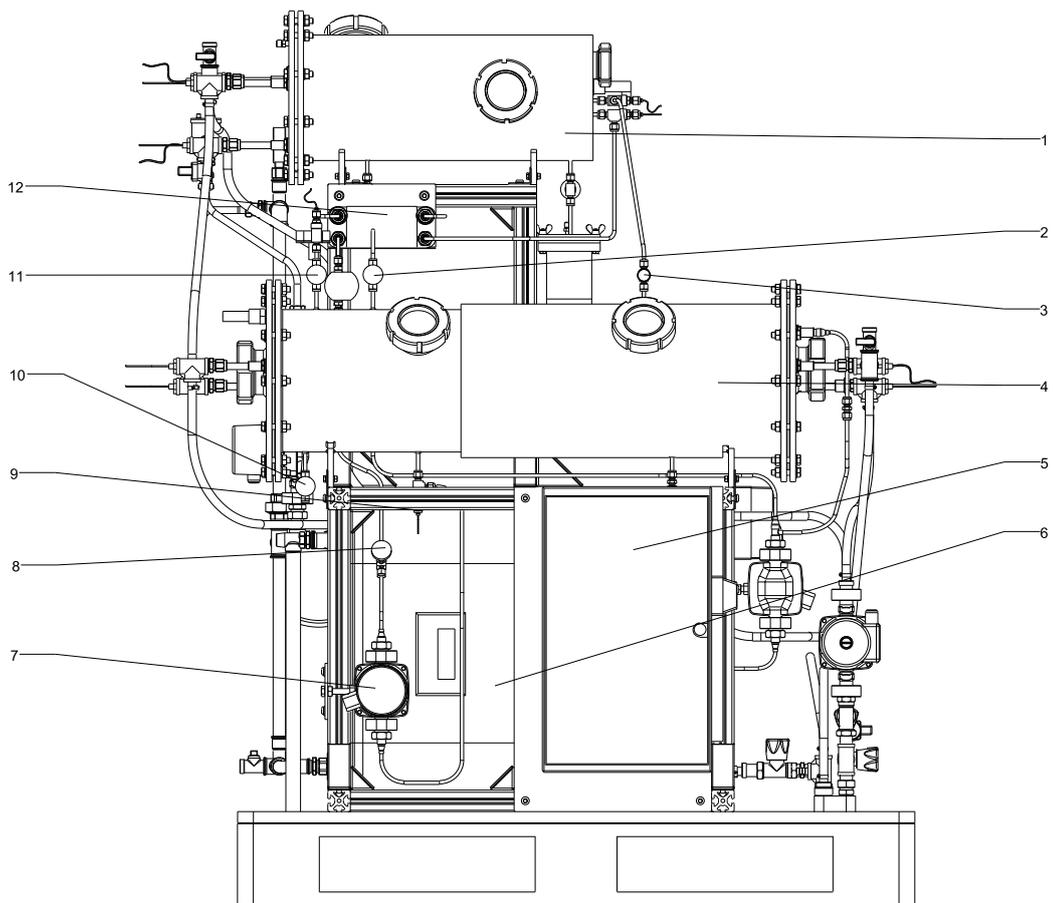
12 Anhang

12.1 Technische Gesamtzeichnung

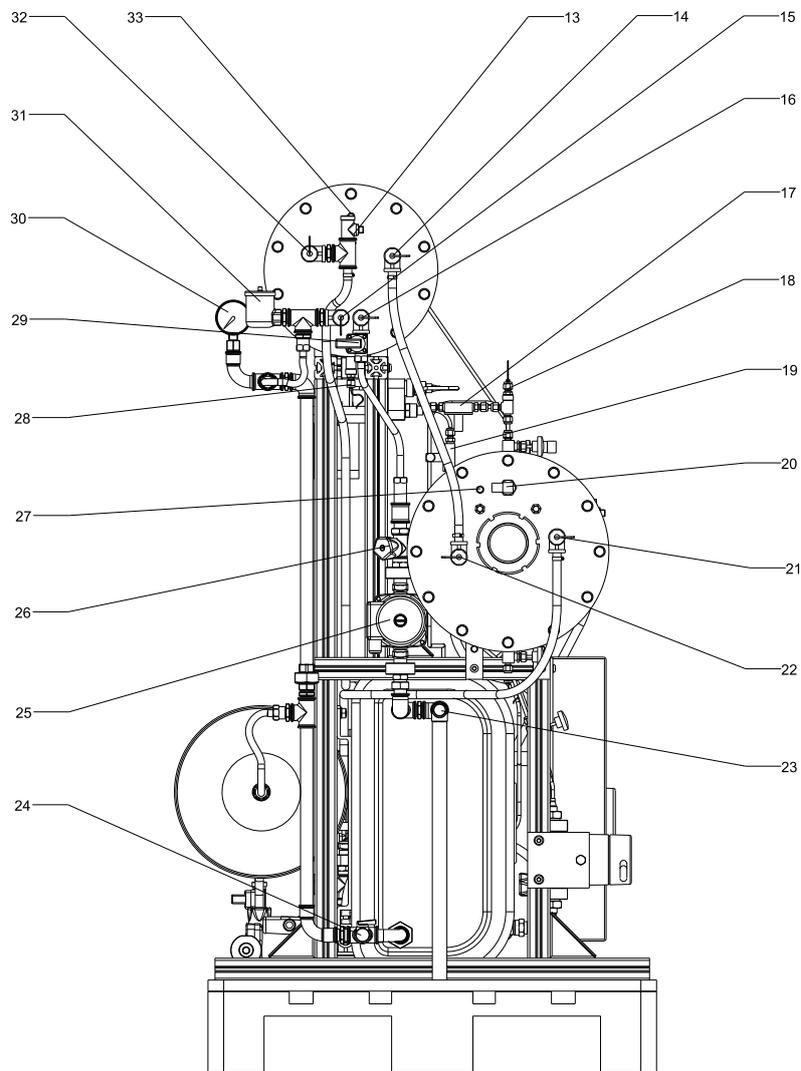


größte Abmessungen: 860x1600x1350 (BxHxL)

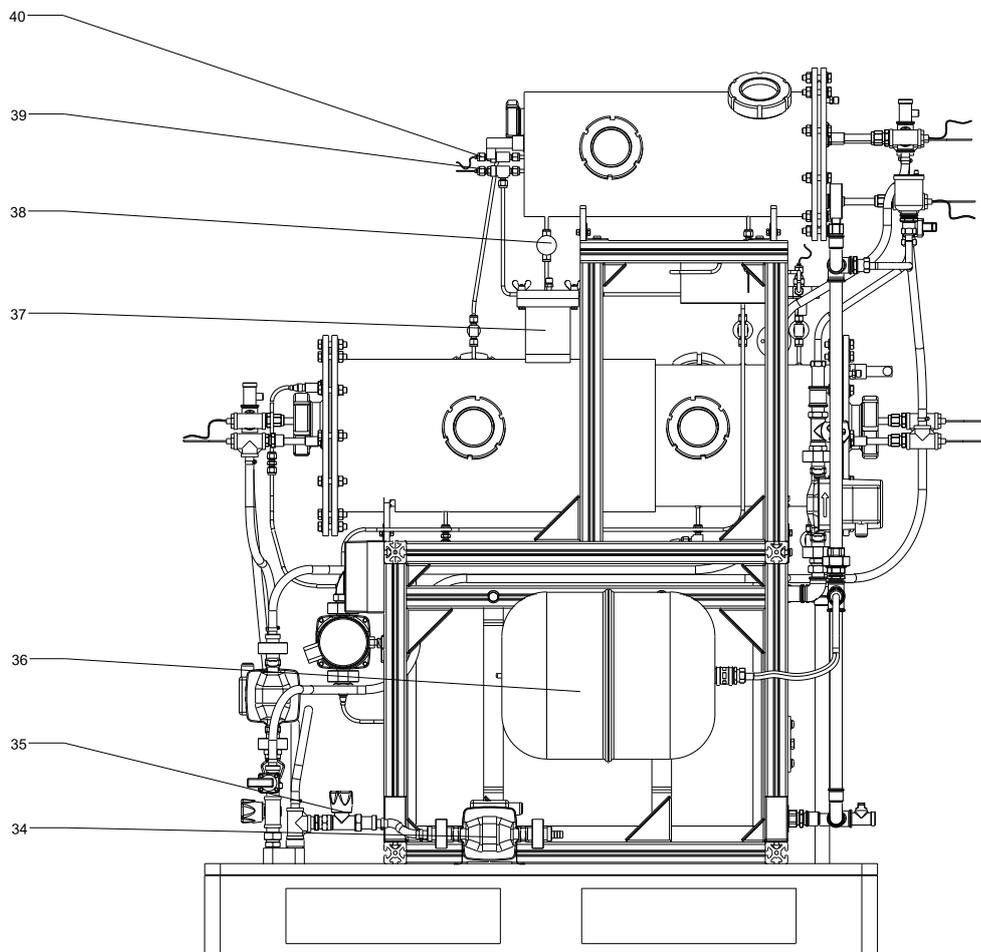
Allg. Toleranz	Oberfläche	Maßstab: -	
-	-	Werkstoff: -	
gez.	Datum	Name	Absorptionskältemaschine
gepr.	05.04.18	Ernst	
TU WIEN			Blatt 1 v. 7



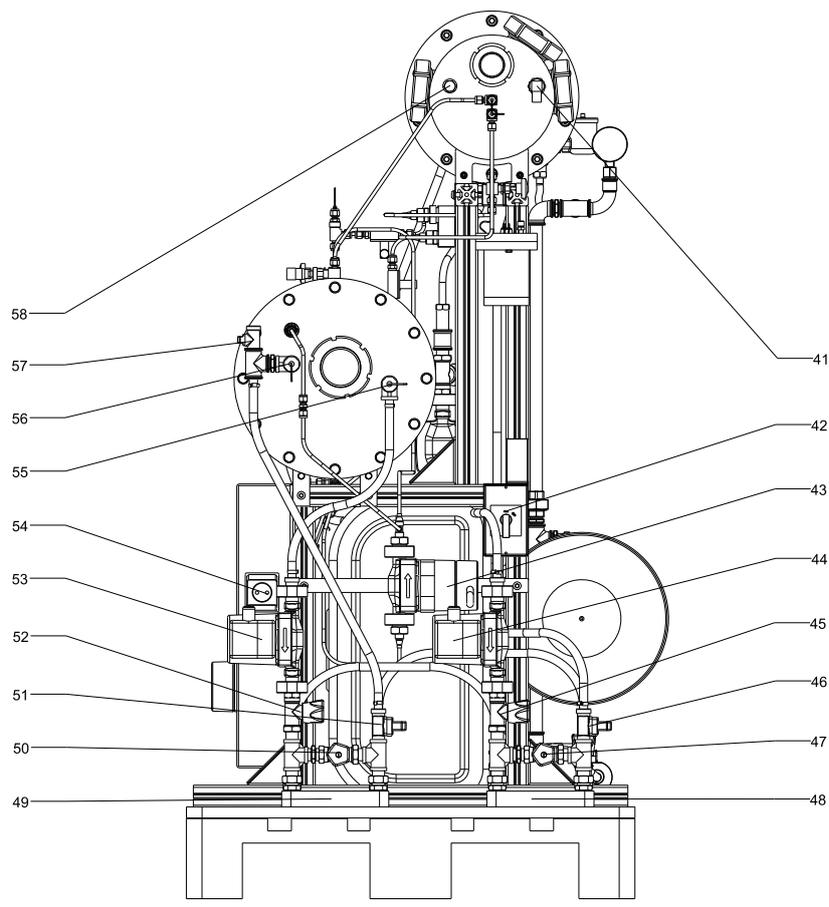
Allg. Toleranz		Oberfläche	Maßstab: 1:10	
-		-	Werkstoff: -	
	Datum	Name	Absorptionskältemaschine	
gez.	05.04.18	Ernst		
gepr.				
TU WIEN			Vorderansicht	Blatt 2 v. 7



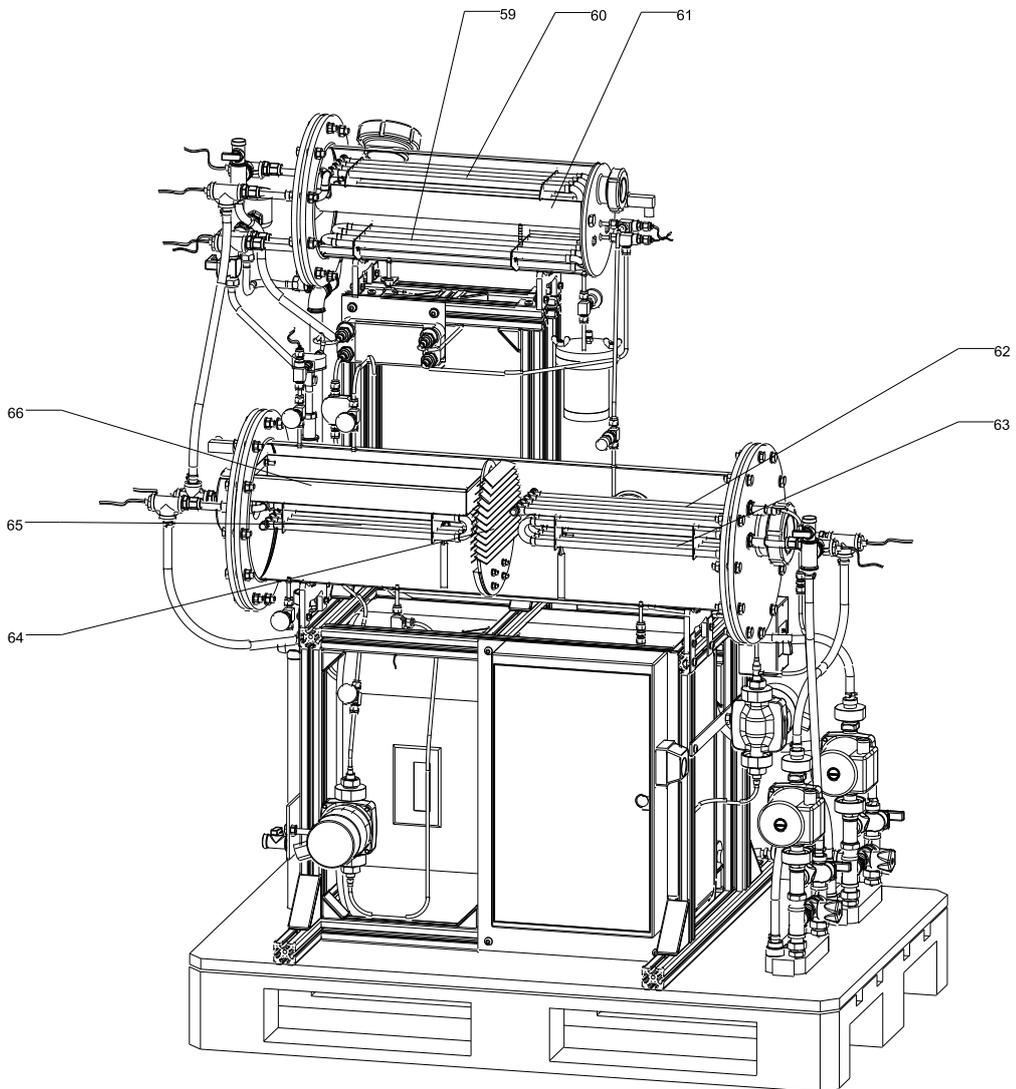
Alg. Toleranz	Oberfläche	Maßstab: 1:10	
-	-	Werkstoff: -	
Datum	Name	Aborptionskältemaschine	
gez. 05.04.18	Ernst		
gepr.			
TU WIEN		Seitenansicht - Heißwasserversorgung	Blatt 3 v. 7



Alg. Toleranz	Oberfläche	Maßstab: 1:10	
-	-	Werkstoff: -	
gez.	Datum	Name	Absorptionskältemaschine
gepr.	05.04.18	Ernst	
TU WIEN		Rückansicht	Blatt 4 v. 7



Alg. Toleranz	Oberfläche	Maßstab: 1:10	
-	-	Werkstoff: -	
Datum	Name	Absorptionskältemaschine	
gez. 05.04.18	Ernst		
gepr.			
TU WIEN		Seitenansicht - Kühlwasserversorgung	Blatt 5 v. 7



Alg. Toleranz	Oberfläche	Maßstab: 1:10	
-	-	Werkstoff: -	
gez.	Datum	Name	Absorptionskältemaschine
gepr.	05.04.18	Ernst	
TU WIEN		Ansicht: Behälter geschnitten	Blatt 6 v. 7

Nr.	Vorderansicht
1	B 001 Kondensator-/Generatorbehälter
2	V 004 Ventil Kristallisationsvorbeugung
3	V 003 Kältemitteldrossel
4	B 002 Absorber-/Verdampferbehälter
5	Schaltkasten
6	B 003 Boiler Heißwasserversorgung
7	P 001 Lösungspumpe
8	V 002 Regulierungsventil Volumenstrom Lösungspumpe
9	TI 02 Temperatursensor Lösung nach Austritt Absorber
10	V 005 Entnahmeventil Absorber
11	V 001 Lösungsdrössel
12	W 001 Temperaturwechsler Lösung

Nr.	Seitenansicht - Heißwasserversorgung
13	V 019 Einfüll-/Ablassventil Kühlwasser Absorber/Kondensator
14	TI 15 Temperatursensor Kondensator Eintritt
15	TI 12 Temperatursensor Generator Austritt
16	TI 11 Temperatursensor Generator Eintritt
17	FI 05 Volumenstromsensor arme Lösung
18	TI 05 Temperatursensor Lösung nach Temperaturwechsler
19	FI 02 Volumenstromsensor reiche Lösung
20	PI 02 Drucksensor Absorber/Verdampfer
21	TI 13 Temperatursensor Absorber Eintritt
22	TI 14 Temperatursensor Absorber Austritt
23	V 010 Sicherheitsventil Heißwasserversorgung, Ansprechdruck 3 bar
24	V 016 Einfüll-/Ablassventil Heißwasserversorgung
25	P 003 Heißwasserversorgungspumpe
26	V 009 Regulierungsventil Volumenstrom Heißwasserversorgung
27	V 007 Evakuierungsventil Absorber/Verdampfer
28	TI 04 Temperatursensor Lösung vor Temperaturwechsler
29	FI 11 Volumenstromsensor Generator - Heißwasser
30	PI 03 Manometer Heißwasserversorgung, analog 0-4 bar
31	V 015 Entlüftungsventil Heißwasserversorgung
32	TI 16 Temperatursensor Kondensator Austritt
33	V 008 Evakuierungsventil Generator/Kondensator

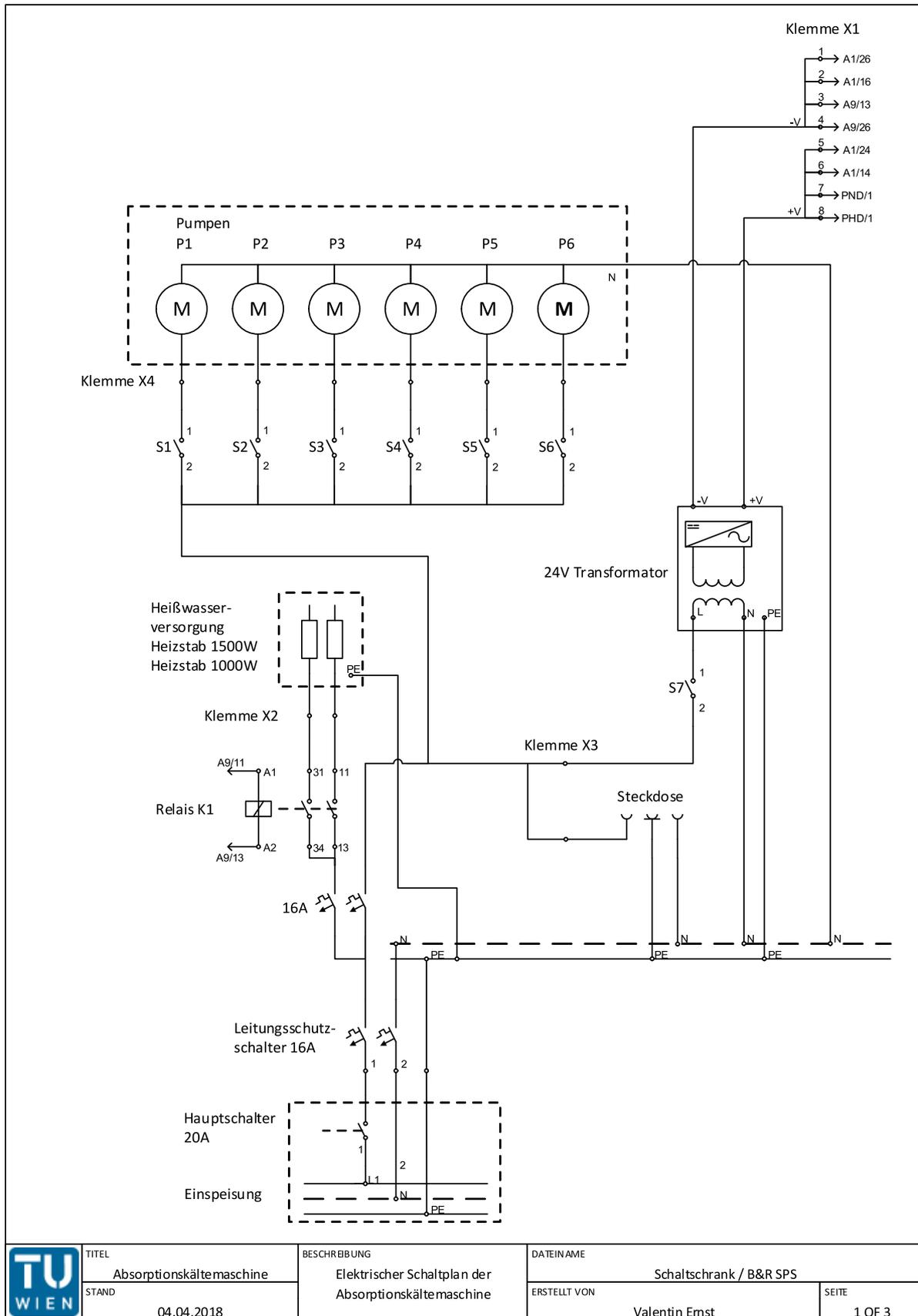
Nr.	Rückansicht
34	P 006 Kaltwasserversorgungspumpe
35	V 017 Regulierungsventil Volumenstrom Kaltwasser
36	A 001 Membranausgleichsbehälter Heißwasserversorgung
37	Entnahmebehälter
38	V 006 Entnahmeventil Generator
39	TI 03 Temperatursensor Lösung vor Eintritt Generator
40	TI 08 Temperatursensor Kältemittel Austritt Kondensator

Nr.	Seitenansicht - Kühlwasserversorgung
41	PI 01 Drucksensor Generator/Kondensator
42	Hauptschalter
43	P 002 Verdampferpumpe
44	P 005 Kühlwasserversorgungspumpe - Absorber/Kondensator
45	V 013 Regulierungsventil Volumenstrom Absorber/Kondensator
46	FI 13 Volumenstromsensor Absorber/Kondensator - Kühlwasser
47	V 014 Regulierungsventil Temperatur Absorber
48	W 003 Kaltwasser zu Kühlwasser Absorber/Kondensator
49	W 002 Kaltwasser zu Kühlwasser Verdampfer
50	V 012 Regulierungsventil Temperatur Verdampfer
51	FI 17 Volumenstromsensor Verdampfer - Kühlwasser
52	V 011 Regulierungsventil Volumenstrom Verdampfer
53	P 004 Kühlwasserversorgungspumpe - Verdampfer
54	230 V Steckdose
55	TI 18 Temperatursensor Verdampfer Austritt
56	TI 17 Temperatursensor Verdampfer Eintritt
57	V 018 Einfüll-/Ablassventil Kühlwasser Verdampfer
58	Einfüllöffnung Lithiumbromidlösung

Nr.	Ansicht - Behälter geschnitten
59	Generator
60	Kondensator
61	Kondensatwanne
62	Berieselung Verdampfer
63	Verdampfer
64	Tröpfchenabscheider
65	Absorber
66	Aufgabewanne Absorber

Allg. Toleranz	Oberfläche	Maßstab: -	
-	-	Werkstoff: -	
Datum	Name	Absorptionskältemaschine	
gez. 05.04.18	Ernst		
gepr.			
TU WIEN		Legende	Blatt 7 v. 7

12.2 Elektrischer Schaltplan



TITEL
Absorptionskältemaschine
STAND
04.04.2018

BESCHREIBUNG
Elektrischer Schaltplan der
Absorptionskältemaschine

DATEINAME
Schaltschrank / B&R SPS
ERSTELLT VON
Valentin Ernst

SEITE
1 OF 3

B&R SPS Overview

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
X20CP1585	X20ATB312	X20ATB312	X20ATB312	X20ATB312	X20DI2377	X20DI2377	X20DI2377	X20AI4622	X20DO4332

A1
A1/11 ◦
A1/12 ◦
A1/13 ◦
A1/14 ◦ → X1/6
A1/15 ◦
A1/16 ◦ → X1/2
A1/21 ◦
A1/22 ◦
A1/23 ◦
A1/24 ◦ → X1/5
A1/25 ◦
A1/26 ◦ → X1/1
 IF2/ETH

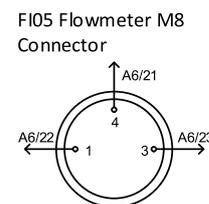
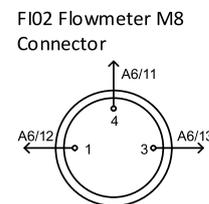
A2
A2/11 ◦ → TI02+
A2/12 ◦ → TI02+
A2/13 ◦ → TI02-
A2/14 ◦ → TI02-
A1/15 ◦ → TI04+
A2/16 ◦ → TI04+
A2/17 ◦ → TI04-
A2/18 ◦ → TI04-
A2/21 ◦ → TI03+
A2/22 ◦ → TI03+
A2/23 ◦ → TI03-
A2/24 ◦ → TI03-
A2/25 ◦ → TI05+
A2/26 ◦ → TI05+
A2/27 ◦ → TI05-
A2/28 ◦ → TI05-

A3
A3/11 ◦ → TI08+
A3/12 ◦ → TI08+
A3/13 ◦ → TI08-
A3/14 ◦ → TI08-
A3/15 ◦ → TI12+
A3/16 ◦ → TI12+
A3/17 ◦ → TI12-
A3/18 ◦ → TI12-
A3/21 ◦ → TI11+
A3/22 ◦ → TI11+
A3/23 ◦ → TI11-
A3/24 ◦ → TI11-
A3/25 ◦ → TI13+
A3/26 ◦ → TI13+
A3/27 ◦ → TI13-
A3/28 ◦ → TI13-

A4
A4/11 ◦ → TI14+
A4/12 ◦ → TI14+
A4/13 ◦ → TI14-
A4/14 ◦ → TI14-
A4/15 ◦ → TI16+
A4/16 ◦ → TI16+
A4/17 ◦ → TI16-
A4/18 ◦ → TI16-
A4/21 ◦ → TI15+
A4/22 ◦ → TI15+
A4/23 ◦ → TI15-
A4/24 ◦ → TI15-
A4/25 ◦ → TI17+
A4/26 ◦ → TI17+
A4/27 ◦ → TI17-
A4/28 ◦ → TI17-

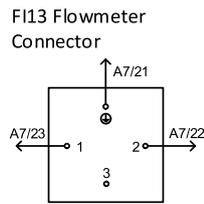
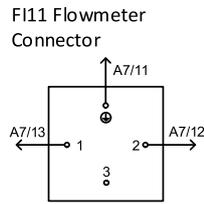
A5
A5/11 ◦ → TI18+
A5/12 ◦ → TI18+
A5/13 ◦ → TI18-
A5/14 ◦ → TI18-
A5/15 ◦
A5/16 ◦
A5/17 ◦
A5/18 ◦
A5/21 ◦
A5/22 ◦
A5/23 ◦
A5/24 ◦
A5/25 ◦
A5/26 ◦
A5/27 ◦
A5/28 ◦

A6
A6/11 ◦ → FI02/4/sw
A6/12 ◦ → FI02/1/br
A6/13 ◦ → FI02/3/bl
A6/14 ◦
A6/15 ◦
A6/16 ◦
A6/21 ◦ → FI05/4/sw
A6/22 ◦ → FI05/1/br
A6/23 ◦ → FI05/3/bl
A6/24 ◦
A6/25 ◦
A6/26 ◦

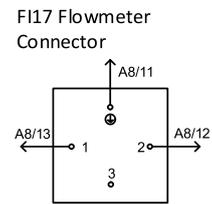


	TITEL	BESCHREIBUNG	DATEINAME	
	STAND		ERSTELLT VON	SEITE
	Absorptionskältemaschine	Elektrischer Schaltplan der Absorptionskältemaschine	Schaltschrank / B&R SPS	
	04.04.2018		Valentin Ernst	2 OF 3

A7	
A7/11	→ F111/⊕Pin/3
A7/12	→ F111/Pin2/1
A7/13	→ F111/Pin1/2
A7/14	◦
A7/15	◦
A7/16	◦
A7/21	→ F113/⊕Pin/3
A7/22	→ F113/Pin2/1
A7/23	→ F113/Pin1/2
A7/24	◦
A7/25	◦
A7/26	◦

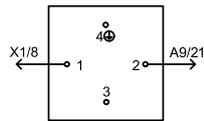


A8	
A8/11	→ F111/⊕Pin/3
A8/12	→ F111/Pin2/1
A8/13	→ F111/Pin1/2
A8/14	◦
A8/15	◦
A8/16	◦
A8/21	◦
A8/22	◦
A8/23	◦
A8/24	◦
A8/25	◦
A8/26	◦

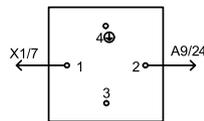


A9	
A9/11	◦
A9/12	◦
A9/13	◦
A9/14	◦
A9/15	◦
A9/16	◦
A9/21	→ PHD/2/2
A9/22	◦
A9/23	→ X1/3
A9/24	→ PND/2/2
A9/25	◦
A9/26	→ X1/4

PHD Pressuretransmitter Connector



PND Pressuretransmitter Connector



A10	
A10/11	→ K1/A1
A10/12	◦
A10/13	→ K1/A2
A10/14	◦
A10/15	◦
A10/16	◦
A10/21	◦
A10/22	◦
A10/23	◦
A10/24	◦
A10/25	◦
A10/26	◦

12.3 Protokoll Dichtheitsprüfung Gesamtanlage

Das Protokoll zur Dichtheitsprüfung der Gesamtanlage stellt eine Liste über alle zu prüfende Stellen dar. Es ist eingeteilt in Schweißnähte, Verschraubungen und Sonstiges. Die Richtungsbezeichnungen beziehen sich auf eine Ansicht von der Vorderseite aus.

<i>Stelle</i>	<i>Dichtheit gegeben</i>
<i>Schweißnähte und Lötstellen</i>	
<i>Schweißnaht Schauglas Generator-/Kondensatorbehälter oben</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Schauglas Generator-/Kondensatorbehälter vorne</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Schauglas Generator-/Kondensatorbehälter hinten</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Schauglas Generator-/Kondensatorbehälter seitlich</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Schauglas Absorberbehälter hinten</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Schauglas Verdampferbehälter vorne</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Schauglas Verdampferbehälter hinten</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Schauglas Absorberflansch</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Schauglas Verdampferflansch</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht M6 Schraube Kondensatwanne</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Stütze Generator links</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Stütze Generator rechts</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Kondensatwannenstütze vorne</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Kondensatwannenstütze hinten</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Generator Kältemittelleitung</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Rohrleitung Generator Kältemittelleitung</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Rohrleitung Temperaturwechsler - Generator</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Rohrleitung Entnahme Generator</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Rohrleitung Generator - Temperaturwechsler</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Generatorflansch</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Absorberflansch</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Verdampferflansch</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht M6 Schraube Absorberaufgabewanne vorne</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht M6 Schraube Absorberaufgabewanne hinten</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Stütze Absorber</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Stütze Verdampfer</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Rohrleitung Temperaturwechsler Absorber</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Rohrleitung Kristallisationsvorbeugung</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Rohrleitung Entnahme Absorber</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Rohrleitung Absorber - Lösungspumpe</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Rohrleitung Verdampfer Kältemittelleitung</i>	<i>ja</i>
<i>Schweißnaht Rohrleitung Verdampfer - Verdampferpumpe</i>	<i>ja</i>
<i>Lötstelle Temperaturwechsler arme Lösung Eintritt</i>	<i>ja</i>
<i>Lötstelle Temperaturwechsler arme Lösung Austritt</i>	<i>ja</i>
<i>Lötstelle Temperaturwechsler reiche Lösung Eintritt</i>	<i>ja</i>
<i>Lötstelle Temperaturwechsler reiche Lösung Austritt</i>	<i>ja</i>

<i>Lötstelle Lösungspumpe Eintritt</i>	<i>ja</i>
<i>Lötstelle Lösungspumpe Austritt</i>	<i>ja</i>
<i>Lötstelle Verdampferpumpe Eintritt</i>	<i>ja</i>
<i>Lötstelle Verdampferpumpe Austritt</i>	<i>ja</i>
<i>Lötstelle Verdampferpumpe Austritt T-Stück</i>	<i>ja</i>
<i>Lötstelle Aufweitung Verdampferberieselung</i>	<i>ja</i>

Verschraubungen

<i>Flansch Generator-/Kondensatorbehälter</i>	<i>teilweise</i>
<i>Flansch Absorber</i>	<i>teilweise</i>
<i>Flansch Verdampfer</i>	<i>teilweise</i>
<i>Verschraubung Temperatursensor TI 08</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubung Temperatursensor TI 03</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubung Temperatursensor TI 04</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubung Temperatursensor TI 02</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubung Temperatursensor TI 05</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Durchflusssensor FI 05</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Durchflusssensor FI 02</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubung Rohranschluss Generator Kältemittelleitung</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubung Rohranschluss Temperaturwechsler - Generator</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubung Rohranschluss Generator - Temperaturwechsler</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubung Rohranschluss Temperaturwechsler Absorber</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubung Rohranschluss Absorber - Lösungspumpe</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubung Rohranschluss Verdampfer - Verdampferpumpe</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Ventil V 001</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Ventil V 002</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Ventil V 003</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Ventil V 004</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Ventil V 005</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Ventil V 006</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Temperaturwechsler arme Lösung Eintritt</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Temperaturwechsler arme Lösung Austritt</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Temperaturwechsler reiche Lösung Eintritt</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Temperaturwechsler reiche Lösung Austritt</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Lösungspumpe Eintritt</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Lösungspumpe Austritt</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Verdampferpumpe Eintritt</i>	<i>ja</i>
<i>Verschraubungen Verdampferpumpe Austritt</i>	<i>ja</i>

Sonstiges

<i>Generator Wärmetauscher</i>	<i>ja</i>
<i>Kondensator Wärmetauscher</i>	<i>ja</i>
<i>Absorber Wärmetauscher</i>	<i>ja</i>
<i>Verdampfer Wärmetauscher</i>	<i>ja</i>
<i>Schauglas Generator-/Kondensatorbehälter oben</i>	<i>ja</i>
<i>Schauglas Generator-/Kondensatorbehälter vorne</i>	<i>ja</i>

<i>Schauglas Generator-/Kondensatorbehälter hinten</i>	<i>ja</i>
<i>Schauglas Generator-/Kondensatorbehälter seitlich</i>	<i>ja</i>
<i>Schauglas Absorberbehälter hinten</i>	<i>ja</i>
<i>Schauglas Verdampferbehälter vorne</i>	<i>ja</i>
<i>Schauglas Verdampferbehälter hinten</i>	<i>ja</i>
<i>Schauglas Absorberflansch</i>	<i>ja</i>
<i>Schauglas Verdampferflansch</i>	<i>ja</i>
<i>Drucksensor Generator-/Kondensatorbehälter</i>	<i>ja</i>
<i>Drucksensor Absorber-/Verdampferbehälter</i>	<i>ja</i>
<i>Schrader Ventil Generator-/Kondensatorbehälter</i>	<i>ja</i>
<i>Schrader Ventil Absorber-/Verdampferbehälter</i>	<i>ja</i>
<i>Einfüllschraube Generator-/Kondensatorbehälter</i>	<i>ja</i>
<i>Durchführung Kondensator Eintritt</i>	<i>ja</i>
<i>Durchführung Kondensator Austritt</i>	<i>ja</i>
<i>Durchführung Generator Eintritt</i>	<i>ja</i>
<i>Durchführung Generator Austritt</i>	<i>ja</i>
<i>Durchführung Absorber Eintritt</i>	<i>ja</i>
<i>Durchführung Absorber Austritt</i>	<i>ja</i>
<i>Durchführung Verdampfer Eintritt</i>	<i>ja</i>
<i>Durchführung Verdampfer Austritt</i>	<i>ja</i>
<i>Durchführung Verdampfer Berieselung</i>	<i>ja</i>

12.4 B&R Programmcode

Das gesamte Automation Studio Projekt wurde mit dieser Arbeit digital abgegeben. Die einzelnen Programme werden in unterschiedlichen Zykluszeiten aufgerufen. Auf eine verständliche Kommentierung wurde Wert gelegt.

12.4.1 Globale Variablen

Name	Typ	Beschreibung
gdiFlow2	UINT	Analog Input Volumenstrom FI 02
gdiFlow5	UINT	Analog Input Volumenstrom FI 05
gdiFlow11	UINT	Analog Input Volumenstrom FI 11
gdiFlow13	UINT	Analog Input Volumenstrom FI 13
gdiFlow17	UINT	Analog Input Volumenstrom FI 17
gdiFlowLiter2	REAL	Anzeigewert FI 02
gdiFlowLiter5	REAL	Anzeigewert FI 02
gdiFlowLiter11	REAL	Anzeigewert FI 11
gdiFlowLiter13	REAL	Anzeigewert FI 13
gdiFlowLiter17	REAL	Anzeigewert FI 17
gaiTemp2	DINT	Analog Input TI 02
gaiTempGrad2	REAL	Anzeigewert TI 02
gaiTemp3	DINT	Analog Input TI 03
gaiTempGrad3	REAL	Anzeigewert TI 03
gaiTemp4	DINT	Analog Input TI 04
gaiTempGrad4	REAL	Anzeigewert TI 04
gaiTemp5	DINT	Analog Input TI 05
gaiTempGrad5	REAL	Anzeigewert TI 05
gaiTemp8	DINT	Analog Input TI 08
gaiTempGrad8	REAL	Anzeigewert TI 08
gaiTemp11	DINT	Analog Input TI 11
gaiTempGrad11	REAL	Anzeigewert TI 11
gaiTemp12	DINT	Analog Input TI 12
gaiTempGrad12	REAL	Anzeigewert TI 12
gaiTemp13	DINT	Analog Input TI 13
gaiTempGrad13	REAL	Anzeigewert TI 13
gaiTemp14	DINT	Analog Input TI 14
gaiTempGrad14	REAL	Anzeigewert TI 14
gaiTemp15	DINT	Analog Input TI 15
gaiTempGrad15	REAL	Anzeigewert TI 15
gaiTemp16	DINT	Analog Input TI 16
gaiTempGrad16	REAL	Anzeigewert TI 16
gaiTemp17	DINT	Analog Input TI 17
gaiTempGrad17	REAL	Anzeigewert TI 17

gaiTemp18	DINT	Analog Input TI 18
gaiTempGrad18	REAL	Anzeigewert TI 18
gaiDruckPND	INT	Analog Input PI 01
gaiDruckKiloPascalPND	REAL	Anzeigewert PI 01
gaiDruckPHD	INT	Analog Input PI 02
gaiDruckKiloPascalPHD	REAL	Anzeigewert PI 02
gdoHeizungEin	BOOL	Heizung Ein/Aus
RegeltemperaturMin	REAL	Einschalttemperatur Heizung
RegeltemperaturMax	REAL	Abschalttemperatur Heizung
wechselFlow	BOOL	Statuswechsel Volumenstrommessung
differenzFlow2	UINT	Differenz zu vorherigem Zyklus FI 02
vorherFlow2	UINT	Speicherung Endwert Zyklus FI 02
differenzFlow5	UINT	Differenz zu vorherigem Zyklus FI 05
vorherFlow5	UINT	Speicherung Endwert Zyklus FI 05
differenzFlow11	UINT	Differenz zu vorherigem Zyklus FI 11
vorherFlow11	UINT	Speicherung Endwert Zyklus FI 11
differenzFlow13	UINT	Differenz zu vorherigem Zyklus FI 13
vorherFlow13	UINT	Speicherung Endwert Zyklus FI 13
differenzFlow17	UINT	Differenz zu vorherigem Zyklus FI 17
vorherFlow17	UINT	Speicherung Endwert Zyklus FI 17
cp_Wasser	REAL	spezifische Wärmekapazität Wasser
Dichte_Wasser_11	REAL	Dichte Wasser Zustandspunkt 11
Dichte_Wasser_13	REAL	Dichte Wasser Zustandspunkt 13
Dichte_Wasser_15	REAL	Dichte Wasser Zustandspunkt 15
Dichte_Wasser_17	REAL	Dichte Wasser Zustandspunkt 17
Q_Generator	REAL	Wärmestrom Generator
Q_Absorber	REAL	Wärmestrom Absorber
Q_Verdampfer	REAL	Wärmestrom Verdampfer
Q_Kondensator	REAL	Wärmestrom Kondensator
COP	REAL	Leistungszahl COP
Heizung_Schalter	BOOL	Heizung EIN/AUS in Visualisierung
Dichte_2	REAL	Dichte Lithiumbromidlösung Zustandspunkt 2
Dichte_4	REAL	Dichte Lithiumbromidlösung Zustandspunkt 4
Konzentration_2	REAL	Konzentration Lithiumbromidlösung Zustandspunkt 2
Konzentration_4	REAL	Konzentration Lithiumbromidlösung Zustandspunkt 4
Q_Temperaturwechsler_2	REAL	Wärmestrom Temperaturwechsler
Enthalpie_2	REAL	Enthalpie Lithiumbromidlösung Zustandspunkt 2
Enthalpie_3	REAL	Konzentration Lithiumbromidlösung Zustandspunkt 3
Koeffizient_A_2_3	REAL	Koeffizient Enthalpie Lithiumbromidlösung
Koeffizient_B_2_3	REAL	Koeffizient Enthalpie Lithiumbromidlösung
Koeffizient_C_2_3	REAL	Koeffizient Enthalpie Lithiumbromidlösung
a2	REAL	Koeffizient Konzentration Lithiumbromidlösung
a1	REAL	Koeffizient Konzentration Lithiumbromidlösung
M_H2O	REAL	molare Masse Wasser
M_LiBr	REAL	molare Masse Lithiumbromid

T_c	REAL	kritische Temperatur Wasser
Rho_c	REAL	kritische molare Dichte Wasser
Rho_strich2	REAL	molare Dichte von gesättigtem, flüssigem Wasser Zustandspunkt 2
Rho_strich4	REAL	molare Dichte von gesättigtem, flüssigem Wasser Zustandspunkt 4
alpha1	REAL	Koeffizient Rho_Strich
alpha2	REAL	Koeffizient Rho_Strich
alpha3	REAL	Koeffizient Rho_Strich
alpha4	REAL	Koeffizient Rho_Strich
alpha5	REAL	Koeffizient Rho_Strich
alpha6	REAL	Koeffizient Rho_Strich
Konzentration_4_molar	REAL	molare Konzentration Zustandspunkt 4
Konzentration_2_molar	REAL	molare Konzentration Zustandspunkt 2
beta1	REAL	Exponent Rho_Strich
beta2	REAL	Exponent Rho_Strich
beta3	REAL	Exponent Rho_Strich
beta4	REAL	Exponent Rho_Strich
beta5	REAL	Exponent Rho_Strich
beta6	REAL	Exponent Rho_Strich
Term_2_1	REAL	Term Gleichung Konzentration Zustandspunkt 2
Term_2_2	REAL	Term Gleichung Konzentration Zustandspunkt 2
Term_2_3	REAL	Term Gleichung Konzentration Zustandspunkt 2
Term_2_4	REAL	Term Gleichung Konzentration Zustandspunkt 2
Term_2_5	REAL	Term Gleichung Konzentration Zustandspunkt 2
Term_4_1	REAL	Term Gleichung Konzentration Zustandspunkt 4
Term_4_2	REAL	Term Gleichung Konzentration Zustandspunkt 4
Term_4_3	REAL	Term Gleichung Konzentration Zustandspunkt 4
Term_4_4	REAL	Term Gleichung Konzentration Zustandspunkt 4
Term_4_5	REAL	Term Gleichung Konzentration Zustandspunkt 4
Warnung_2	BOOL	Warnung Kristallisation Zustandspunkt 2
Warnung_4	BOOL	Warnung Kristallisation Zustandspunkt 4
LED_Colour_2	USINT	Farbe Warnung Kristallisation Zustandspunkt 2
LED_Colour_4	USINT	Farbe Warnung Kristallisation Zustandspunkt 4
Kristallisation1	STRING[80]	Text Kristallisationswarnung Visualisierung
Kristallisation2	STRING[80]	Text Kristallisationswarnung Visualisierung
Kristallisation3	STRING[80]	Text Kristallisationswarnung Visualisierung
Kristallisation4	STRING[80]	Text Kristallisationswarnung Visualisierung
gExperimentID	STRING[80]	Datafile
gDataFileStep	DataFileStep	Datafile
gLogSpeed	TIME	Datafile
AlarmActive	BOOL[0..0]	Datafile
WarningActive	BOOL[0..0]	Datafile
gStatus	USINT	Datafile
V001	REAL	Zustand Ventil V 001

V002	REAL	Zustand Ventil V 001
V003	REAL	Zustand Ventil V 003
V004	REAL	Zustand Ventil V 004
V009	REAL	Zustand Ventil V 009
V011	REAL	Zustand Ventil V 011
V012	REAL	Zustand Ventil V 012
V013	REAL	Zustand Ventil V 013
V014	REAL	Zustand Ventil V 014
V017	REAL	Zustand Ventil V 017

12.4.2 Temperatur- und Drucksensoren

```
//Umrechnung der Ausgabewerte der Temperatur- und Drucksensoren in reale Werte
//Cyclic [100ms]
```

```
PROGRAM _CYCLIC
```

```
//Umrechnung der Temperaturen in °C
gaiTempGrad2 := DINT_TO_REAL(gaiTemp2)/100;
gaiTempGrad3 := DINT_TO_REAL(gaiTemp3)/100;
gaiTempGrad4 := DINT_TO_REAL(gaiTemp4)/100;
gaiTempGrad5 := DINT_TO_REAL(gaiTemp5)/100;
gaiTempGrad8 := DINT_TO_REAL(gaiTemp8)/100;
gaiTempGrad11 := DINT_TO_REAL(gaiTemp11)/100;
gaiTempGrad12 := DINT_TO_REAL(gaiTemp12)/100;
gaiTempGrad13 := DINT_TO_REAL(gaiTemp13)/100;
gaiTempGrad14 := DINT_TO_REAL(gaiTemp14)/100;
gaiTempGrad15 := DINT_TO_REAL(gaiTemp15)/100;
gaiTempGrad16 := DINT_TO_REAL(gaiTemp16)/100;
gaiTempGrad17 := DINT_TO_REAL(gaiTemp17)/100;
gaiTempGrad18 := DINT_TO_REAL(gaiTemp18)/100;

//Umrechnung der Drücke in kPa
gaiDruckKiloPascalPHD := INT_TO_REAL(gaiDruckPHD)*250/32767*0.1;
gaiDruckKiloPascalPND := INT_TO_REAL(gaiDruckPND)*100/32767*0.1;
```

```
END_PROGRAM
```

12.4.3 Temperaturregelung der Heizung

```
//Zweipunktregelung der Temperatur der Heizung. Es erfolgt eine Abfrage
//ob die Heizung per Button in der Visualisierung eingeschalten ist.
//Ist dies der Fall so regelt das Programm zwischen Einschalt- und
//Abschalttemperatur, welche beide durch Eingabe in der Visualisierung
//veränderbar sind.
//Cyclic [100ms]
```

```
//Standardwerte für Heizungsschalter, Einschalt- und Abschalttemperatur

PROGRAM _INIT

    Heizung_Schalter := FALSE;           //Heizung bei Einschalten immer aus
    RegeltemperaturMin := 98;           //Einschalttemperatur Heizung
    RegeltemperaturMax := 102;         //Abschalttemperatur Heizung

    //Startwerte Ventile Umdrehungen offen (0=geschlossen):
    V001:= 0;
    V002:= 0;
    V003:= 0;
    V004:= 0;
    V009:= 0;
    V011:= 0;
    V012:= 0;
    V013:= 0;
    V014:= 0;
    V017:= 0;

END_PROGRAM

PROGRAM _CYCLIC

IF Heizung_Schalter = TRUE THEN
    IF gaiTempGrad11 < RegeltemperaturMin THEN
        gdoHeizungEin := TRUE;
    ELSIF gaiTempGrad11 > RegeltemperaturMax THEN
        gdoHeizungEin := FALSE;
    END_IF
    ELSIF Heizung_Schalter = FALSE THEN
        gdoHeizungEin := FALSE;
    END_IF
END_IF

END_PROGRAM
```

12.4.4 Volumenstromsensoren

```
//Die Volumenstrommessung erfolgt mittels Differenzmessung aus 2 Zyklen.
//Die Messung erfolgt alle 3 Sekunden und wird auf l/min hochgerechnet.
//Da der Zähler nach nicht zurückgesetzt wird, wird mittels Differenzen
//gerechnet. Alle 1,5 Sekunden wird das Programm aufgerufen und je nach
//Zustand der Variable wechselFlow (True/False) wird entweder der Volumenstrom
//berechnet (True) oder nur die Variable für den nächsten Zyklus auf False gesetzt.
//Cyclic 1500ms

//Startwerte für die Volumenstrommessung
```

```
PROGRAM _INIT
```

```
wechselFlow := TRUE;  
vorherFlow2 := 0;  
vorherFlow5 := 0;  
vorherFlow11 := 0;  
vorherFlow13 := 0;  
vorherFlow17 := 0;
```

```
END_PROGRAM
```

```
PROGRAM _CYCLIC
```

```
IF wechselFlow = TRUE THEN
```

```
    //Bildung der Differenz mit Endwert aus dem vorherigen Zyklus
```

```
differenzFlow2 := gdiFlow2-vorherFlow2;  
differenzFlow5 := gdiFlow5-vorherFlow5;  
differenzFlow11 := gdiFlow11-vorherFlow11;  
differenzFlow13 := gdiFlow13-vorherFlow13;  
differenzFlow17 := gdiFlow17-vorherFlow17;
```

```
    //Setzen des Endwerts des aktuellen Zyklus für Berechnung in nächstem Zyklus
```

```
vorherFlow2 := gdiFlow2;  
vorherFlow5 := gdiFlow5;  
vorherFlow11 := gdiFlow11;  
vorherFlow13 := gdiFlow13;  
vorherFlow17 := gdiFlow17;
```

```
    //Berechnung Volumenstrom FI 02
```

```
    gdiFlowLiter2 :=
```

```
    UINT_TO_REAL(differenzFlow2)*20*0.000199417560677136+0.0293668961922508;
```

```
    // *20: Umrechnung von 3 Sekunden auf 1 Minute, einsetzen in Ausgleichsgerade yFI02
```

```
    IF gdiFlowLiter2 = 0.0293668961922508 THEN
```

```
        gdiFlowLiter2 := 0;
```

```
    END_IF
```

```
    //Berechnung Volumenstrom FI 05
```

```
    gdiFlowLiter5 :=
```

```
    UINT_TO_REAL(differenzFlow5)*20*0.000282947422381376+0.0852313328313332;
```

```
    // *20: Umrechnung von 3 Sekunden auf 1 Minute, einsetzen in Ausgleichsgerade yFI05
```

```
    IF gdiFlowLiter5 = 0.0852313328313332 THEN
```

```
        gdiFlowLiter5 := 0;
```

```
    END_IF
```

```
    //Berechnung Volumenströme FI 11, FI 13 und FI 17:
```

```
    gdiFlowLiter11 := UINT_TO_REAL(differenzFlow11)*1/450*20;
```

```
    gdiFlowLiter13 := UINT_TO_REAL(differenzFlow13)*1/450*20;
```

```
    gdiFlowLiter17 := UINT_TO_REAL(differenzFlow17)*1/450*20;
```

```

//Setzen der wechselFlow Variable auf False für nächsten Zyklus
wechselFlow := FALSE;

ELSIF wechselFlow = FALSE THEN
    wechselFlow := TRUE;

END_IF

END_PROGRAM

```

12.4.5 Wärmeströme der wasserführenden Kreisläufe

```

//Wärmeströme der wasserführenden Kreisläufe in Generator, Absorber, Kondensator und
Verdampfer
//sowie COP.
//Die spezifische Wärmekapazität von Wasser wurde konstant mit 4.182 kJ/kgK angenommen.
//Die Berechnung der Dichte des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur erfolgt mittels
//Gleichung von George S. Kell für luftfreies Wasser bei Atmosphärendruck, "Density, Thermal
Expansivity,
// and Compressibility OF Liquid Water from 0° TO 150°C: Correlations AND Tables FOR
Atmospheric Pressure
//and Saturation Reviewed and Expressed on 1968 Temperature Scale
//Cyclic 1000ms

//Startwerte für Wärmestrom Wasser Berechnung

PROGRAM _INIT

    cp_Wasser := 4.182;           //spezifische Wärmekapazität Wasser in kJ/kgK

END_PROGRAM

PROGRAM _CYCLIC

    //Dichte und Wärmestrom in Generator:
    Dichte_Wasser_11 := (999.83952+16.945176*gaiTempGrad11+(-7.9870401*10**(-
3))*gaiTempGrad11**2+(-4.6170461*10**(-5))*gaiTempGrad11**3+(1.0556302*10**(-
7))*gaiTempGrad11**4+(-2.8054253*10**(-10))*gaiTempGrad11**5)/(1+0.01687985*gaiTempGrad11);
    Q_Generator := Dichte_Wasser_11*gdiFlowLiter11*cp_Wasser*(gaiTempGrad11-
gaiTempGrad12)*1/60000;

    //Dichte und Wärmestrom in Absorber:
    Dichte_Wasser_13 := (999.83952+16.945176*gaiTempGrad13+(-7.9870401*10**(-
3))*gaiTempGrad13**2+(-4.6170461*10**(-5))*gaiTempGrad13**3+(1.0556302*10**(-
7))*gaiTempGrad13**4+(-2.8054253*10**(-10))*gaiTempGrad13**5)/(1+0.01687985*gaiTempGrad13);
    Q_Absorber := Dichte_Wasser_13*gdiFlowLiter13*cp_Wasser*(gaiTempGrad13-
gaiTempGrad14)*1/60000;

```

```

//Dichte und Wärmestrom in Kondensator:
Dichte_Wasser_15 := (999.83952+16.945176*gaiTempGrad15+(-7.9870401*10**(-
3))*gaiTempGrad15**2+(-4.6170461*10**(-5))*gaiTempGrad15**3+(1.0556302*10**(-
7))*gaiTempGrad15**4+(-2.8054253*10**(-10))*gaiTempGrad15**5)/(1+0.01687985*gaiTempGrad15);
Q_Kondensator := Dichte_Wasser_15*gdiFlowLiter13*cp_Wasser*(gaiTempGrad15-
gaiTempGrad16)*1/60000;

////Dichte und Wärmestrom in Verdampfer:
Dichte_Wasser_17 := (999.83952+16.945176*gaiTempGrad17+(-7.9870401*10**(-
3))*gaiTempGrad17**2+(-4.6170461*10**(-5))*gaiTempGrad17**3+(1.0556302*10**(-
7))*gaiTempGrad17**4+(-2.8054253*10**(-10))*gaiTempGrad17**5)/(1+0.01687985*gaiTempGrad17);
Q_Verdampfer := Dichte_Wasser_17*gdiFlowLiter17*cp_Wasser*(gaiTempGrad17-
gaiTempGrad18)*1/60000;

//Leistungszahl
COP := Q_Verdampfer/Q_Generator;

END_PROGRAM

```

12.4.6 Wärmestrom in Lithiumbromidlösung und Konzentrationswarnung

```

//Wärmestrom in Temperaturwechsler, Lithiumbromidlösung
//Konzentrationswarnung bei über 65% Lithiumbromid
//Die Berechnung der Enthalpie erfolgt aufgrund der Funktionen aus "ASHRAE Handbook
Fundamentals 2005,
//S. 20.70, Figure 34". Diese Quelle arbeitet mit der Temperatureinheit °C sowie mit der
//Energieeinheit kJ und Masseneinheit kg.
//Die Berechnung der Konzentration erfolgt aufgrund der Funktionen aus "A computationally
effective
//formulation OF the thermodynamic properties OF LiBr-H2O solutions from 273 TO 500 K over
full composition range",
//worauf sich auch die Bibliothek "LiBrH2O" der F-Chart Software EES bezieht.
//Cyclic 1000ms

//Startwerte für Berechnung Wärmestrom und Konzentration Lithiumbromidlösung

PROGRAM _INIT

//Standardwerte für die Dichte wurden der EES Auslegungsberechnung entnommen:
Dichte_2 := 1589; //g/l
Dichte_4 := 1662; //g/l

//Eingabe der Koeffizienten der Konzentrationsberechnung (Dichte muss mittels
Entnahmebecher gemessen werden!):
a1 := 1.746;
a2 := 4.709;
M_H2O := 0.018015268;

```



```

Rho_strich4*M_LiBr+2*Rho_strich4*M_H2O)**2;
    Term_4_2 := (-a1*Rho_c*M_LiBr+a1*Rho_c*M_H2O-
((gaiTempGrad4+273.15)/T_c)**(6)*a2*Rho_c*M_LiBr+((gaiTempGrad4+273.15)/T_c)**(6)*a2*Rho_c*M_H
20+Rho_strich4*M_LiBr-Rho_strich4*M_H2O)*(-4)*((Dichte_4/1000)-Rho_strich4*M_H2O);
    Term_4_3 := SQRT(Term_4_1+Term_4_2);
    Term_4_4 := (-a1)*Rho_c*M_H2O-((gaiTempGrad4+273.15)/T_c)**(6)*a2*Rho_c*M_H2O-
Rho_strich4*M_LiBr+2*Rho_strich4*M_H2O;
    Term_4_5 := 2*(M_LiBr-M_H2O)*(((gaiTempGrad4+273.15)/T_c)**(6)*a2*Rho_c+a1*Rho_c-
Rho_strich4);

//molare Konzentration:
Konzentration_2_molar := (Term_2_3+Term_2_4)/(Term_2_5);
Konzentration_4_molar := (Term_4_3+Term_4_4)/(Term_4_5);

//Massenanteil (Konzentration):
Konzentration_2 := ((Konzentration_2_molar*M_LiBr)/(Konzentration_2_molar*M_LiBr+(1-
Konzentration_2_molar)*M_H2O))*100;
Konzentration_4 := ((Konzentration_4_molar*M_LiBr)/(Konzentration_4_molar*M_LiBr+(1-
Konzentration_4_molar)*M_H2O))*100;

//Warnung falls Konzentration über 65% ist:
IF Konzentration_4 >= 65 THEN
    Warnung_4 := TRUE;
    Kristallisation1 := 'Kristallisationsvorbeugung';
    Kristallisation2 := '(V004) betätigen!';
ELSIF Konzentration_4 < 65 THEN
    Warnung_4 := FALSE;
    LED_Colour_4 := FALSE;
    Kristallisation1 := '';
    Kristallisation2 := '';
END_IF

IF Konzentration_2 >= 65 THEN
    Warnung_2 := TRUE;
    Kristallisation3 := 'Kristallisationsvorbeugung';
    Kristallisation4 := '(V004) betätigen!';
ELSIF Konzentration_2 < 65 THEN
    Warnung_2 := FALSE;
    LED_Colour_2 := FALSE;
    Kristallisation3 := '';
    Kristallisation4 := '';
END_IF

//Enthalpieberechnung für Zustandspunkte 2 und 3:
Koeffizient_A_2_3 := -2024.33+163.309*(Konzentration_2)-
4.88161*(Konzentration_2)**2+0.06302948*(Konzentration_2)**3-
(0.0002913705)*(Konzentration_2)**4;
Koeffizient_B_2_3 := 18.2829-
1.1691757*(Konzentration_2)+(0.03248041)*(Konzentration_2)**2-
(0.0004034184)*(Konzentration_2)**3+(0.0000018520569)*((Konzentration_2))**4;

```

```

    Koeffizient_C_2_3 := -0.037008214+0.0028877666*(Konzentration_2)-
(0.000081313015)*(Konzentration_2)**2+(0.00000099116628)*(Konzentration_2)**3-
(0.0000000044441207)*(Konzentration_2)**4;

    Enthalpie_2 :=
(Koeffizient_A_2_3+Koeffizient_B_2_3*(gaiTempGrad2)+Koeffizient_C_2_3*(gaiTempGrad2)**2);
    Enthalpie_3 :=
(Koeffizient_A_2_3+Koeffizient_B_2_3*(gaiTempGrad3)+Koeffizient_C_2_3*(gaiTempGrad3)**2);

    //Wärmestromberechnung im Temperaturwechsler:
    Q_Temperaturwechsler_2 := gdiFlowLiter2*1/60000*Dichte_2*(Enthalpie_3-Enthalpie_2);

END_PROGRAM

```

12.4.7 Datafile

```

(*****
* COPYRIGHT -- TU Wien, IET
*****
* Program: DataFile
* File: Main.st
* Author: fbirkelb
* Date: 31. October 2017
*****
* Stores the experiment data in a csv file. The time between two write
* operations is controlled with gLogSpeed.
*
* The variables that are recorded are defined in the marked sections in
* the Create and the Recording state. The number of columns defined in
* the Create state has to match the recorded variables in the Recording
* state.
*
* Global variables: gDataFileStep, gLogSpeed, gExperimentID, AlarmActive, WarningActive
*
* The program has six states:
* + Init: Establishes the device link.
* + Create: Creates experimentID_data.csv, where the data will be stored
* + Idle
* + StartRecording: Open file and go to the Recording-State.
* + Recording: Writes a line every gLogSpeed ms.
* + StopRecording: Closes the file and returns to the Idle state.
*
* IF there are any errors the error ERRORNUMBER is triggered.
* ERRORNUMBER can be set in Variables.var
*
* The following has to be added to Global.typ in text-mode
* DataFileStep : ( Init, Create, Idle, StartRecording, Recording, StopRecording);
*

```

```
*****)

PROGRAM _INIT
  Step:= 0;
  gDataFileStep:= Init;
  strDevice:= 'LOCAL_DEVICE';
  strDevice:= 'LOCAL_DEVICE';
  strParameter:= '/DEVICE=C: ';
END_PROGRAM

PROGRAM _CYCLIC
  CASE gDataFileStep OF
    Init:
      devlink.enable := 1;
      devlink.pDevice := ADR(strDevice);
      devlink.pParam := ADR(strParameter);
      devlink();

      CASE devlink.status OF
        ERR_FUB_BUSY:
          // Wait
        ERR_OK, fiERR_DEVICE_ALREADY_EXIST:
          gDataFileStep:= Idle;
        ELSE
          //ERROR!
          AlarmActive[ERRORNUMBER]:= TRUE;
      END_CASE;
    Create:
      CASE Step OF
        0: // Delete old file if it exists
          strFile:= gExperimentID;
          brsstrcat(ADR(strFile), ADR('_data.csv'));

          fdelete.enable:= 1;
          fdelete.pDevice:= ADR(strDevice);
          fdelete.pName:= ADR(strFile);
          fdelete();

          CASE fdelete.status OF
            ERR_FUB_BUSY:
              // Wait
            fiERR_FILE_NOT_FOUND, ERR_OK:
              // Create new file
              Step:= 1;
            ELSE
              //ERROR!
              AlarmActive[ERRORNUMBER]:= TRUE;
              gDataFileStep:= Idle;
          END_CASE;
        1: // Create file
```

```

fcreate.enable:= 1;
fcreate.pDevice:= ADR(strDevice);
fcreate.pFile:= ADR(strFile);

fcreate();

CASE fcreate.status OF
    ERR_FUB_BUSY:
        // Still busy
    ERR_OK:
        fid:= fcreate.ident;
        Step:= 2;
    ELSE
        //ERROR!
        AlarmActive[ERRORNUMBER]:= TRUE;
        gDataFileStep:= Idle;
END_CASE;
2: // Assemble header

// The first line of the file contains the column names,
// the second the column unit.
// The names are stored in strWrite, the units in str.
strWrite:= '';
str:= '';
AddEntry.pNames:= ADR(strWrite);
AddEntry.pUnits:= ADR(str);
AddEntry.pSep:= ADR(sep);

// ++++++
// ++++++ Define column headers here ++++++
// ++++++
AddEntry(name:= 'Timestamp [s]');
AddEntry(name:= 'T_2 [°C]');
AddEntry(name:= 'T_3 [°C]');
AddEntry(name:= 'T_4 [°C]');
AddEntry(name:= 'T_5 [°C]');
AddEntry(name:= 'T_8 [°C]');
AddEntry(name:= 'T_11 [°C]');
AddEntry(name:= 'T_12 [°C]');
AddEntry(name:= 'T_13 [°C]');
AddEntry(name:= 'T_14 [°C]');
AddEntry(name:= 'T_15 [°C]');
AddEntry(name:= 'T_16 [°C]');
AddEntry(name:= 'T_17 [°C]');
AddEntry(name:= 'T_18 [°C]');
AddEntry(name:= 'PHD [kPa]');
AddEntry(name:= 'PND [kPa]');
AddEntry(name:= 'V_2 [l/min]');
AddEntry(name:= 'V_5 [l/min]');
AddEntry(name:= 'V_11 [l/min]');

```

```

AddEntry(name:= 'V_13 [l/min]');
AddEntry(name:= 'V_17 [l/min]');
AddEntry(name:= 'Q_Kondensator [kW]');
AddEntry(name:= 'Q_Generator [kW]');
AddEntry(name:= 'Q_Temperaturwechsler [kW]');
AddEntry(name:= 'Q_Verdampfer [kW]');
AddEntry(name:= 'Q_Absorber [kW]');
AddEntry(name:= 'COP [%/100]');
AddEntry(name:= 'Dichte_Wasser_11 [g/l]');
AddEntry(name:= 'Dichte_Wasser_13 [g/l]');
AddEntry(name:= 'Dichte_Wasser_15 [g/l]');
AddEntry(name:= 'Dichte_Wasser_17 [g/l]');
AddEntry(name:= 'Dichte_4 [g/l]');
AddEntry(name:= 'Dichte_2 [g/l]');
AddEntry(name:= 'Konzentration_4 [%]');
AddEntry(name:= 'Konzentration_2 [%]');
AddEntry(name:= 'Abschalttemperatur_Heizung [°C]');
AddEntry(name:= 'Einschalttemperatur_Heizung [°C]');
AddEntry(name:= 'Status_Heizung [Ein=1]');
AddEntry(name:= 'Status_V001 [0=geschlossen]');
AddEntry(name:= 'Status_V002 [0=geschlossen]');
AddEntry(name:= 'Status_V003 [0=geschlossen]');
AddEntry(name:= 'Status_V004 [0=geschlossen]');
AddEntry(name:= 'Status_V009 [0=geschlossen]');
AddEntry(name:= 'Status_V011 [0=geschlossen]');
AddEntry(name:= 'Status_V012 [0=geschlossen]');
AddEntry(name:= 'Status_V013 [0=geschlossen]');
AddEntry(name:= 'Status_V014 [0=geschlossen]');
AddEntry(name:= 'Status_V017 [0=geschlossen]');

// ++++++
// ++++++

// Join the two lines. strWrite will be written into the file
brsstrcat(ADR(strWrite), ADR(newline));
brsstrcat(ADR(strWrite), ADR(str));
brsstrcat(ADR(strWrite), ADR(newline));

Step:= 3;
3: // Write header
fwrite.enable:= 1;
fwrite.ident:= fid;
fwrite.offset:= 0;
fwrite.len := brsstrlen(ADR(strWrite)); // Assuming 1 byte per character
fwrite.pSrc:= ADR(strWrite);

fwrite();

CASE fwrite.status OF
    ERR_FUB_BUSY:
        // Still busy

```

```

ERR_OK:
    Step:= 4;
ELSE
    //ERROR!
    AlarmActive[ERRORNUMBER]:= TRUE;
    gDataFileStep:= Idle;
END_CASE;
4: // Close file
    Step:= 0;
    T0:= clock_ms();
    // Use the StopRecording step to close the file
    gDataFileStep:= StopRecording;
END_CASE;

Idle:
    // Wait
    Step:= 0;

StartRecording:
    // Open file
    fopen.enable:= 1;
    fopen.pDevice:= ADR(strDevice);
    fopen.pFile:= ADR(strFile);
    fopen.mode:= fiWRITE_ONLY;
    fopen();

CASE fopen.status OF
ERR_FUB_BUSY:
    // Still busy
fiERR_FILE_NOT_FOUND:
    //ERROR!
    AlarmActive[ERRORNUMBER]:= TRUE;
    gDataFileStep:= Idle;
ERR_OK:
    // Start recording
    fid:= fopen.ident;
    offset:= fopen.filelen;
    strWrite:= '';
    nextRecordTime:= clock_ms(); // + Cycle time
    gDataFileStep:= Recording;
    fwrite.enable:=0;
ELSE
    //ERROR!
    AlarmActive[ERRORNUMBER]:= TRUE;
    gDataFileStep:= Idle;
END_CASE;

Recording:
    now:= clock_ms();
    IF now >= nextRecordTime THEN
        // Update fwrite.status

```

```

    IF fwrite.enable = 1 THEN
        fwrite();
    END_IF;

    CASE fwrite.status OF
        ERR_FUB_BUSY:
            // Writing takes longer than the specified record time!
            // Skip one datapoint.
            nextRecordTime:= nextRecordTime + gLogSpeed; // TODO: Account for
possible overflow!

            WarningActive[WARNINGNUMBER]:= TRUE;
        ERR_FUB_ENABLE_FALSE, ERR_OK:
            // Assemble line

            AddValue.pWrite:= ADR(strWrite);
            AddValue.pSep:= ADR(sep);

            strWrite:= '';

// ++++++
// ++++      Define recorded values here      ++++++
// ++++++
            AddValue(val:= UDINT_TO_REAL(TIME_TO_UDINT(now-T0))/1000.0);
            AddValue(val:= gaiTempGrad2);
            AddValue(val:= gaiTempGrad3);
            AddValue(val:= gaiTempGrad4);
            AddValue(val:= gaiTempGrad5);
            AddValue(val:= gaiTempGrad8);
            AddValue(val:= gaiTempGrad11);
            AddValue(val:= gaiTempGrad12);
            AddValue(val:= gaiTempGrad13);
            AddValue(val:= gaiTempGrad14);
            AddValue(val:= gaiTempGrad15);
            AddValue(val:= gaiTempGrad16);
            AddValue(val:= gaiTempGrad17);
            AddValue(val:= gaiTempGrad18);
            AddValue(val:= gaiDruckKiloPascalPHD);
            AddValue(val:= gaiDruckKiloPascalPND);
            AddValue(val:= gdiFlowLiter2);
            AddValue(val:= gdiFlowLiter5);
            AddValue(val:= gdiFlowLiter11);
            AddValue(val:= gdiFlowLiter13);
            AddValue(val:= gdiFlowLiter17);
            AddValue(val:= Q_Kondensator);
            AddValue(val:= Q_Generator);
            AddValue(val:= Q_Temperaturwechsler_2);
            AddValue(val:= Q_Verdampfer);
            AddValue(val:= Q_Absorber);
            AddValue(val:= COP);
            AddValue(val:= Dichte_Wasser_11);

```

```

        AddValue(val:= Dichte_Wasser_13);
        AddValue(val:= Dichte_Wasser_15);
        AddValue(val:= Dichte_Wasser_17);
        AddValue(val:= Dichte_4);
        AddValue(val:= Dichte_2);
        AddValue(val:= Konzentration_4);
        AddValue(val:= Konzentration_2);
        AddValue(val:= RegeltemperaturMax);
        AddValue(val:= RegeltemperaturMin);
        AddValue(val:= gdoHeizungEin);
        AddValue(val:= V001);
        AddValue(val:= V002);
        AddValue(val:= V003);
        AddValue(val:= V004);
        AddValue(val:= V009);
        AddValue(val:= V011);
        AddValue(val:= V012);
        AddValue(val:= V013);
        AddValue(val:= V014);
        AddValue(val:= V017);
// ++++++

        brsstrcat(ADR(strWrite), ADR(newline));

        // Write next line into file
        fwrite.enable:= 1;
        fwrite.ident:= fid;
        fwrite.offset:= offset;
        fwrite.len := brsstrlen(ADR(strWrite)); // Assuming 1 byte per
character

        fwrite.pSrc:= ADR(strWrite);

        fwrite();

        offset:= offset+fwrite.len;
        nextRecordTime:= nextRecordTime + gLogSpeed; // TODO: Account for
possible overflow!

        IF nextRecordTime > now THEN
            WarningActive[WARNINGNUMBER]:= FALSE;
        ELSE
            // gLogSpeed might be lower than the cycle time of this program!
            // Skip enough datapoints that nextRecordTime > now.
            nextRecordTime:= nextRecordTime + UDINT_TO_TIME(
((TIME_TO_UDINT(now-nextRecordTime) MOD TIME_TO_UDINT(gLogSpeed))+1)*TIME_TO_UDINT(gLogSpeed)
);

            WarningActive[WARNINGNUMBER]:= TRUE;
        END_IF;
    ELSE
        //ERROR!

```

```

        AlarmActive[ERRORNUMBER]:= TRUE;
        gDataFileStep:= Idle;
    END_CASE;
END_IF; // IF now >= nextRecordTime THEN

StopRecording: // Close file once the write operation is finished
    CASE fwrite.status OF
        ERR_OK:
            // Close file
            fclose.enable:= 1;
            fclose.ident:= fid;
            fclose();

            CASE fclose.status OF
                ERR_FUB_BUSY:
                    // Still busy
                ERR_OK:
                    // Return to idle state
                    gDataFileStep:= Idle;
            ELSE
                //ERROR!
                AlarmActive[ERRORNUMBER]:= TRUE;
                gDataFileStep:= Idle;
            END_CASE;
        ERR_FUB_BUSY:
            fwrite();
    ELSE
        //ERROR!
        gDataFileStep:= Idle;
        AlarmActive[ERRORNUMBER]:= TRUE;
    END_CASE;
END_CASE;

```

12.4.8 Main

```

(*****
 * COPYRIGHT -- TU Wien, IET
 *****)

 * PROGRAM: Main
 * File: Main.st
 * Author: fbirkelb
 * Date: 31. October 2017
 *****)

PROGRAM _CYCLIC

    // Determine the current state of the program
    IF gExperimentID = '' OR gDataFileStep = Create THEN

```

```

        gStatus:= 0; // No experiment active
    ELSIF gDataFileStep = Idle THEN
        gStatus:= 1; // Ready
    ELSIF gDataFileStep = StartRecording OR gDataFileStep = Recording OR gDataFileStep =
StopRecording THEN
        gStatus:= 2; // Recording
    ELSE
        gStatus:= 3; // Error
    END_IF;
    IF AlarmActive[0] THEN
        gStatus:= 3; // An error occured in the DataFile program
    END_IF

    // Process Create button
    IF uiCreatePressed = 1 THEN
        uiCreatePressed:= 0;
        // Create the data file
        gExperimentID:= uiExperimentID;
        gDataFileStep:= Create;
        uiRecordPressed:=0;
    END_IF

    // Process Record button
    IF uiRecordPressed=1 AND gDataFileStep = Idle THEN
        gDataFileStep:= StartRecording;
        gLogSpeed:= UDINT_TO_TIME(REAL_TO_UDINT(uiSampleRate*1000));
    ELSIF uiRecordPressed=0 AND gDataFileStep = Recording THEN
        gDataFileStep:= StopRecording;
    END_IF

    // Enable the create button when the data file is idle and a experiment ID is specified
    uiCreateStatus.1:= NOT(gDataFileStep = Idle AND brsstrlen(ADR(uiExperimentID)) > 0) ;

    // Enable SamplingRate box, when the data file is not recording
    uiSampleRateStatus.1:= NOT(gDataFileStep = StartRecording OR gDataFileStep = Recording OR
gDataFileStep = StopRecording);

    // Enable the record toggle button when the state is either 'Ready' or 'Recording'
    uiRecordStatus.1:= NOT(gStatus = 1 OR gStatus = 2);

END_PROGRAM

```

12.5 Datenblätter

12.5.1 Druckverlust Durchflusssensor FCH-m-ALU-IND Art.-Nr. 97478035



Kennlinie / Measurement Curve FCH-m Düse/ Nozzle D= 1,0 mm

