

AUFBAU UND INBETRIEBNAHME EINER ABSORPTIONS/KOMPRESSIONS- WÄRMEPUMPE

von

David ERKINGER

als Diplomarbeit der Kommission zur Abhaltung der dritten Diplomprüfung der Studienrichtung Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau an der Technischen Universität Graz über das Institut für Wärmetechnik vorgelegt.

Betreuer

Dipl.-Ing. David HANNL

Beurteiler:

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. René RIEBERER

Graz, 1.4. 2014

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am
.....
(Unterschrift)

KURZFASSUNG

Titel: Aufbau und Inbetriebnahme einer Absorptions/Kompressions-Wärmepumpe

Autor: David ERKINGER

1. Stichwort: Hochtemperaturwärmepumpe
2. Stichwort: Kleine Leistung
3. Stichwort: Ammoniak/Lithiumnitrat

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde eine Versuchsanlage einer hybriden Absorptions-/Kompressions-Wärmepumpe mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Lithiumnitrat aufgebaut. Die für Hochtemperaturanwendung konzipierte Anlage mit ca. 20 kW Heizleistung soll als Funktionsmuster für industrielle Abwärmenutzung untersucht werden. Der aufgebaute Kreislauf entspricht dem zugrundeliegenden Osenbrückkreislauf erweitert um eine 2-stufige Kompression mit vorgeschalteten Gaskühlern sowie einem zusätzlichen Lösungswärmetauscher nach der Niederdruckstufe und einem Enthitzer nach der Hochdruckstufe.

Die vorliegende Arbeit beinhaltet neben der Dokumentation des Aufbaus des Versuchstandes auch die Einbindung der für erste Messungen erforderliche Wärmequellen- und Wärmesenken-Infrastruktur und der Messtechnik. Eine nach der Kalibrierung der Messtechnik erfolgte Messunsicherheitsanalyse gibt Auskunft über mögliche Abweichungen einzelner Ausgabewerte.

Die erforderliche Mess- und Regeltechnik sowie die Schnittstelle zur betriebsnotwendigen Steuerungssoftware und die dazu erstellte Bedienoberfläche wurden implementiert und bei der Inbetriebnahme getestet.

Abschließend wurden in ersten Versuchsmessungen Messwerte erhoben und analysiert. Das Betriebsverhalten beim Betrieb mit unterschiedlichen Betriebsparametern und die Regelung zeigen zufriedenstellende Ergebnisse. Die gemessenen Werte zeigen, dass die anhand einer vorangegangenen Simulation berechneten COP-Werte mit der Versuchsanlage nicht erreicht wurden. Die Hauptgründe hierfür sind die Kompressorwirkungsgrade, welche niedriger waren als in der Simulation angenommen.

Diese Arbeit dient als Ausgangspunkt für die anschließende weiterführende, detaillierte Vermessung der Anlage.

ABSTRACT

Title: Construction and commissioning of a hybrid absorption/compression heat pump

Author: David ERKINGER

1st keyword: high-temperature heat pump

2nd keyword: low capacity

3rd keyword: ammonia-lithium nitrate

This thesis deals with the construction, commissioning and initial operation of a hybrid absorption/compression heat pump operating with ammonia-lithium nitrate. The present test plant with a heat output of approximately 20 kW was designed as a prototype for high-temperature applications.

The chosen heat pump cycle is based on the Osenbrück cycle extended by a two-stage compression with an upstream gas cooler and an additional solution heat exchanger, installed downstream the low pressure stage.

Besides from the construction of a pilot plant, this thesis also deals with the implementation and description of a measurement & control system. After calibration an analysis of measurement uncertainty was performed showing potential deviations.

The measurement and control system as well as the necessary control software and user interface were implemented and tested upon commissioning.

Finally, test operations were performed and measured data have been evaluated. In general the performance of the plant, at different operating parameters as well as the control system show satisfactory results. However, first results show that the predicted COP calculated in previous simulations could not be reached. The main reasons for that is the low isentropic efficiency of the compressors that was lower than originally assumed in the simulation model.

This thesis can be used as starting-point for further detailed measurements and testing of the plant.

VORWORT

Die Versuchsanlage der hybriden Wärmepumpe wurde zwischen Juli und Dezember 2014 in den Werkstatt-Räumlichkeiten des IWT aufgebaut und im Laufe der anschließenden zwei Monate in Betrieb genommen.

Ich Bedanke mich bei allen Mitarbeitern des IWT, die mir beim Aufbau und der Arbeit geholfen haben. Besonderen Dank möchte ich DI David Hannl aussprechen, der mich im Zuge der Betreuung stets engagiert unterstützt hat.

Graz, 1.4.2014

David Erkingner

INHALTSVERZEICHNIS

1	<u>EINLEITUNG</u>	1
2	<u>GRUNDLAGEN</u>	1
2.1	Prinzip der Wärmepumpe	1
2.2	Kompressionswärmepumpe	1
2.3	Absorptionswärmepumpe	2
2.4	Hybride Wärmepumpe	3
2.4.1	Schaltschema der hybriden Wärmepumpe	4
2.4.2	Prozessführung der hybriden Wärmepumpe	6
2.4.3	Effizienzkennzahlen	9
2.5	Das Arbeitsmedium	9
2.5.1	Das $\log(p)/(-1/T)$ -Diagramm von $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$	10
2.5.2	Eigenschaften der Stoffpaarung $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$	11
2.6	Anwendungsgebiete der hybriden Wärmepumpe	14
2.7	Forschungsprojekte zu Anlagen mit Ammoniak/ Lithiumnitrat	16
3	<u>AUFBAU DES VERSUCHSSTANDES</u>	18
3.1	Prozessschema	18
3.2	Kompressionskreislauf	22
3.2.1	Kompressor	22
3.2.2	Flüssigkeitsabscheider	22
3.2.3	Ölmanagement	23
3.2.4	Hochdruck-Pufferbehälter	27
3.2.5	Wärmetauscher im Kältemittelkreislauf	27
3.3	Lösungsmittelkreislauf	28
3.3.1	Lösungsmittelpumpe	28
3.3.2	Absorber	28
3.3.3	Desorber	33
3.3.4	Sammelbehälter	34
3.3.5	Expansionsventil	35
3.3.6	Lösungswärmetauscher	35
3.4	Wärmequelle und Wärmesenke	36
3.5	Wärmetauscher	39
3.6	Sicherheitseinrichtungen	40
3.6.1	Not-Aus	40
3.6.2	Druckschalter	40
3.6.3	Überdruck-Sicherheitsventile & Gasabsaugung	41
3.6.4	Automatische Abschaltung durch die Regelung	42
3.6.5	Thermischer Überlastschutz der Lösungsmittelpumpe	42
3.7	Sonstige Komponenten und relevante Anlagendetails	43
4	<u>MESS- & REGELUNGSTECHNIK</u>	44
4.1	Messtechnik	44
4.1.1	Druckmessung	44
4.1.2	Temperaturmessung	45
4.1.3	Massenstrommessung	47

4.1.4	Volumenstrommessung	48
4.1.5	Füllstandmessung	48
4.1.6	Energiezähler	50
4.1.7	Abgeleitete Messgrößen	50
4.1.8	Messunsicherheitsanalyse	50
4.1.9	Digitale Eingangssignale	52
4.2	Steuerungs- und Überwachungssystem	52
4.3	Steuergeräte	52
4.3.1	Drei-Wegeventil mit Stellmotor	53
4.3.2	Strangreguliertventile	54
4.3.3	Expansionsventil	54
4.3.4	Frequenzumrichter (FU)	54
4.3.5	Kältemittel-Sammelbehälter (bzw. Gas-Bypass)	54
4.3.6	Absperrventil SVA-ST	56
4.3.7	Digitale Steuersignale	56
4.4	Regelung	56
4.4.1	Allgemeines	56
4.4.2	Regelgrößen	57
4.5	LabVIEW – Arbeitsumgebung	59
5	<u>ERSTINBETRIEBNAHME DER VERSUCHSANLAGE</u>	<u>64</u>
5.1	Füllen der Anlage	64
5.2	Schwierigkeiten/Probleme	67
5.3	Ein- / Ausschalten der Versuchsanlage	69
6	<u>ERSTE MESSERGEBNISSE</u>	<u>72</u>
7	<u>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</u>	<u>84</u>
	<u>LITERATUR</u>	<u>86</u>
	<u>ANHANG</u>	<u>90</u>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Jährlicher Verlust durch ungenutzte und durch den Einsatz eines Kühlturms abgeführte Abwärme (http://www.thermea.de , 20.03.2014).....	1
Abbildung 2.1: (links) Kälteprozess nach Evans/Perkins (www.isustainable.org , 20.03.2014); (rechts) Schaltschema einer Kompressionswärmepumpe	1
Abbildung 2.2: Schaltschema einer Absorptionswärmepumpe	2
Abbildung 2.3: Prinzip der Absorption und Desorption.....	3
Abbildung 2.4: Schaltschema einer hybriden WP	3
Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines hybriden Wärmepumpenprozesses	4
Abbildung 2.6: Osenbrückkreislauf (Nordvedt, 2005, S.19)	5
Abbildung 2.7: Modifizierter Osenbrückprozess mit 2-stufiger Kompression, Lösungswärmetauscher SHX2 und Gaskühler vor jeder Kompressorstufe	6
Abbildung 2.8: Steuerung des Temperaturniveaus bei konstantem Druckniveau (Nordvedt, 2005, S.20).....	7
Abbildung 2.9: Kapazitätssteuerung aufgrund von Konzentrationsänderungen bei konstantem Temperaturniveau (Nordvedt, 2005, S.21).....	7
Abbildung 2.10: Temperatugleitregelung aufgrund veränderter Konzentrationen, bei konstantem Druckniveau. (Nordvedt, 2005, S.22)	8
Abbildung 2.11: Temperatugleit des Lorenz-Prozesses im Vergleich zum Carnot-Prozess (Kim et al., 2010, S.118)	8
Abbildung 2.12: Raoult'sche Darstellung $\text{NH}_3 - \text{LiNO}_3$	11
Abbildung 2.13: Schaltschema Fa. "Cooltec" (www.cooltec.ee , 25.02.2014)	14
Abbildung 2.14: Referenzanlagen der Fa. „Hybrid Energy“ (Hybrid Energy Europe, 2014, S.15)	15
Abbildung 2.15: Versuchsstand und Schaltschema der hybriden Ammoniak/ Wasser-Wärmepumpe am IFT Hannover (www.ift.uni-hannover.de , 23.03.2014)	16
Abbildung 3.1: Vereinfachter Kreislauf der Absorptions/Kompressions-Versuchsanlage	18
Abbildung 3.2: Schema des Prozesskreislaufs der Versuchsanlage.....	21
Abbildung 3.3: Kältemittelkompressor der Fa. „Frigopol“ (Frigopol, 2014, S.1)	22
Abbildung 3.4: Teile des Ölmanagements (1 - 5: www.esk-schultze.de , 6: www.kriwan.at)	23
Abbildung 3.5: Bild Komponenten des Ölmanagements.....	25
Abbildung 3.6: Bild Ölabscheidung nach dem HPC	26
Abbildung 3.7: Tropfengrößenverteilung BOS2-22F (ESK Schultze, 2014)	26
Abbildung 3.8: CAD-Schnitt Hochdruck-Pufferbehälter.....	27
Abbildung 3.9: Fallfilm Absorber vs. Blasenabsorber.....	29
Abbildung 3.10: Absorbereinführung mit eingesprühter Lösung (Peter et al., 1999, S.12)	30
Abbildung 3.11: links: Absorbereinführung aus geschlitzten Rohren; rechts: Gerichtete Einströmung in einen Blasenabsorber (Risberg et al. 2005, Fig.5/ Fig.6)	30
Abbildung 3.12: Fließschema im Absorber	31
Abbildung 3.13: Fertigungszeichnung der Absorberlanze.....	31
Abbildung 3.14: Bild der gefertigten Absorber-Lanze.....	32
Abbildung 3.15: Aufnahme der Strömungsverteilung entlang der Lanze unter Wasser.....	32
Abbildung 3.16: Ausrichtung der Einströmbohrungen der Absorber-Lanze.....	33
Abbildung 3.17: Bild Absorbereinführung	33
Abbildung 3.18: Bild PSAC, MSAC und RSAC	35
Abbildung 3.19: Schema Wärmesenken-Kreislauf.....	36
Abbildung 3.20: Bild Senkenkreislauf des Wassers	37
Abbildung 3.21: Schema Wärmequellen-Kreislauf.....	38
Abbildung 3.22: Bild Wärmequellenkreislauf der Anlage.....	38
Abbildung 3.23: Bild AUX1 /AUX2 – Anbindung nach dem Desorber	39
Abbildung 3.24: Fließschema und innerer Aufbau eines PWT (AlfaLaval, 2014, S.1)	39
Abbildung 3.25: Druckschalter KP15 (Danfoss, 2014 b, S.6).....	40
Abbildung 3.26: links: Schnittdarstellung des Überströmventils (www.leser.com); rechts: Einbausituation des Sicherheitsventils mit Absaugleitung.....	41

Abbildung 3.27: Überströmung Lösungsmittelpumpe – Poor Solution Accumulator	42
Abbildung 3.28: Absaugung-Einrichtung der Überströmventile	42
Abbildung 4.1: Messschaltung eins Vierleiters (www.fuehlersysteme.de, 03.03.2014)	46
Abbildung 4.2: Pt100 - Messstelle	46
Abbildung 4.3: Schaltung eines Thermoelements (Busch, 2006, S.362).....	47
Abbildung 4.4: (links): Reedkontakt-Messkette mit 3-poliger Potentiometerschaltung	49
Abbildung 4.5: Datenaustausch der Schnittstelle Hardware/ Software.....	52
Abbildung 4.6: Regelcharakteristik Dreiwegeventil (links) und Stellantrieb (rechts); (Siemens, 2014, a, b).....	53
Abbildung 4.7: Bild Gas-Bypass mit Verbindung zur Kältemittel-Gasflasche	55
Abbildung 4.8: Auswirkung der Regelung durch Veränderung der Ammoniakfüllmenge auf den Prozess im $\log(p)/(-1/T)$ - Diagramm	55
Abbildung 4.9: Auswirkung der Regelung durch Veränderung der Betriebstemperaturen auf die Ammoniakfüllmenge im Prozess, im $\log(p)/(-1/T)$ - Diagramm.....	56
Abbildung 4.10: Schema Regelkreis (Unbehauen, 2008, S.11)	57
Abbildung 4.11: Blockschaubild eines PID Reglers (www.geltec.de, 10.03.2014).....	57
Abbildung 4.12: Regelschema Lösungspumpendrehzahl über Füllstand RSAC	58
Abbildung 4.13: Regelschema Pulsweitenmodulation der Lösungsdrossel über den Niederdruck im PSAC	59
Abbildung 4.14: Programmstruktur in LabVIEW	60
Abbildung 4.15: Einbindung in LabVIEW	61
Abbildung 4.16: Benutzeroberfläche in LabVIEW („Display and Data Writer“)	61
Abbildung 4.17: Benutzeroberfläche „Output Control“	63
Abbildung 5.1: Bild unterschiedlicher Lösungszustände, beobachtet durch das Schauglas des Mischbehälters	65
Abbildung 5.2: Bild Aufbau für die Herstellung der Lösung	66
Abbildung 5.3: Füllaufbau der Anlage.....	66
Abbildung 5.4: Bild Öltrübung des HPC (links) im Vgl. zum reinen Öl des LPC (rechts)	67
Abbildung 5.5: Bild Ölablagerungen Vergleichsproben.....	67
Abbildung 5.6: Bild der abgeschiedenen Ölverunreinigungen.....	68
Abbildung 5.7: Bild Ammoniak-Zufluss-Ventil bei Absorbereinlass	69
Abbildung 6.1: Schematischer Lösungskreislauf von Messpunkt 5 im $\log(p)/(-1/T)$ -Diagramm .	74
Abbildung 6.2: Schematischer Lösungskreislauf Messpunkt 8 im $\log(p)/(-1/T)$ -Diagramm.....	75
Abbildung 6.3: Diagramm Heizleistung/Absorberleistung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Berechnungsmethoden (vgl. Tabelle 6-2).....	77
Abbildung 6.4: Leistung Desuperheater bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen unter der Berücksichtigung der unterschiedlichen Berechnungsmethoden (vgl. Tabelle 6-3).....	78
Abbildung 6.5: Ein- und Austrittstemperaturen der Wärmesenke bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen	79
Abbildung 6.6: COP_H der Messpunkte 5 bis 16 (vgl. Tabelle 6-6) (Fehler entspricht einfacher Messunsicherheit)	80
Abbildung 6.7: Zeitliche Massenstromverläufe in kg/h (MP10).....	81
Abbildung 6.8: Zeitliche Füllstandsverläufe in cm (MP10).....	81
Abbildung 6.9: Zeitliche Änderung der Massenströme, Temperaturen, Drücke und Füllstände, bei Änderung des Betriebspunktes (MP15 auf MP16)	82
Abbildung 6.10: Regelcharakteristik der Absorber-/ Desorberleistung	82
Abbildung 6.11: Verlauf der Dichte einer Lösung aus NH_3 und $LiNO_3$ mit unterschiedlichen NH_3 -Konzentrationen ●: $x=0,4$; ▲: $x=0,5$; ✕: $x=0,6$ (Libotean, 2008, S.2383).....	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Stoffeigenschaften Ammoniak (Daten gemäß www.dguv.de, 08.01.2014)	12
Tabelle 2-2:	Materialbeständigkeit in Ammoniak und Ammoniak/ Lithiumnitrat (Daten gemäß Bürkert, 2014, S.8)	12
Tabelle 2-3:	Stoffeigenschaften Lithiumnitrat (vgl. Sicherheitsdatenblatt Merck (2014)	13
Tabelle 3-1:	Daten der Kompressoren (Typenschild „Frigopol“ Trennhäubenverdichter).....	22
Tabelle 3-2:	Daten des Flüssigkeitsabscheiders (ESK Schultze, 2014)	23
Tabelle 3-3:	Komponenten des Ölkreislaufes	23
Tabelle 3-4:	Öl-Füllmengen (ESK Schultze, 2014).....	24
Tabelle 3-5:	Typische Kennwerte von Kältemaschinenölen (Daten gemäß Fuchs, 2014).....	24
Tabelle 3-6:	Produktdaten SHC 226 E (Daten gemäß Exxon Mobil, 2014)	24
Tabelle 3-7:	Daten Lösungsmittelpumpe „Hydra-Cell“ (Daten gemäß Angebot „VERDER GmbH AUSTRIA“)	28
Tabelle 3-8:	Daten der Sammelbehälter	35
Tabelle 3-9:	Eckdaten Expansionsventil AKVA 10-6 (Danfoss, 2014 a)	35
Tabelle 3-10:	Liste der eingebauten Plattenwärmetauscher (Daten gemäß AlfaLaval, 2014).....	40
Tabelle 3-11:	Einstellwerte der Druckschalter	40
Tabelle 3-12:	Ansprechdruck und Einsatzgebiet Leser Sicherheits-Überströmventile.....	41
Tabelle 3-13:	Eckdaten Druckschläuche (Daten gemäß Angebot „Parcom Ventile & Fittings GmbH“).....	43
Tabelle 4-1:	Liste der verwendeten Messgeräte.....	44
Tabelle 4-2:	Daten Kalibrierung Drucktransmitter.....	45
Tabelle 4-3:	Daten Temperaturmessfühler.....	47
Tabelle 4-4:	Eingestellte Messbereiche Coriolis-Messgeräte	48
Tabelle 4-5:	Eckdaten Schwimmer und Reedkontaktkette (gemäß Angebot „WIKAMessgerätevertrieb GmbH & Co KG“)	49
Tabelle 4-6:	Maximale Messabweichung der verwendeten Messsysteme.....	51
Tabelle 4-7:	Liste der Steuergeräte.....	53
Tabelle 5-1:	Daten der Lösungsherstellung.....	65
Tabelle 6-1:	Betriebsbedingungen der MP 5 bis MP 16	73
Tabelle 6-2:	Messwerte Messpunkt (MP) 5 und 8	73
Tabelle 6-3:	Unterschiedliche Leistungsermittlung Absorber.....	76
Tabelle 6-4:	Unterschiedliche Leistungsermittlung Desuperheater.....	77
Tabelle 6-5:	Relevante Messwerte und berechnete Leistungszahlen.....	80
Tabelle 6-6:	Dichte der armen Lösung - Messung vs. Berechnung	83
Tabelle 0-1:	Messein- und Ausgänge Hypump.....	90

Abkürzungsverzeichnis (Nomenklatur & Indizes)

\dot{W}_C	Kompressorleistung	Compressor capacity
\dot{Q}	Leistung	Capacity
\dot{m}	Massenstrom	Mass flow rate
\dot{V}	Volumenstrom	Volume flow rate
ABS	Absorber	Absorber
AUX	Gaskühler	Auxiliary heat exchanger
AWP	Absorptionswärmepumpe	absorption heat pump
COM	Kompressor	Compressor
CON	Kondensator	Condenser
COP	Leistungszahl	Coefficient Of Performance
c_p	spezifische Wärmekapazität	Specific heat capacity
DES	Desorber	Desorber
el	Elektrisch	Electrical
EVA	Verdampfer	Evaporator
FU	Frequenzumformer	frequency changer
h	Enthalpie	Enthalpy
HD HP	Hochdruck	High pressure
HPC	Hochdruckkompressor	High pressure compressor
IFT	Institut für Thermodynamik	Institute of Thermodynamics
in	Einlass	Inlet
IWT	Institut für Wärmetechnik	Institute of thermal engineering
KWP	Kompressionswärmepumpe	Compression heat pump
LiNO ₃	Lithiumnitrat	Lithiumnitrate
LMP, PMP	Lösungsmittelpumpe	Solution pump
LPC	Niederdruckkompressor	Low pressure compressor
max	Maximum	Maximum
MID	Magn. Indukt. Durchflussmesser	Electromagnetic flowmeter
min	Minimum	Minimum
MP	Messpunkt	measuring point
MSAC	Sammelbehälter der reichen Lösung auf Niedertemperaturniveau	Rich solution accumulator
NaSCN	Natriumthiocyanat	Natriumthiocyanat
ND LP	Niederdruck	Low pressure
NH ₃	Ammoniak	Ammonia
out	Auslass	Outlet
P	Druck	Pressure
Pel	Elektrische Leistung	Electrical power
PSAC	Sammelbehälter der armen Lösung	Poor solution accumulator
PSO	Arme Lösung	Poor solution
PWT	Plattenwärmetauscher	Plate heat exchanger
R717	Kältemittel Ammoniak	Refrigerant ammonia
R718	Kältemittel Wasser	Refrigerant water
RSAC	Sammelbehälter der reichen Lösung	Rich solution accumulator
RSO	Reiche Lösung	Rich solution
RTH	Lösungsdrössel	Refrigerant throttle
s	Standardabweichung	Standard deviation
SHX	Wärmesenke	Solution heat exchanger
snk	Lösungswärmetauscher	Heat sink
src	Wärmequelle	Heat source
STH	Kältemitteldrössel	Solution throttle
SUP	Enthitzer	Desuperheater
t	Temperatur	Temperature
u	Messunsicherheit	Uncertainty in measurement

WP
 η
 ρ

Wärmepumpe
Wirkungsgrad
Dichte

Heat pump
Efficiency faktor
Density

1 EINLEITUNG

Hintergrund

Seit der Idee der Wärmepumpe durch Carnot im Jahr 1824 wurden Wärmepumpensysteme stetig weiter entwickelt. Speziell in Energiekrisenzeiten wurde verstärkt in diese Richtungen geforscht um wirtschaftliche Heizungs- und Kälteanlagen zu verwirklichen. Seit Mitte der 1990er Jahre erleben Heizwärmepumpen für den Einsatz als eigenständige Gebäudeheizung eine Renaissance und konnten sich mittlerweile, durch ihre wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit sowie weiterer gesellschaftlich-ökologische Faktoren, am Heizungsmarkt etablieren.

Die wirtschaftliche Nutzung konventioneller Wärmepumpensystemen ist allerdings für industrielle Anwendungsbereiche stark beschränkt und zumindest im kleinen Leistungsbereich wirtschaftlich schwer darzustellen. Steigende Energiepreise verstärken das Interesse der Wärmerückgewinnung von vorhandener Prozessabwärme, die anderenfalls energetisch ungenutzt aus dem System abfließt bzw. gegebenenfalls aufwendig gekühlt werden muss, wie beispielhaft in Abbildung 1.1 gezeigt wird.

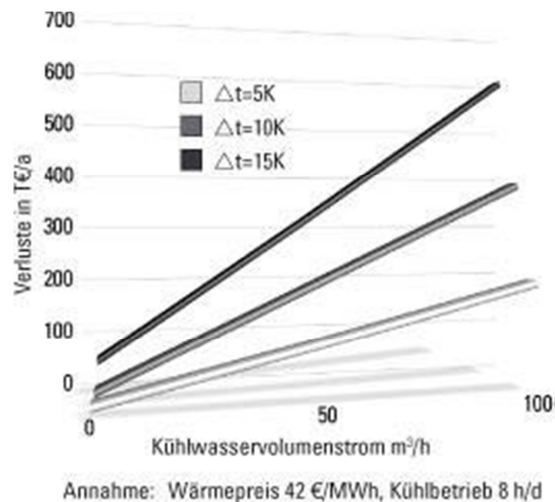


Abbildung 1.1: Jährlicher Verlust durch ungenutzte und durch den Einsatz eines Kühlturms abgeführte Abwärme (<http://www.thermea.de>¹, 20.03 2014)

Durch ein erhöhtes Interesse und gezielter Weiterentwicklung auf diesem Gebiet wird an verschiedenen Konzepten für Hochtemperaturanwendungen zur industriellen Abwärmenutzung geforscht, die das Temperaturniveau der bisher ungenutzten Abwärme aus Industriebetrieben auf entsprechende Prozesstemperaturen (ca. 100°C) anheben und so innerbetrieblich nutzbar machen soll. Der dadurch reduzierte Primärenergieeinsatz schafft ein signifikantes Potential für Kosteneinsparungen und trägt maßgeblich zur Erreichung von Klimazielen bei.

In diesem Zusammenhang, speziell auch für Kleinanlagen (< 50 kW) werden derzeit kombinierte Wärmepumpenprozesse aus Kompressions- und Absorptionsanlagen mit verschiedenen Arbeitsstoffen untersucht. Das Konzept und der Aufbau einer solchen hybriden Wärmepumpe soll in dieser Arbeit näher beschrieben werden.

¹ <http://www.thermea.de/de/produktvorteile/nachhaltigkeit/item/425-effektive-waermerueckgewinnung>

Ziel dieser Arbeit

Im Rahmen der Diplomarbeit soll ein Prototyp einer „hybriden“ Absorptions/Kompressions-Wärmepumpe mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Lithiumnitrat inklusive Messtechnik und Infrastruktureinbindung aufgebaut werden. Nach der Einarbeitung in die Funktionsweise einer Absorptions-/Kompressions-Wärmepumpe soll sich mit dem Prozessschema, der Konstruktion und den Komponenten der Anlage, dem Arbeitsstoffpaar und den wesentlichen Betriebsparametern vertraut gemacht werden. Einzelne konstruktive Details sollen entworfen und ausgeführt werden. Der eigentliche Aufbau und die für den Betrieb notwendigen Vorbereitungen sollen dokumentiert werden. Im Zuge der Inbetriebnahme soll schließlich die Funktionsfähigkeit überprüft werden, um anschließend erste messrelevante Betriebspunkte aufzuzeichnen.

Gliederung der Arbeit

Zunächst werden in Kapitel 2 die Grundlagen des Wärmepumpenprozesses und die unterschiedlichen Kreislaufsysteme der Basisschaltungen erklärt um sich in weiterer Folge an den erweiterten hybriden Kombinationsprozess anzunähern. Dieses Kapitel zeigt die Betriebscharakteristik und die Besonderheiten eines derartigen Prozesses. Des Weiteren wird das eingesetzte Arbeitsmedium beschrieben und Unterschiede zu vergleichbaren Arbeitsstoffen aufgezeigt. Danach wird auf mögliche Anwendungsgebiete und Unterschiede zu konventionellen Systemen eingegangen und abschließend vergleichbare Aufbauten bzw. Forschungsarbeiten vorgestellt.

Das Kapitel 3 „Aufbau des Versuchsstandes“ geht näher auf die einzelnen Teilkreisläufe des Prozesses ein. Dabei wird die Funktion der eingebauten Komponenten erklärt und das Zusammenspiel mit anderen Bauteilen beschrieben. Die für den Betrieb erforderlichen sicherheitstechnischen Bauteile werden am Ende dieses Kapitels ebenfalls thematisiert.

Die erforderliche Mess- und Regelungstechnik wird in Kapitel 4 erläutert. In diesem Abschnitt werden die einzelnen Messsysteme erklärt und der Zusammenhang mit den eingesetzten Steuergeräten geschildert. Die Regelmöglichkeiten an der Anlage und die implementierte Steuermöglichkeit über den PC wird ebenfalls erklärt.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Inbetriebnahme der Anlage. Dabei wird näher auf die Befüllung und Vorbereitung zum ersten Start der Anlage und den dabei aufgetretenen Besonderheiten eingegangen und schließlich wird die spezielle Startprozedur bei Inbetriebnahme des Versuchsstandes geschildert.

Messdaten der ersten Betriebsläufe der Anlage werden im Kapitel 6 „Erste Messergebnisse“ dokumentiert und diskutiert, bevor das abschließende Kapitel die vorangegangene Arbeit zusammenfasst.

2 GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel soll auf die grundlegenden Prinzipien einer Wärmepumpe eingegangen werden und der kombinierte Prozess der hybriden Wärmepumpe anhand der Basiskreisläufe angenähert werden. In weiterer Folge wird das eingesetzte Arbeitsstoffgemisch vorgestellt, seine spezifischen Eigenschaften erläutert und ein Vergleich zu anderen Stoffpaarungen gegeben. Abschließend werden in diesem Kapitel aktuelle Forschungsanlagen sowie einige am Markt angebotene hybride Anlagen referenziert.

2.1 Prinzip der Wärmepumpe

Der Wärmepumpenprozess dient zur Bereitstellung von Nutzwärme (bzw. nutzbarer Kälte). Prinzipiell besteht der Prozess aus Wärmeabfuhr durch eine Wärmesenke, der Wärmezufuhr durch die Wärmequelle und einem Antrieb, der durch selbst eingebrachte Energie Wärme von niedrigerem Temperaturniveau auf ein höheres, technisch nutzbares Temperaturniveau bringen soll. Diese Wärmeniveauumwandlung wird durch Änderung des Aggregatzustandes eines, im geschlossenen Kreislauf umlaufenden Trägermediums, dem Kältemittel, bei unterschiedlichen Drücken erreicht.

Der wesentliche Effizienzvorteil solcher Anlagen besteht in der energetischen Nutzung bereits vorhandener, auf Grund des Temperaturniveaus jedoch nicht direkt verwertbaren Wärmequellen. Übliche Wärmequellen konventioneller Wärmepumpen für die Gebäudeheizung sind Erdwärme (Sonden- oder Kollektorverdampfer), Grundwasser oder auch Umgebungsluft. In der Industrie sind Hochtemperatur-Wärmepumpen bei gleichzeitiger Abwärmenutzung ein mögliches Anwendungsgebiet.

2.2 Kompressionswärmepumpe

Der Kaltdampfprozess einer Kompressionswärmepumpe, welcher im allgemeinen Sprachgebrauch als Wärmepumpenprozess verstanden wird, entspricht dem Evans/Perkins-Prozess. In Kompressionswärmepumpen wird der Kreislauf durch die eingebrachte technische Arbeit eines Kompressors angetrieben. Dieser geschlossene Prozess wird in der folgenden Abbildung 2.1 (links) beschrieben.

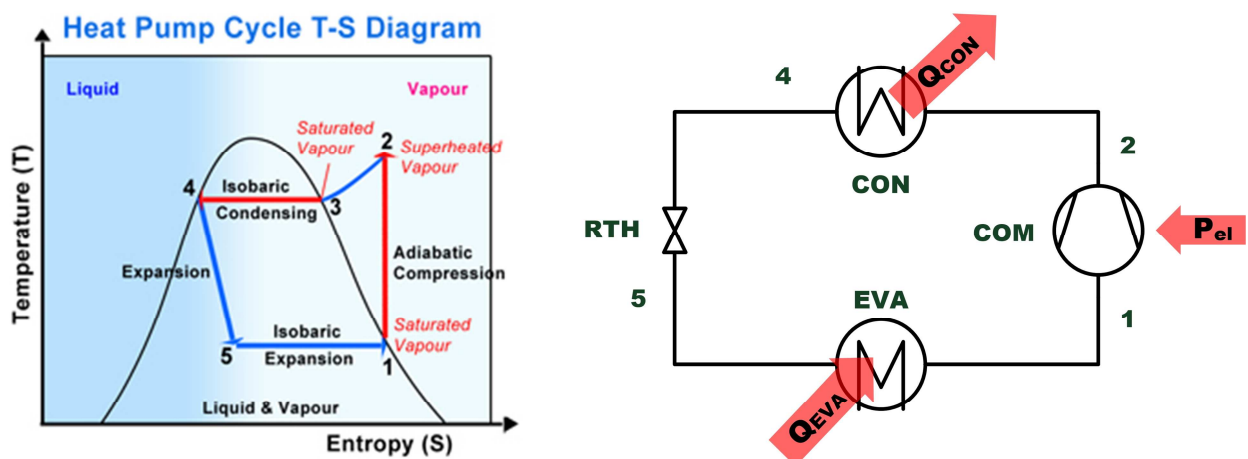


Abbildung 2.1: (links) Kälteprozess nach Evans/Perkins (www.isustainable.org², 20.03.2014); (rechts) Schaltschema einer Kompressionswärmepumpe

² <http://www.isustainable.org/geothermalheatpumps.php>

Das gasförmige Kältemittel tritt in den Kompressor (COM) ein und wird infolge der idealen isentropen Verdichtung erhitzt (1-2). Nach dem Kompressoraustritt wird dem gasförmigen Arbeitsmedium im Kondensator (CON) die im Fall einer Wärmepumpe nutzbare Wärme entzogen, wodurch es sich bei gleichbleibendem Druck verflüssigt (2-4). Im flüssigen Zustand und auf Hochdruckniveau wird das Kältemittel durch ein Expansionsventil (RTH) entspannt (4-5) und gelangt als Zweiphasengemisch in den Verdampfer (EVA). Dort wird das, durch die Expansion stark abgekühlte und teilweise verdampfte Arbeitsmedium, mit Hilfe der Wärmequelle wieder vollständig in den gasförmigen Zustand überführt (5-1) und bildet den Ausgangspunkt für einen erneuten Durchlauf des Kreisprozesses. Das Schaltschema einer Kompressionswärmepumpe ist in Abbildung 2.1 (rechts) dargestellt.

2.3 Absorptionswärmepumpe

Bei Absorptionswärmepumpen erfolgt der Antrieb, nicht wie bei Kompressionsanlagen durch mechanische Energie, sondern durch thermische Energiezufuhr. Der eingesetzte Antrieb ermöglicht eine gute wirtschaftliche Nutzung, wenn thermische Energie zur Verfügung steht (und keine „teure“ elektrische Energie für einen Verdichter benötigt wird). Absorptionswärmepumpen werden, bedingt durch ihren konstruktiven Aufwand, vor allem bei Großanlagen gerne eingesetzt.

In Abbildung 2.2 ist ersichtlich, dass der aus Abbildung 2.1 (rechts) treibende Verdichter durch einen Sorptionskreis ersetzt worden ist. Dieser Kreis wird durch eine, im Vergleich zum Verdichter einer Kompressionsanlage leistungsschwache Lösungsmittelpumpe angetrieben. Die im Absorber mit Kältemittel angereicherte Lösung (1) gelangt so in den Desorber (2). Dort wird durch Wärmezufuhr bei hoher Temperatur das Kältemittel aus der angereicherten Lösung ausgetrieben (5), um in weiterer Folge den gleichartigen Kältemittelkreislauf einer Kompressionsmaschine (5-8) zu beschreiben. Die Lösung mit einer geringen Kältemittel-Massenkonzentration (3) (in der weiteren Arbeit als arme Lösung bezeichnet) aus dem Desorber wird durch eine Lösungsdrossel entspannt und gelangt in den Absorber zurück (4) wo das gasförmige Kältemittel bei gleichzeitiger Wärmeabgabe absorbiert wird. Durch einen solchen wie in Abbildung 2.2 beschriebenen Kreislauf entstehen vier Wärmeübertragungen auf zumindest drei Temperaturniveaus.

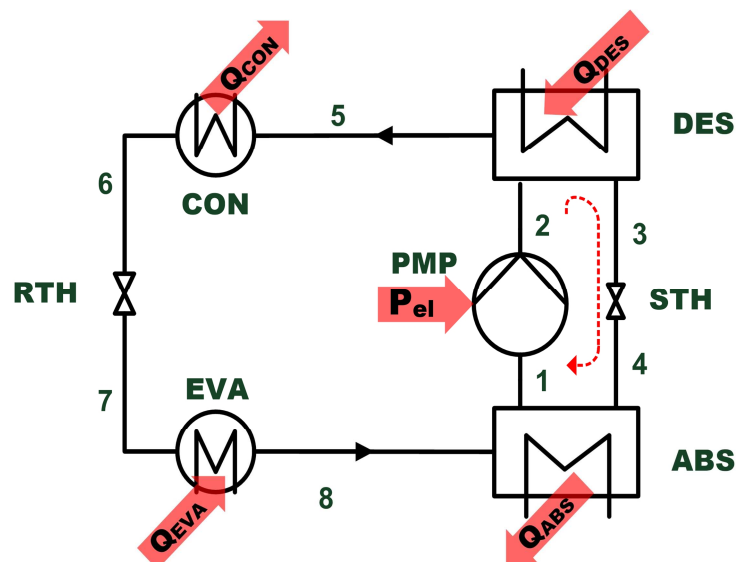


Abbildung 2.2: Schaltschema einer Absorptionswärmepumpe

Der Sorptionsprozess

Sorption beschreibt die Aufnahme eines Stoffes in einem anderen, sodass eine Vermischung beider Stoffe ohne chemische Reaktion entsteht. Absorption bedeutet im Rahmen dieser Arbeit das Lösen eines gasförmigen Stoffes, dem Absorbat, in einem flüssigen Sorptionsmittel. Die

dabei entstehende Lösungswärme und die Tatsache, dass dieser Vorgang reversibel ist, siehe Abbildung 2.3, kann als Grundlage für den thermischen Antrieb einer Absorptionswärmepumpe dienen. Desorption beschreibt den umgekehrten Prozess des Austreibens von Absorbat aus der Lösung bei gleichzeitiger Wärmezufuhr. Mögliche Mischverhältnisse des Stoffpaares, also Lösungskonzentrationen, sind vom Druck und der Temperatur der Lösung abhängig.

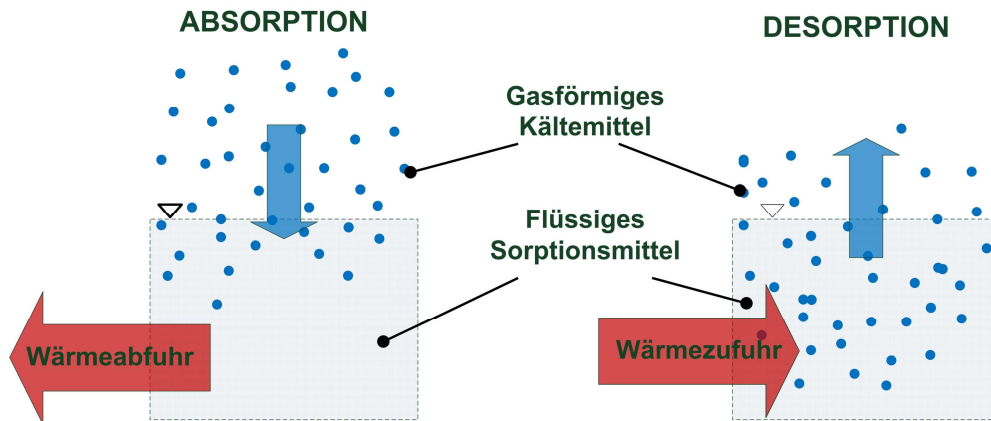


Abbildung 2.3: Prinzip der Absorption und Desorption

2.4 Hybride Wärmepumpe

Unter einer "hybriden" Wärmepumpe versteht man eine Kombination aus den beiden zuvor angeführten Wärmepumpentypen. Die in dieser Arbeit in weiterer Folge genannte hybride Wärmepumpe wird als Kombinationsprozess aus Kompressions- und Absorptionswärmepumpe gemäß Abbildung 2.4 verstanden.

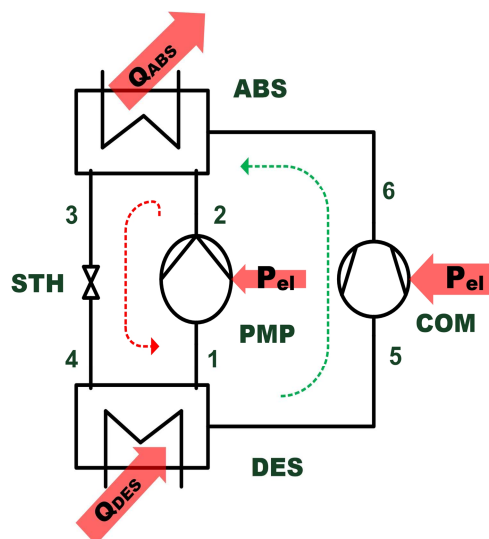


Abbildung 2.4: Schaltschema einer hybriden WP

Ausgehend von dem angesaugten Kältemitteldampf, der im Kompressor auf Hochdruckniveau verdichtet wird, wird das Kältemittel anschließend im Absorber (ABS) in einer flüssigen Lösung absorbiert, wobei Lösungswärme frei wird, die über die Wärmesenke abgeführt werden kann. Nach der Absorption wird die reiche Lösung auf Niederdruckniveau entspannt und nachfolgend kann durch die Wärmezufuhr im Desorber (DES), der oft auch als Generator (GEN) bezeichnet wird, das Kältemittel wieder aus der Lösung ausgetrieben werden. Die verbleibende „arme“ Lösung wird von einer Lösungsmittelpumpe auf Hochdruck gefördert und in den Absorber geführt, wo sie erneut das vorher abgeschiedene, verdichtete Kältemittel absorbiert.

2.4.1 Schaltschema der hybriden Wärmepumpe

In der Abbildung 2.5 ist der grundlegende hybride Prozess für das Stoffgemisch Ammoniak/Lithiumnitrat dargestellt und zeigt den Zusammenhang zwischen Systemtemperaturen und Drücken.

Nachdem im Desorber das Ammoniak aus der Lösung ausgetrieben wurde, werden die flüssige, arme Lösung und das gasförmige Ammoniak im Separator gesammelt und getrennt. Von dort wird die arme Lösung in den Absorber gepumpt und erreicht dadurch einen höheren Druck und folglich eine höhere Sättigungstemperatur. Parallel dazu wird das im Separator gesammelte Ammoniak über einen Kompressor verdichtet und gelangt in den Absorbereintritt, wo es in der Lösung absorbiert werden kann. Bei gleichbleibend hohem Druckniveau wird die durch den Absorptionsvorgang entstehende Wärme abgeführt. Danach wird die angereicherte Lösung des abgekühlten Ammoniak/Lithiumnitrat -Gemisches über eine Lösungsdrossel auf Niederdruckniveau entspannt und gelangt in Folge der teilweisen Verdampfung in der Drossel gekühlt in den Desorbereintritt.

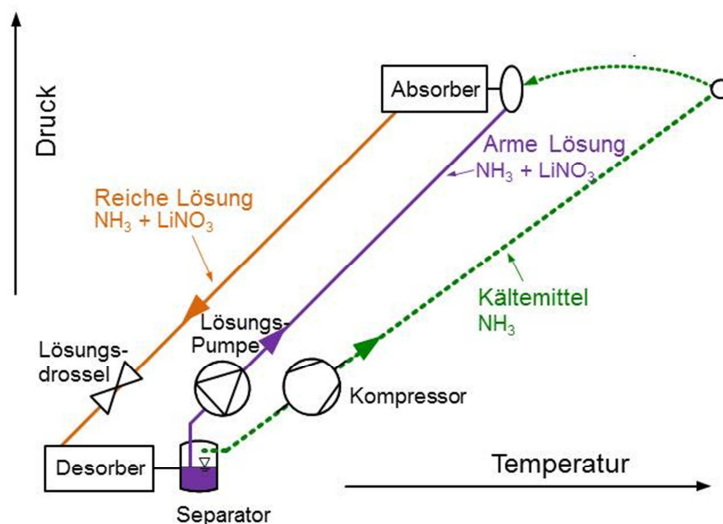


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines hybriden Wärmepumpenprozesses

Der von Osenbrück (1895) patentierte Prozess einer hybriden Wärmepumpe erweitert die zuvor gezeigte Basisschaltung mit einem Lösungsmittelwärmetauscher und verwirklicht damit, auf Grund der Wärmerückgewinnung, bereits die erste Effizienzsteigerung. Dabei wird Wärme von der dem Absorber abfließenden reichen Lösung, auf die dem Absorber zufließende arme Lösung übertragen. Begründet wird diese Effizienzsteigerung durch ein Annähern der Temperaturdifferenz der zusammengeführten flüssigen und gasförmigen Phasen im Absorber, was zu geringeren Exergieverlusten bei der Mischung führt. Der nach Osenbrück benannte Kreislauf, dargestellt in Abbildung 2.6, ist Ausgangspunkt verschiedener Weiterentwicklungen und bildet auch den zugrundeliegenden Kreislauf der realisierten Versuchsanlage.

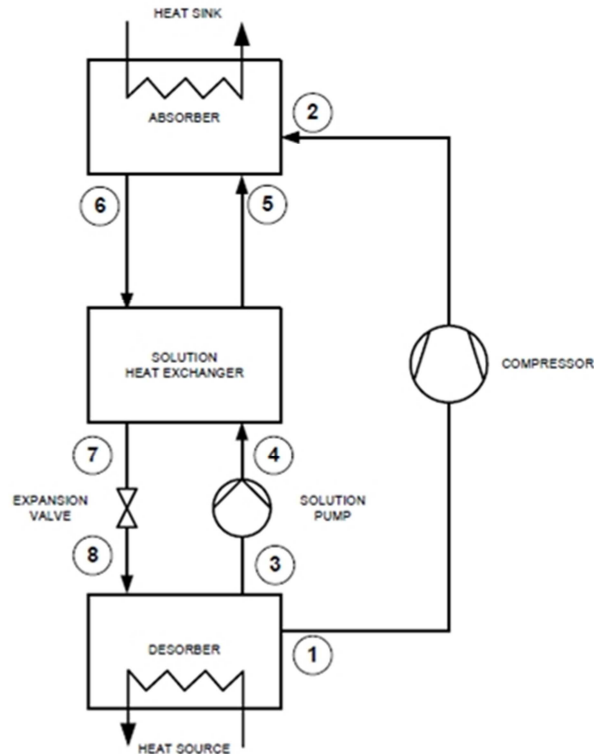


Abbildung 2.6: Osenbrückkreislauf (Nordvedt, 2005, S.19)

Die Effizienz der Anlage hängt stark vom Wirkungsgrad des Verdichters ab. Um die erreichten Kompressoraustrittstemperaturen zu begrenzen, wird das angestrebte Druckverhältnis auf zwei Stufen aufgeteilt. Diese Aufteilung auf zwei kleinere Druckverhältnisse ermöglicht eine Zwischenkühlung des komprimierten Mediums auf Mitteldruckniveau. Durch diese Maßnahmen sinkt die jeweilige Kompressoraustrittstemperatur beider Verdichterstufen, was auch zur thermischen Entlastung des Kompressoröls führt.

Durch den Einsatz von Gaskühlern vor jeder Kompressionsstufe wird eine zusätzlich notwendige Senkung der Kompressoraustrittstemperatur ermöglicht. Der erweiterte Kältemittel/Lösungsmittel-Wärmetauscher (SHX2) kühlt das heiße Gas am Niederdruckkompressor-Austritt durch die teilweise Abfuhr der Wärme an die dem Absorber zufließende arme Lösung. Das ermöglicht eine Effizienzsteigerung im Vergleich zur rein externen Wärmeabfuhr. Diese erweiterte Schaltung, entspricht dem von Nordvedt (2005) untersuchten Ammoniak/Wasser-Kreislauf und bildet, wie in Abbildung 2.7 ersichtlich, eine Basis für die Grundschaltung der aufgebauten Anlage.

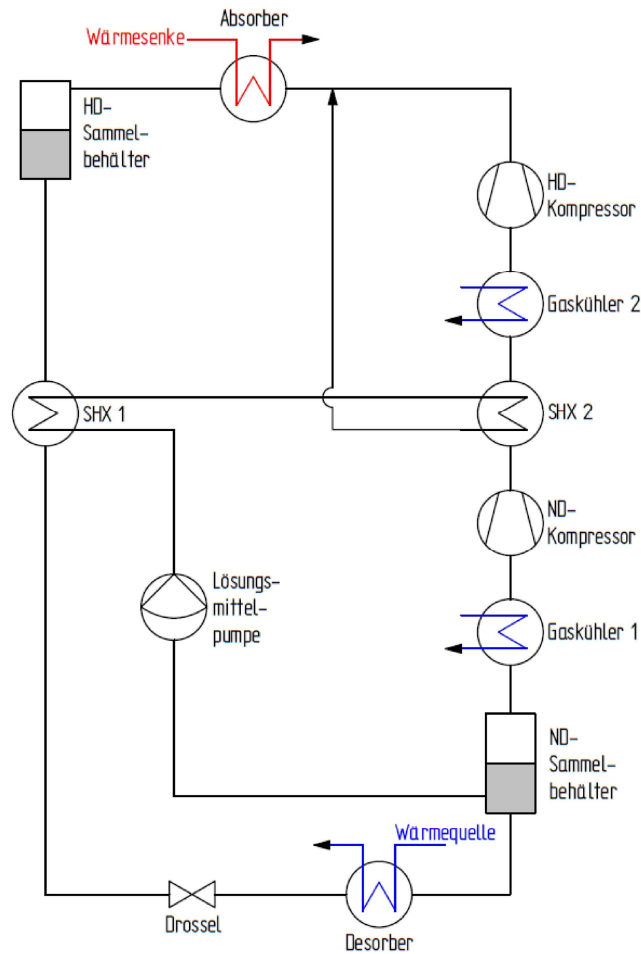


Abbildung 2.7: Modifizierter Osenbrückprozess mit 2-stufiger Kompression, Lösungswärmetauscher SHX2 und Gaskühler vor jeder Kompressorstufe

2.4.2 Prozessführung der hybriden Wärmepumpe

Da Lösungskonzentration sowie Sättigungstemperatur und Sättigungsdruck in Beziehung zu einander stehen, entsteht ein variabler Betriebsbereich. Der durch das Zusammenspiel dieser Parameter ermöglichte Betriebsbereich der Parameter ermöglicht ebenfalls eine umfangreiche Leistungsregelung des Prozesses. Der Zusammenhang dieser Parameter soll in weiterer Folge beschrieben werden.

In der Raoult'sche Darstellung ist das gesamte Lösungsfeld einer Mischung, in einem $\log(p)/(-1/T)$ -Diagramm aufgetragen. Auf der Abszisse dieses Diagrammes sind die Temperaturen aufgetragen, auf der Ordinate die entsprechenden Drücke im logarithmischen Maßstab. Die Konzentration im Sättigungszustand, bzw. der Massenanteil des jeweiligen Sorptionsstoffes sind im Lösungsfeld eingetragen, wobei die gesättigten Lösungskonzentrationen durch die eingetragenen Linien konstanter Lösungskonzentration ablesbar sind.

Die folgenden Diagramme (Abbildung 2.8, Abbildung 2.9 und Abbildung 2.10) zeigen, anhand einer Ammoniak/Wasser-Mischung, die mögliche Änderungen des Lösungskreislaufes, basierend auf der Nomenklatur der Punkte im Kreislauf des Osenbrückzyklus der Abbildung 2.6.

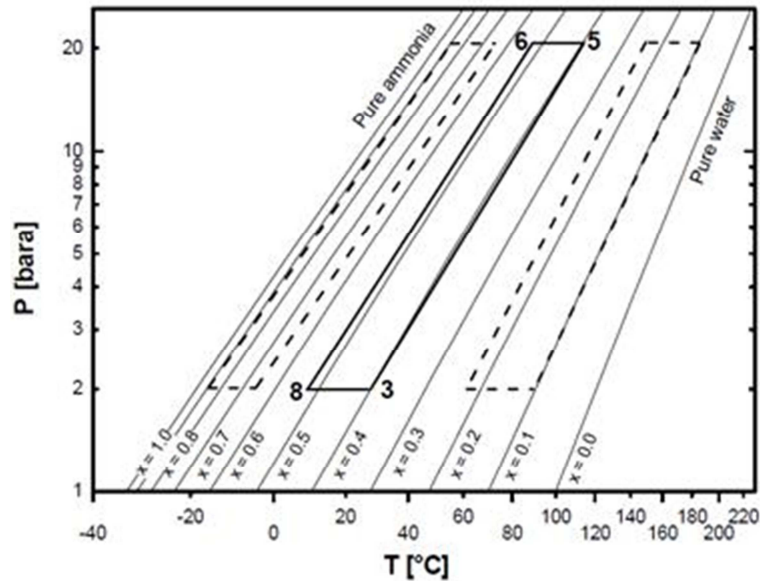


Abbildung 2.8: Steuerung des Temperaturniveaus bei konstantem Druckniveau (Nordvedt, 2005, S.20)

In Abbildung 2.8 ist ersichtlich, dass die Steigerung der Kältemittel-Konzentration bei gleichzeitig unveränderten Druckniveaus eine Senkung der Temperaturniveaus im Absorber bzw. im Desorber bewirkt. Abbildung 2.9 zeigt eine mögliche Maßnahme zur Leistungsänderung, durch das Verschieben der Kreislaufkonzentrationen entlang eines gleichbleibenden Temperaturniveaus im Absorber und Desorber. Bei konstanten Kompressordrehzahlen wirken sich die ändernden Dichteverhältnisse am Kompressoreintritt in Folge des Druckes auf die Leistungen im Absorber und Desorber aus.

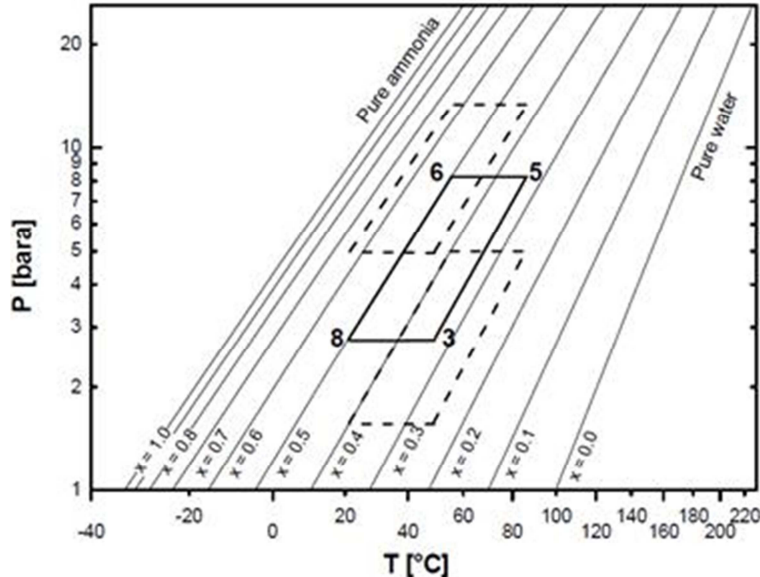


Abbildung 2.9: Kapazitätssteuerung aufgrund von Konzentrationsänderungen bei konstantem Temperaturniveau (Nordvedt, 2005, S.21)

Abbildung 2.10 zeigt die Einstellung eines optimalen Temperaturgleits durch Anpassung der Konzentrationsänderung der Lösung im Absorber und Desorber. Der für den Lorentz-Prozess maßgebliche Temperaturgleit wird bei gleichbleibenden Druckniveaus ebenfalls durch die Ein- und Austritts-Lösungskonzentration bestimmt. Durch die direkte Wärmeübertragung am Ab- bzw. Desorber kann, im Vergleich zu reinen Kompressionswärmepumpen der Vorteil des Lorentz-Prozesses effektiv genutzt und Exergieverluste bei der Wärmeübertragung minimiert werden.

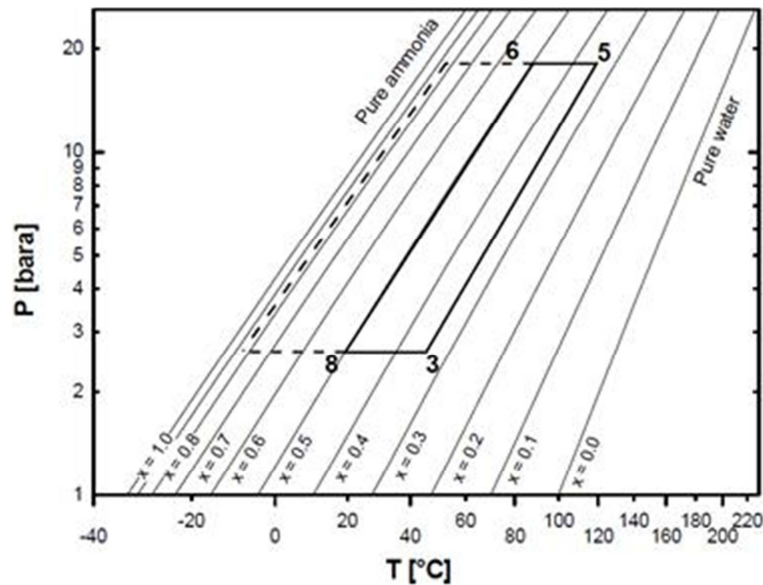


Abbildung 2.10: Temperaturgleitregelung aufgrund veränderter Konzentrationen, bei konstantem Druckniveau. (Nordvedt, 2005, S.22)

Der Lorentzprozess

Der Prozess nach Lorentz basiert auf der Tatsache eines gegebenen Temperaturgleits bei der Wärmeübertragung. Da sich während der Absorption bzw. Desorption die Sättigungstemperatur im Laufe der Stoff- und Wärmeübertragung ändert, kommt es, anders als bei Kompressionswärmepumpen mit reinen Stoffen als Kältemittel, zu einem Temperaturgleit auf der Lösungsseite während der Wärmeübertragung. Werden bei der Ab- bzw. Desorption die Temperaturdifferenzen von Lösungsseite und Wärmequellen-/senkenseite aufeinander abgestimmt, können Exergieverluste bei der Wärmeübertragung minimiert werden. Abbildung 2.11 zeigt den Prozess im Vergleich zum Carnot-Prozess durch die Darstellung im T-s-Diagramm. (Cube et al., 1997, S.125ff)

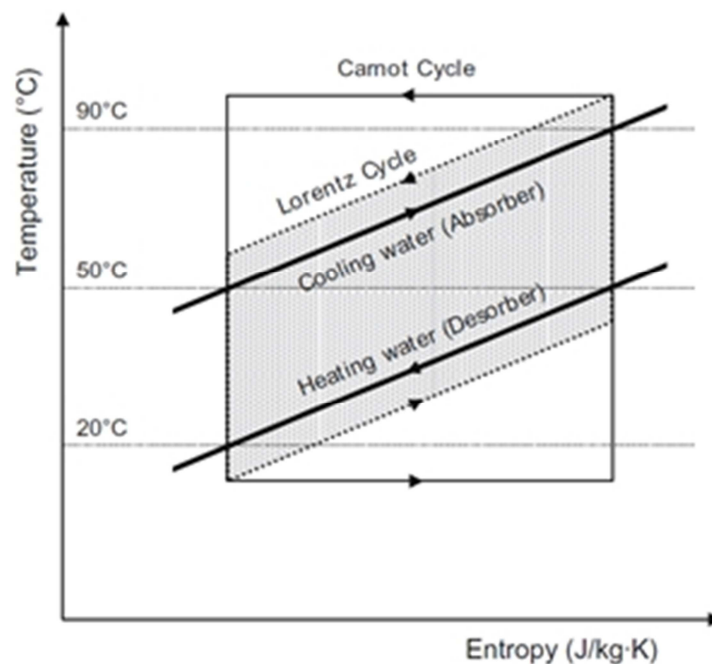


Abbildung 2.11: Temperaturgleit des Lorentz-Prozesses im Vergleich zum Carnot-Prozess (Kim et al., 2010, S.118)

2.4.3 Effizienzkennzahlen

Zur Beurteilung der Effizienz wird gewöhnlich ein Wirkungsgrad mit dem Verhältnis von Nutzen zu Aufwand, wie in Gl. 2-1 dargestellt, angegeben. Da die gesamte aufgewendete Energie immer höher als die nutzbare Energie ist, kann definitionsgemäß der Wirkungsgrad nicht größer als eins sein.

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad \text{Gl. 2-1}$$

In der Kälte- und Wärmepumpentechnik wird diese Definition, vom Verhältnis von Nutzen zu Aufwand, im COP (Coefficient Of Performance) zum Ausdruck gebracht und ist üblicherweise größer als eins, da der Beitrag der aus der Umgebung zu- bzw. abgeführten Wärmemenge nicht als Aufwand gewertet wird. Für Heiz- bzw. Kühlanwendungen entstehen unterschiedliche Betrachtungsweisen von Nutzen und Aufwand eines Kreislaufes, was zu zwei Definitionen des COP führt, eine für Kälteanlagen und eine für Heizanwendungen. Der für hybride Wärmepumpen verwendete COP_H definiert die Wärmeabgabe des Prozesses auf Hochtemperaturniveau und wird durch die elektrische Arbeit des Verdichters und der Kreislaufpumpe als Aufwand angetrieben. In Gl. 2-2 ist der grundlegende COP_H einer hybriden Wärmepumpe angegeben. Zu beachten ist, dass zusätzlich nutzbare Energie aus weiteren Komponenten, bspw. bei Bigeneration von Wärme und Kälte sowie weitere Aufwendungen dementsprechend in der Gleichung berücksichtigt werden müssen.

$$COP_H = \frac{\dot{Q}_{ABS}}{\dot{W}_C + \dot{W}_P} \quad \text{Gl. 2-2}$$

Im Vergleich hierzu sind in Gl. 2-4 und Gl. 2-3 ergänzend die Leistungszahl für reine Kompressions- und reine Absorptionsmaschinen, wie in Abbildung 2.1 und Abbildung 2.2 dargestellt, angeschrieben. Es ist ersichtlich, dass bei Kompressionsanlagen nur eine zugeführte Leistung (die des Kompressors) und, verglichen zu Absorptionsmaschinen die zusätzlich zur elektrischen Pumpleistung Wärmeenergie im Generator benötigen, eine nutzbare Wärmeleistung (die des Kondensators) entsteht.

$$COP_{H,C} = \frac{\dot{Q}_{CON}}{\dot{W}_C} \quad \text{Gl. 2-3}$$

$$COP_{H,A} = \frac{\dot{Q}_{CON} + \dot{Q}_{ABS}}{\dot{Q}_{GEN} + \dot{W}_P} \quad \text{Gl. 2-4}$$

2.5 Das Arbeitsmedium

Die in der Versuchsanlage eingesetzte, aus Lithiumnitrat (LiNO_3) und Ammoniak (NH_3) bestehende Arbeitsstoffpaarung ist im Vergleich zu weit verbreiteten Stoffkombinationen, wie z.B. Ammoniak/Wasser ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) noch nicht sehr praxiserprobt. Obwohl $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ als Arbeitsmedium einige spezielle Anforderungen an den Kreislauf bzw. an die Prozessführung stellt, bietet es, aufgrund früherer Forschungserkenntnisse, eine vergleichbar gute Alternative zur erprobten $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ Mischung. Unter ökologischer Berücksichtigung ist zu erkennen, dass sich die zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten für verschiedene Arbeitsstoffgemische für Absorptionskreisläufe auf zwei Gruppen als verwendetes Kältemittel, Ammoniak und Wasser, fokussieren. Durch die marktgängigen NH_3 Komponenten, vor allem auch durch verbreiteten Einsatz von NH_3 -Kompressoren, können Standardkomponenten verwendet werden. Im Folgenden sollen kurz mögliche alternative Stoffpaarungen für die Ammoniakabsorption dem eingesetzten Arbeitsmedium gegenübergestellt werden.

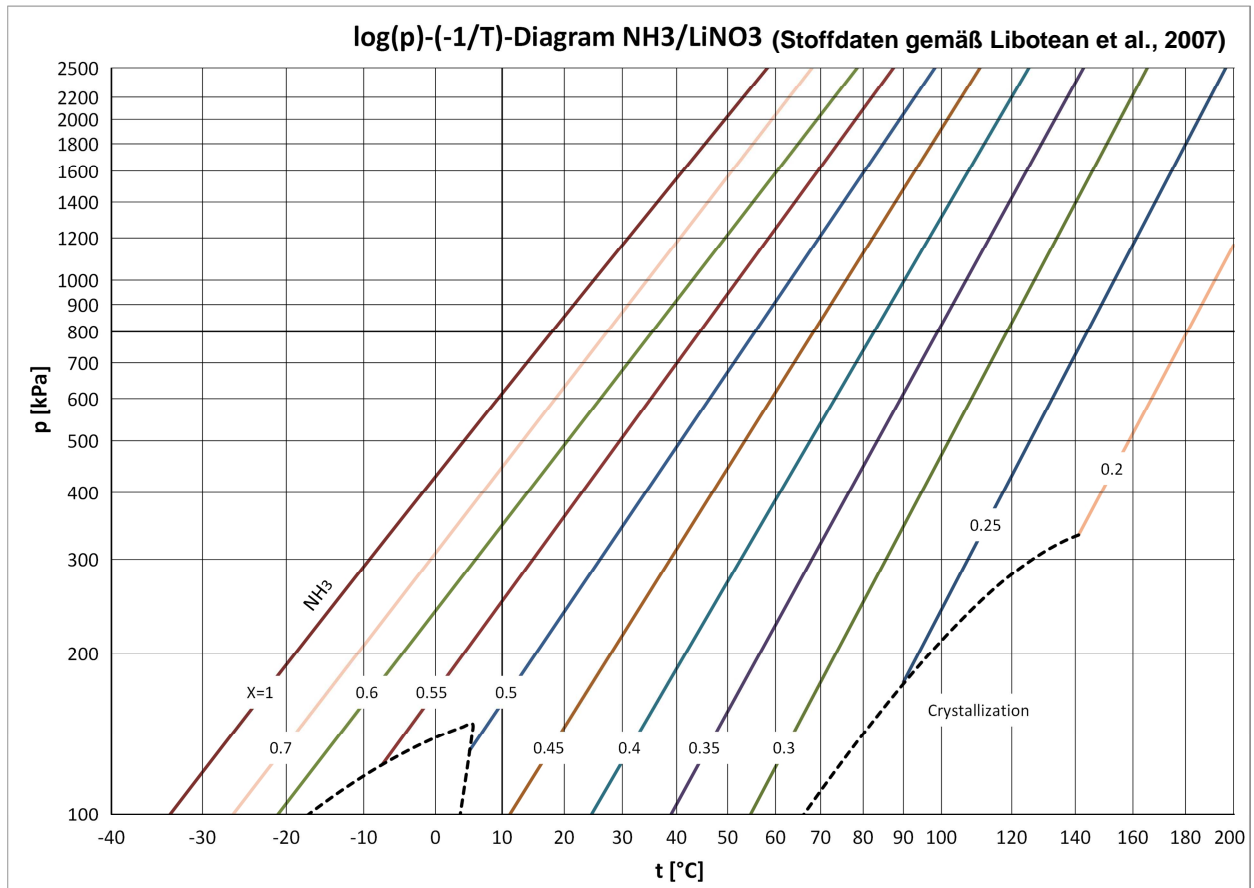
Vergleich NH₃/H₂O, NH₃/LiNO₃ und NH₃/NaSCN

NH₃/H₂O (R717/R718) ist eine praxiserprobte Arbeitsstoffmischung, die durch die niedrigste kinematische Viskosität und dem damit verbundenen niedrigstem Druckverlust und bestem Wärmeübergang aus dem Vergleich mit NH₃/LiNO₃ und NH₃/NaSCN hervorsticht und auch bei hohem Druckniveau gute COP-Verläufe besitzt. Bei der Desorption wird jedoch Wasser mit ausgetrieben, welches für die Verwendung von Standardkompressoren wieder durch Rektifikation abgeschieden werden muss. Ebenso ist, bedingt durch Öl- und Wasserabscheidung in der Gasphase, ein aufwendigeres Ölmanagement notwendig. (Rabensteiner, 2012, S.108ff)

Das Stoffpaar Ammoniak/Natriumthiocyanat überzeugt laut Simulationen mit dem besten COP und moderaten Druckverlustwerten, besitzt aber problematischere Kristallisationsbereiche als das NH₃/LiNO₃-Gemisch, die ein Auskristallisieren des NaSCN in Bereichen niedriger Drücke bei gleichzeitig hohem Temperaturniveau, wie z.B. im Desorber oder in Teilbereichen der Anlagen bei Stillstand, ermöglichen. Der vergleichsweise günstige Kristallisationsbereich des Stoffgemisches NH₃/LiNO₃ reduziert die Gefahr der Kristallisation während und nach dem Betrieb drastisch. Zudem erreicht es in Simulationsberechnungen bei gegebenen Vorlauftemperaturen die höchste Wärmesenken-Austrittstemperatur bei gutem COP. Der Nachteil dieser Kombination liegt in der höchsten kinematischen Viskosität und den folglich hohen Druckverlusten die primär im Desorber auftreten. Eine entsprechend große Desorber-Konstruktion kann diesen Verlusten entgegenwirken und verbessern ebenfalls den schlechteren Wärmeübergang der Mischung. (Rabensteiner, 2012, S.108ff)

2.5.1 Das log(p)/(-1/T)-Diagramm von NH₃/LiNO₃

Das log(p)/(-1/T)-Diagramm, aus Abbildung 2.12, zeigt das Lösungsfeld des eingesetzten Arbeitsstoffes. Zu beachten sind zwei Kristallisationsbereiche, zwischen -18°C und +4°C bei Drücken unter 0,6 bar (Absolutdruck) und dem Bereich bei steigenden Temperaturen ab ca. 70°C, bei gleichzeitig niedrigen Drücken. Im Normbetrieb sind diese Kristallisationsbereiche schwer erreichbar bzw. können durch die Betriebsführung ausgeschlossen werden. Jedoch müssen während den Stillstandszeiten und auch während des Füllens der Anlage diese Grenzen beachtet werden. Stoffdaten für Ammoniak/Lithiumnitrat sind in Arbeiten von Libotean et al. (2007 & 2008) und Infante Ferreira (1984) zu finden.

Abbildung 2.12: Raoult'sche Darstellung NH₃ – LiNO₃

2.5.2 Eigenschaften der Stoffpaarung NH₃/LiNO₃

Die wünschenswerten Eigenschaften der Arbeitsfluide sind neben chemischer Stabilität und uneingeschränkter Mischbarkeit im Arbeitsbereich auch toxikologische und ökologische Unbedenklichkeit bei der Anwendung. Der Verflüssigungsdruck des Kältemittels soll möglichst klein sein, der Verdampfungsdruck hingegen möglichst groß. Das Absorptionsmittel sollte einen geringen Dampfdruck besitzen, um möglichst reines Kältemittel im Kältemittelkreislauf zu gewährleisten.

Die als Sorptionsmittel verwendete Lösung aus LiNO₃ und NH₃ bildet den Ausgangszustand für den Lösungskreislauf, der im Sorptionsprozess im Absorber mit dem Kältemittel NH₃ angereichert wird (reiche Lösung) bzw. im Desorber wieder entladen wird (arme Lösung).

Ammoniak (NH₃)

Das in der Natur vorkommende NH₃ (R717) ist ein kostengünstiges Kältemittel, welches in der Kältetechnik häufig vor allem bei größeren Anlagen verwendet wird. Trotz der toxischen und brennbaren Eigenschaften ist es, dank seiner guten chemischen Stabilität, seinen vorteilhaften thermodynamischen Eigenschaften und der Tatsache, dass es kein Treibhauspotential bzw. kein Ozonabbaupotential besitzt, ein attraktives Kältemittel. Die im Vergleich zu anderen Kältemitteln (z.B. Wasserdampf) höhere Gasdichte und volumetrische Kälteleistung, verringert, bei gleicher Temperatur und Leistung, den Volumenstrom und ermöglicht somit eine kompaktere Konstruktion der Anlage. Die grundlegenden Stoffdaten sind in Tabelle 2-1 vermerkt. (Krug & Hainbach, 2010 S.98)

Tabelle 2-1: Stoffeigenschaften Ammoniak (Daten gemäß www.dguv.de³, 08.01.2014)

Eigenschaften	Wert	Einheit
kritischer Druck	113	[bar]
kritische Temperatur	132,4	[°C]
kritische Dichte	235	[kg/m ³]
Tripelpunkttemperatur	-77,9	[°C]
Siedetemperatur bei 1 atm	-33,41	[°C]

Der vergleichsweise hohe Isentropenexponent und die damit verbundenen hohen Temperaturen am Kompressorausstritt bei hohen Verdichtungsverhältnissen führen jedoch schneller zu Materialproblemen. Des Weiteren muss auf Materialunverträglichkeiten geachtet werden, da NH₃ beispielsweise mit Kupfer und dessen Legierungen reagiert und es in weiterer Folge zersetzt. Grundsätzlich können Edelstahl und diverse ferritische Gusswerkstoffe als Werkstoffe, sowie PTFE (Teflon) als Dichtungsmaterial uneingeschränkt eingesetzt werden. Erwähnenswert ist, dass die Verwendung von Aluminiumwerkstoffen bei Bedarf gesondert für den Einsatz mit Ammoniak und auch Ammoniak/Lithiumnitrat geprüft werden muss, da in der Literatur unterschiedliche Verträglichkeitsangaben für Aluminiumlegierungen zu finden sind. Die chemische Beständigkeit von weiteren relevanten Konstruktionsmaterialien sind in Tabelle 2-2 aufgelistet. (Krug & Hainbach, 2010 S.98f)

Tabelle 2-2: Materialbeständigkeit in Ammoniak und Ammoniak/Lithiumnitrat (Daten gemäß Bürkert, 2014, S.8)

	NBR	FFKM	CR	PTFE, PA	EPDM	PVC, PP	PPS	MS, RG	GG, GS	1.4401/ 1.4571
NH ₃ - flüssig	-	o	-	+	+	-	o	o	+	+
NH ₃ - gasförmig	-	o	+	+	+	-	o	-	+	+

Legende:

- + geringe oder keine Beeinträchtigung des Materials, beständig
- o schwacher bis mäßiger Angriff, bedingt beständig
- starker Angriff bis vollständige Zerstörung, unbeständig

NBR ... Nitrilkautschuk (Buna-N)	PA ... Polyamid
FFKM ... Perfluorkautschuk (ähnlich PTFE)	PS ... Polyphenylsulfid
CR ... Chloroprenkautschuk (Neopren)	MS ... Messing
PTFE ... Polytetrafluorethylen	RG ... Rotguss
PVC ... Polyvinylchlorid	GG, GS ... Grauguss, Stahlguss
PP ... Polypropylen	1.4401/ 1.4571 ... Edelstahl
EPDM ... Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	

³ <http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=gestisdeu:sdbdeu>

Gefahrenhinweise Ammoniak



Ammoniak ist ein verflüssigtes, schwer entzündliches Gas, das mit Wasser eine starke Lauge bildet. Es ist giftig beim Einatmen und wirkt stark ätzend auf Augen, Atemorgane und Haut. Außerdem kann die in der Umgebung rasch verdampfende Flüssigkeit Erfrierungen auf der Haut hervorrufen. Ammoniakgas ist leichter als Luft, durch seine hygroskopische Wirkung bildet es jedoch mit dem Wasserdampf der Luft einen weißen Nebel, der schwerer als Luft ist. Solche Gas/Luft-Gemische können sich beim Kontakt mit starken Oxidationsmitteln entzünden bzw. auch explodieren. (<http://www.dguv.de>; Jänner 2014).

Lithiumnitrat, LiNO₃

Das Lithiumsalz ist ein, bei Raumtemperatur und Atmosphärendruck, transparenter kristalliner Feststoff, der durch seine hygroskopische Neigung das in der natürlichen Luftfeuchte vorhandene Wasser aufnimmt und dadurch schon nach kurzen Lagerungszeiten zu einem großen Festkörper verklumpt. LiNO₃ ist nicht toxisch, jedoch sollten die im Umgang mit Chemikalien üblichen Vorsichtsmaßnahmen beachtet werden. Anzumerken ist, dass es zwar nicht brennbar ist, aber durch die entstehende Hitze im Brandfall Sauerstoff abgibt und somit eine brandbeschleunigende Wirkung hat und gefährliche Brandgase freigesetzt werden können. Die wichtigsten Stoffdaten sind in Tabelle 2-3 zusammengefasst. (Sicherheitsdatenblatt „Merck“)

Tabelle 2-3: Stoffeigenschaften Lithiumnitrat (vgl. Sicherheitsdatenblatt Merck (2014))

Eigenschaften	Wert	Einheit
Löslichkeit in Wasser bei 20°C	522	[g/L]
Schmelzpunkt	255	[°C]
Zersetzungstemperatur	> 600	[°C]
Dichte	2360	[kg/m ³]
Schüttdichte	910	[kg/m ³]
pH-Wert (50 g/L, H ₂ O, 20°C)	7 - 9	[]

Zur Materialverträglichkeit mit Lithiumnitrat bzw. Ammoniak/Lithiumnitrat kann gesagt werden, dass Buna-N und EPDM als Werkstoffe (Dichtungen) nicht empfohlen werden und aus einem projektinternen Bericht (AbsoCOOL) eine eingeschränkte Empfehlung für Aluminium besteht. Des Weiteren wird auf die Arbeiten von Heard und Ayala (2003) und Davis et al. (1921) verwiesen, die sich mit Korrosionsproblemen in Ammoniak/Lithiumnitrat-Lösungen beschäftigen.

Gefahrenhinweise Lithiumnitrat



Der bei der Verarbeitung auftretende LiNO₃-Staub reizt Augen und Atemwege und sollte nicht inhaliert oder verschluckt werden. Der Kontakt mit der Haut soll vermieden werden. Feuergefahr entsteht bei Berührung mit brennbaren Stoffen. (Roth, 2014)

2.6 Anwendungsgebiete der hybriden Wärmepumpe

Im Vergleich zu konventionellen Systemen bietet die hybride Wärmepumpe eine Alternative die speziell bei industriellen Hochtemperaturanwendungen (Temperatur der Wärmesenke $>100^{\circ}\text{C}$), Anwendungsmöglichkeiten findet. Begründet durch den in Relation kostenintensiveren Konstruktionsaufwand kleinerer Anlagen, besteht diese Wettbewerbsfähigkeit vor allem bei mittleren bis größeren Anlagen. Gründe für hybride Wärmepumpen sind wie folgt zu nennen:

- Hohe Temperaturniveaus der Wärmesenke sind im Vergleich zu Kompressionskälteanlagen bei gleichzeitig moderatem Druckniveau einstellbar. Es können dabei beispielsweise Temperaturen deutlich über 100°C bei Drücken unter 20 bar erreicht werden.
- Möglichkeit der Leistungsänderung des Prozesses durch Variation des Druckniveaus oder der Lösungskonzentration im Betrieb.
- Annäherung an den Lorentz-Prozess und höhere Leistungszahlen durch gleitende Temperaturen im Absorber und Generator. Da die Wärmeübertragung auf der Wasserseite zumeist ebenfalls mit einem Temperaturgleit erfolgt, kommt es zu einer exergetischen Wirkungsgradverbesserung bei der Wärmeübertragung.
- Bigeneration von Wärme (Absorber) und Kälte (Desorber) durch eine Anlage und aus einer gemeinsamen Wärmequellen- und Wärmesenkenspeisung möglich.

Anlagenhersteller und Forschungsgebiete zur hybriden Wärmepumpe

In diesem Abschnitt werden recherchierte Aufbauten hybrider Wärmepumpen von Firmen und Forschungseinrichtungen vorgestellt, um so die Anwendungs- und Einsatzbereiche erfassen zu können.

Die wenigen, spezialisierten Hersteller bieten Systeme mit Ammoniak/Wasser-Kreisläufen an. Abbildung 2.13 zeigt ein Schaltschema, dass von dem Unternehmen „Cooltec“ (Estland) und auch in ähnlicher Form von dem norwegischen Unternehmen „Hybrid Energy“ beworben wird. Die Grundlage all dieser Kreisläufe bildet der in Kap. 2.4.1 beschriebene Osenbrück-Kreislauf.

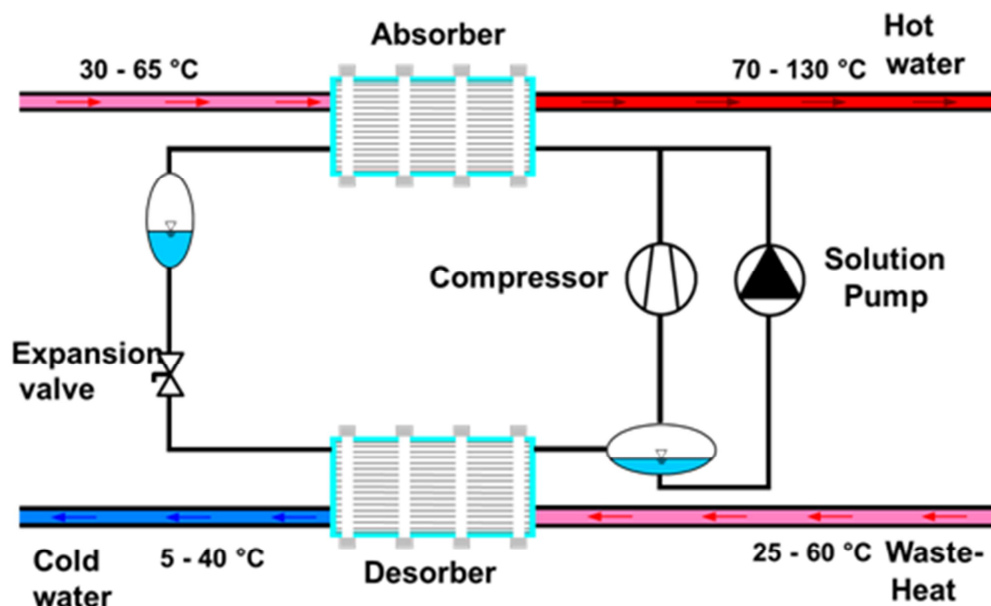


Abbildung 2.13: Schaltschema Fa. „Cooltec“ (www.cooltec.ee⁴, 25.02.2014)

⁴ <http://www.cooltec.ee/eng/hybrid-heat-pumps/>

Durch die mittlerweile ausgereiften Anlagenkonzepte von NH₃/H₂O –Systemen konnte bereits eine Vielzahl von Referenzanlagen für die unterschiedlichsten Industriezweige realisiert werden. Fernwärmeanwendungen, Lebensmittelindustrie, Klärwasseranlagen oder auch Anwendungen in der chemischen Industrie haben sich als potentielle Einsatzgebiete ergeben. Die Anlagen ermöglichen durch ihren Einsatz in Branchen wie beispielsweise der Fischfutterindustrie thermische Energieeinsparungen von 25 - 35 %, bezogen auf die gesamte in der Produktion eingesetzte Energie. In Schifffahrtsanwendungen oder auch auf Ölförderplattformen können kurze Amortisationszeiten von bis zu vier Monaten ermöglicht werden. (Hybrid Energy Europe, 2014. S.18-27)

Abbildung 2.14 zeigt tabellarisch die Daten von Referenzbauten der Firma „Hybrid Energy“. Auffallend ist, dass die ein- bzw. zweistufig verdichtenden Aufbauten für Wärmesenktemperaturn < 90°C und vorwiegend in Leistungsbereichen über 300 kW eingesetzt werden. Die Anlagen zeichnen sich durch Betriebsdrücke unter 25 bar und den Einsatz von Standard-Industriebauteilen aus.

Name	Country	Type	Design Temp des. Heat source	Design Temp abs. Heat sink	kW	Actual COP	Commissioning date	Running time
Dynea	Norway	1-stage	18/11	12/20	416	12,9	2013	500
Arla, Arinco	Denmark	2-stage	45/22	55/85	1240	4,6	2012	3000
BEVAS, Bekkelaget	Norway	1-stage	40/20	60/70	1100	4,5	2009	10000
IFE PT bygg	Norway	1-stage	52/42	60/80	150	5	2009	1000
Nortura, Tønsberg	Norway	1-stage	49/40	50/87	470	5,1	2008	19000
Nortura, Egersund	Norway	2 stage	17-25	15/86	500 275	4,5 5,5	2008	20000 15000
Nortura Rudshøgda	Norway	1-stage	49/40	50/87	650	5,2	2007	28000
Tine, Nærbo	Norway	2-stage	50/15 35/15	55/85	350	4,6	2002	30000

Abbildung 2.14: Referenzanlagen der Fa. „Hybrid Energy“ (Hybrid Energy Europe, 2014, S.15)

Vergleichbare Forschungsaufbauten sind im Rahmen von Arbeiten des IFT (Institut für Thermodynamik) der Leibniz Universität Hannover und durch das Institute of Energy Research in Korea entstanden. In Folge des aktuellen Forschungsprojektes zur standardisierten Auslegung von Plattenwärmeübertragern für Ammoniak-Wasser-Gemische bspw. in hybriden Anlagen, wurde am IFT Hannover ein Versuchsstand einer Ammoniak/ Wasser-Anlage mit 40 kW Nennheizleistung aufgebaut, welcher 2013 in Betrieb genommen wurde (siehe Abbildung 2.15). (IFT Hannover, 2014)

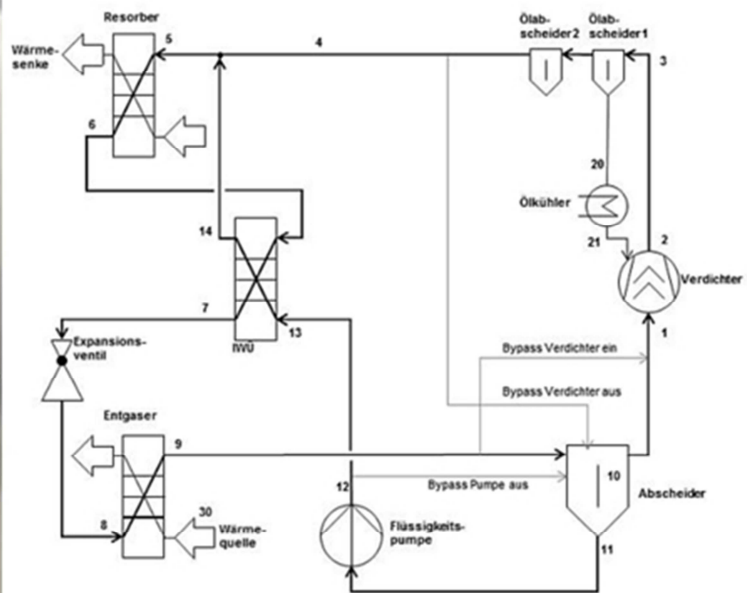
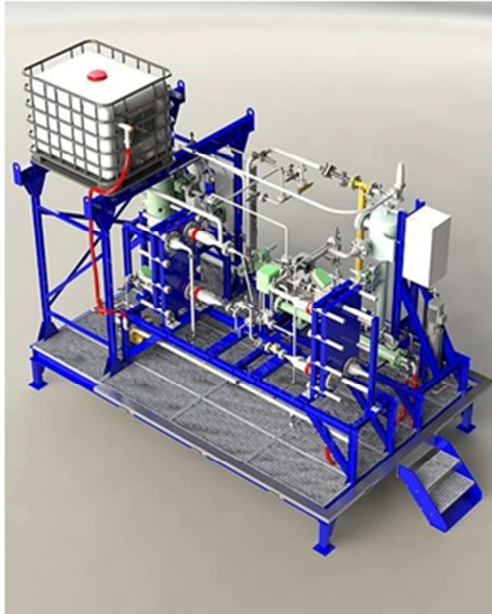


Abbildung 2.15: Versuchsstand und Schaltschema der hybriden Ammoniak/ Wasser-Wärmepumpe am IFT Hannover (www.ift.uni-hannover.de⁵, 23.03.2014)

Mit dem Ziel konventionelle Warmwasserboiler, zur Bereitstellung von 90°C heißem Wasser für industrielle Anwendungen zu ersetzen, konzipierten Kim et al. (2010) eine Anlage im kleinen Leistungsbereich. Der realisierte Prototyp der 2-stufigen, 10 kW Versuchsanlage, die ebenfalls mit der Stoffpaarung Ammoniak/Wasser operiert, wurde sechs Monate lang betrieben. Die dabei aufgetretenen kritischen Probleme, wie Gasseparation (Rektifikation) konnten festgestellt und behoben werden. Des Weiteren wurde das Betriebsverhalten bei unterschiedlichen Mischungs-Konzentrationen beobachtet, mit der Erkenntnis, dass für die optimale Auslegung eines Betriebspunktes die Startkonzentration (Füllkonzentration) der Anlage entscheidend ist. (Kim et al., 2012, S.17f)

2.7 Forschungsprojekte zu Anlagen mit Ammoniak/ Lithiumnitrat

Kürzlich veröffentlichte Arbeiten zu Forschungsanlagen mit dem eingesetzten Stoffarbeitsmedium $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ wurden recherchiert und sind im Folgenden kurz angeführt.

Rivera et al. (2011) evaluierten ein System mit Ammoniak/Lithiumnitrat für die solare Eisherstellung, die über zylindrische Parabolkollektoren mit einer Fläche von 2,5 m² als Wärmequelle, pro Tag 8 kg Eis bereitstellte.

Solche Anlagen bieten eine technologische Möglichkeit zur solaren Kälteerzeugung besonders in Regionen ohne bzw. mit schlechter elektrischer Infrastruktur. Vergleichend zu Rivera entwickelten Moreno et al. (2011) ein gleichwertiges System mit dem Stoffgemisch aus $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3/\text{H}_2\text{O}$, was bei gleichen Parametern eine COP-Steigerung von 24 % verglichen zum Einsatz mit $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ brachte.

Zamora et al. (2011) beschäftigen sich mit der Konstruktion einer kompakten Absorptionswärmepumpe für den Leistungsbereich (Kühlleistung) von etwa 11 kW. Der verwirklichte Prototyp der Anlage, die mit Ammoniak/Lithiumnitrat als Arbeitsstoffgemisch operiert, wurde drei Jahre getestet.

Im Rahmen einer Arbeit zu Absorptionswärmepumpen mit Booster-Kompressor zwischen Verdampfer und Absorber machten Ventas et al. (2012) experimentelle Untersuchungen an einer derartig aufgebauten Anlage (< 10 kW Kühlleistung) mit Plattenwärmetauschern als Ab-

⁵ <http://www.ift.uni-hannover.de/5.html>

bzw. Desorber und $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ als Arbeitsstoffgemisch. Bei dieser Arbeit wurde erkannt, dass der Wirkungsgrad des Kompressors ein Schlüsselparameter für die Effizienz der Anlage darstellt.

Ayala et al. (1997) untersuchten den Aufbau einer alternativen Kombination einer Absorptions- und Kompressionswärmepumpe (mit einem gemeinsamen Kondensator und Verdampfer) mit $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$. Ein Vertikal-Rohr-Wärmetauscher fungierte hier als Absorber und lieferte 7 kW Wärmeleistung.

3 AUFBAU DES VERSUCHSSTANDES

Im folgenden Kapitel wird der Versuchsstand der Kompressions-Absorptions-Wärmepumpe genauer erklärt. Es wird detailliert auf das Prozessschema eingegangen und die verbauten Komponenten, konstruktiven Besonderheiten sowie bestimmte Details der Konstruktion werden beschrieben.

3.1 Prozessschema

Durch die vereinfachte Darstellung des Prozessschemas der Anlage in Abbildung 3.1, können die verschiedenen zusammenhängenden Kreisläufe des Schaltschemas nachvollziehbar veranschaulicht werden. Der gesamte Kreislauf wird in Abbildung 3.2, zur besseren Erläuterung, in kleinere Teilkreisläufe unterteilt, dem Lösungskreislauf, dem Kältemittelkreislauf sowie den hydraulischen Wasserkreisläufen der Wärmesenke bzw. der Wärmequelle. Des Weiteren wird beim Lösungskreislauf zwischen einem Teilkreis mit armer und reicher Lösung unterschieden. Der in den Abbildung 3.1 bzw. Abbildung 3.2 dargestellte Ölkreislauf wird in Kap. 3.2.3 gesondert erläutert.

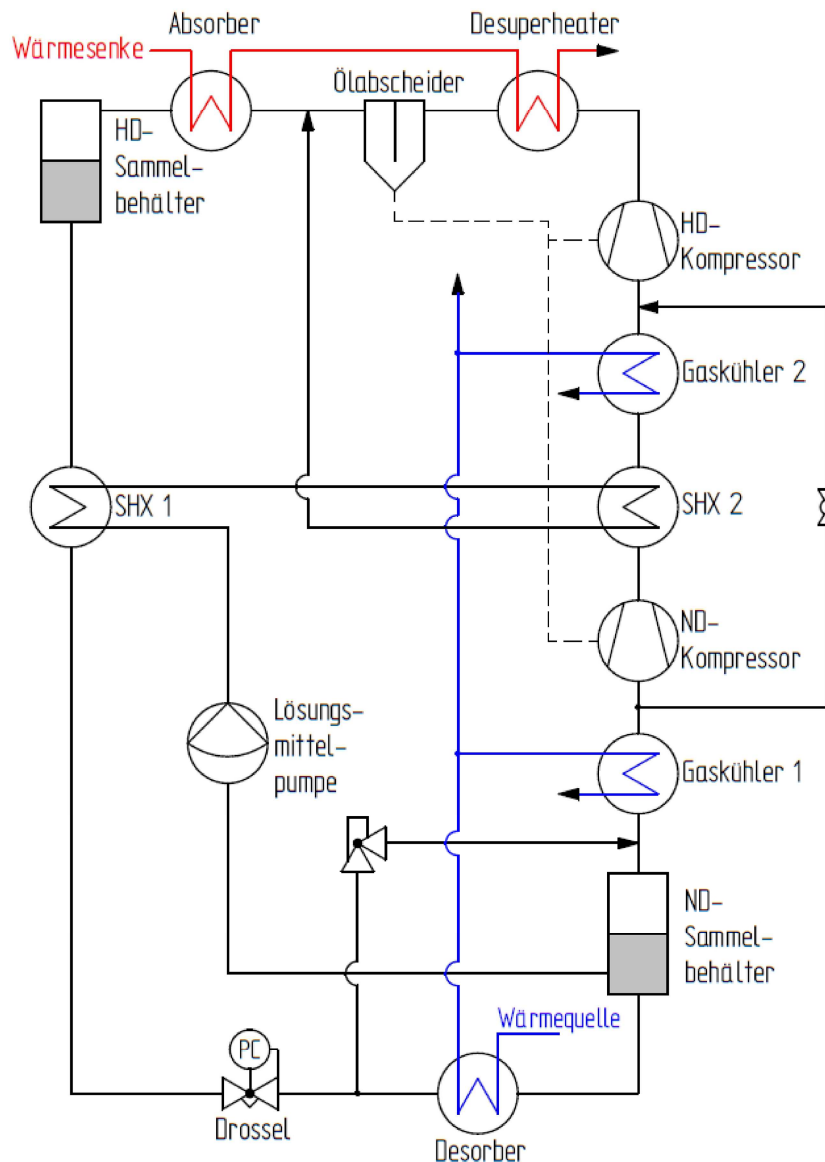


Abbildung 3.1: Vereinfachter Kreislauf der Absorptions/Kompressions-Versuchsanlage

Ausgehend von reinem, im Sammelbehälter armer Lösung (PSAC) separiertem, NH_3 -Dampf wird der Kompressionskreislauf (im Bild grün dargestellt) beschrieben. Das Gas, welches sich auf Desorber Austritts-Temperaturniveau befindet, durchströmt den Gaskühler-Wärmetauscher (AUX1), wo es zur Senkung der Kompressor-Ein- und in weiterer Folge der Kompressor-Austrittstemperatur von „kaltem“ Wasser, kommend vom Desorber, gekühlt wird, um anschließend die erste Verdichterstufe durch den Niederdruckkompressor (LPC) zu durchlaufen.

Um das, in Folge der Kompression erhitze Ammoniak zwischenzukühlen, wird dieses durch einen Kältemittel-Lösungswärmeübertrager (SHX2) geführt, wo ihm Wärme durch die, dem Absorber zufließenden armen Lösung entzogen wird. Im nachfolgenden Gaskühler (AUX2) wird das gasförmige Kältemittel wiederum durch „kaltes“ Wasser, kommend vom Desorber, gekühlt (analog zu AUX1).

Ein manuell schaltbarer Kältemittel-Bypass, der sowohl den SHX2 und den zweiten Gaskühler umgeht, ermöglicht den Betrieb der Anlage mit einstufiger Kompression durch den Hochdruckverdichter.

Möglicherweise durch die Zwischenkühlung kurzzeitig entstandenes Ammoniakkondensat (relevant vor allem bei Betriebsstart) wird im Flüssigkeitsabscheider abgeschieden. Danach kann das gasförmige NH_3 die Hochdruckkompressionsstufe durchlaufen. Beim Verlassen des Hochdruckkompressors (HPC) erreicht das Kältemittel wiederum hohe Kompressor-Austrittstemperaturen. Im Desuperheater (SUP) wird es durch den Wärmeaustausch mit Wasser der Wärmesenke nach dem Absorber gekühlt. Das durch die Kompressoren in den Kreislauf gelangte Öl wird nachfolgend durch zwei Ölabscheider abgeschieden und das annähernd reine Kältemittel kann anschließend in den Absorber geleitet werden.

Vor dem Absorber wurde ein Hochdruckpufferbehälter vorgesehen, welcher gemeinsam zum installierten Rückschlagventil einen Lösungsrückfluss verhindern soll. Von dort führt eine mehrfach absperrbare Bypassleitung über ein NH_3 -Sammelreservoir (Gasflasche) zurück in den Niederdruckbehälter (PSAC). Diese kann dazu verwendet werden NH_3 dem Kreislauf zu- bzw. aus dem Kreislauf abzuführen oder den Kältemittelkreislauf bspw. beim Startvorgang gesondert anzufahren.

Das Kältemittel wird nun weiter in den Eingang des Absorbers gedrückt. Dort mischt es sich mit der vom Kältemittel-Lösungswärmetauscher (SHX2) kommenden armen Lösung und wird im Absorber schließlich absorbiert. Die im Absorber durch NH_3 Anreicherung entstehende Lösungswärme wird durch den im Gegenstrom geführten Wasserkreislauf im als Absorber konzipierten Plattenwärmetauscher abgeführt. Dieser hydraulische Kreislauf zur Wärmeabfuhr entspricht in der realisierten Anwendung, gemeinsam mit dem in Serie gekoppelten Desuperheater, der Wärmesenke.

Die aus dem Absorber fließende reiche Lösung sammelt sich in einem Lösungsmittelsammelbehälter auf Hochdruckniveau (RSAC), von der die Flüssigphase anschließend über den wärmeabführenden Lösungswärmetauscher (SHX1), der Wärme an die, dem Absorber zufließende, arme Lösung überträgt, in ein Expansionsventil gelangt. Die im Hochdruckteil befindliche Lösung expandiert durch das Ventil und strömt über den Sammelbehälter vor dem Desorber (MSAC) nachfolgend in den Desorber, wo der Lösung infolge der Wärmezufuhr durch die Wärmequellen gasförmiges Ammoniak ausgetrieben wird und somit wieder eine ammoniakarme Lösung entsteht, die weiter in den Sammelbehälter der armen Lösung auf Niederdruckniveau gelangt um dort die Phasentrennung zu gewährleisten.

Dieser Behälter (PSAC) ist durch fünf Leitungen in den Kreislauf eingebunden. Diese sind die eben erwähnte Zuführung der armen Lösung und des ausgetriebenen, gasförmigen Ammoniaks aus dem Desorber, die Abführung der Gasphase zum Niederdruckkompressor (Ausgangspunkt

des Kompressionskreislaufes), die Abführung der armen Lösung zur Lösungsmittelpumpe (Ausgangspunkt des Lösungskreislaufes) sowie eine Zuleitung aus dem Kältemittelreservoir (bzw. dem Gas-Bypass) und eine Bypass-Gasüberleitung aus dem Behälter (MSAC) nach der Lösungsdrossel (STH) (welcher zur möglichen Phasentrennung vor dem Desorber dient).

Ausgehend von der Abführung der armen Lösung wird diese von der Lösungsmittelpumpe (LSP) angesaugt und durch die beiden bereits zuvor erwähnten Lösungsmittelwärmetauscher (SHX1, SHX2) gefördert. Durch die übertragene Wärme der reichen Lösung bzw. des verdichteten Ammoniaks nach der Niederdruckkompression, wird die arme Lösung vor dem Absorber vorgewärmt und nachfolgend wird im Absorber das einströmende NH_3 absorbiert und der Kreislauf schließt sich.

Der hydraulische Kreislauf ist in zwei voneinander getrennte Teilkreisläufe unterteilt, die als Wärmesenke und Wärmequelle für den Prozess dienen und im Versuchsaufbau an die verfügbaren Infrastrukturleitungen am IWT angeschlossen sind. In beiden kann, voneinander unabhängig, der Volumenstrom und das Temperaturniveau eingestellt werden.

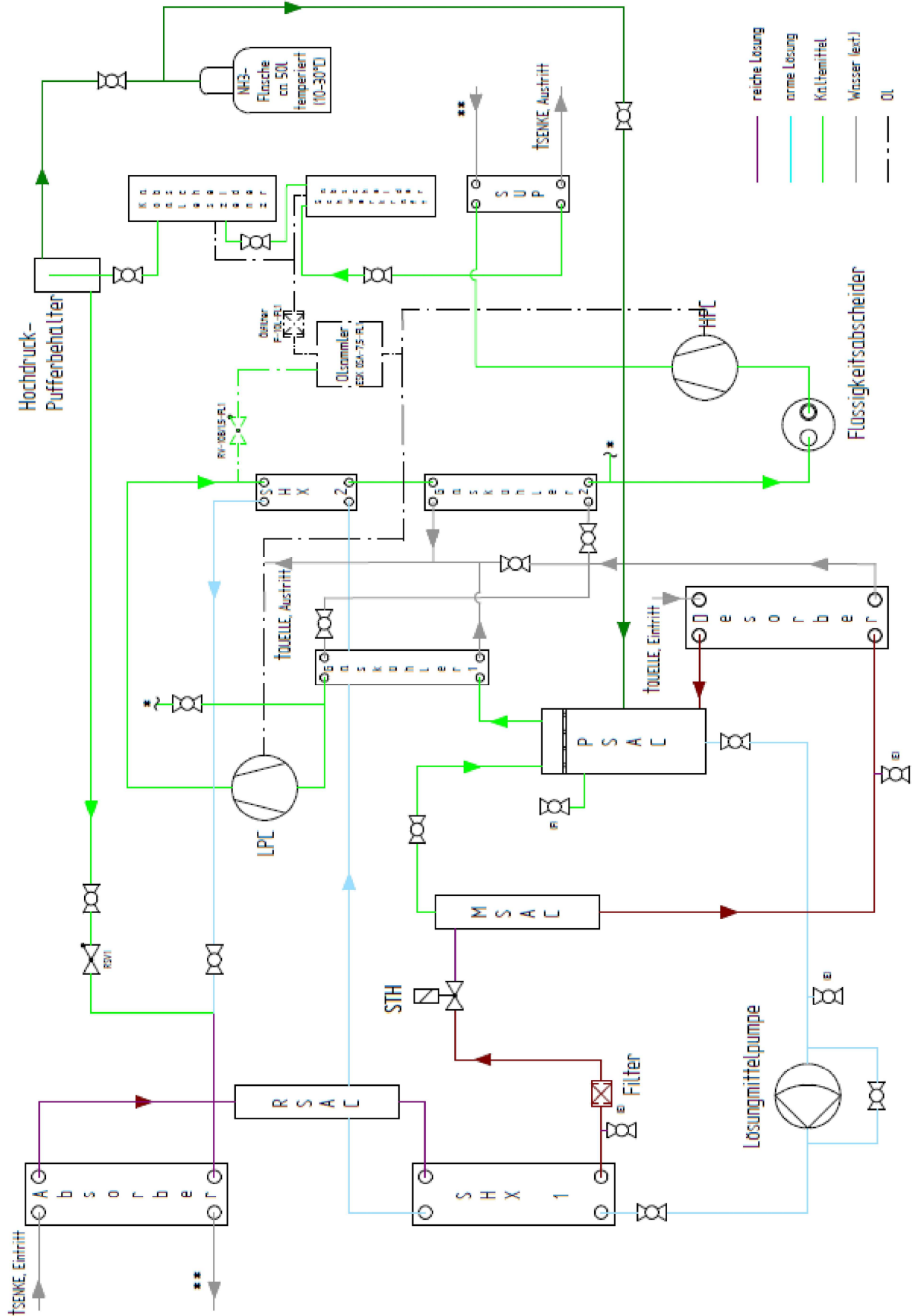


Abbildung 3.2: Schema des Prozesskreislaufs der Versuchsanlage

3.2 Kompressionskreislauf

Das im Kompressionskreislauf umlaufende Kältemittel wird, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, im Sammelbehälter (PSAC) auf Niederdruckniveau separiert und durch eine zweistufige Verdichtung mit anschließender Ölabscheidung sowie durch diverse Wärmeübertrager in den Absorber geführt. Dieser auf alle drei Druckniveaus verteilte Kältemittelfluss wird durch die nachfolgend beschriebenen Komponenten bewerkstelligt.

3.2.1 Kompressor

Beide Kältemittelkompressoren für Hoch- und Niederdruckkompression wurden von der Firma „Frigopol“ zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 3.3). Es handelt sich jeweils um einen frequenzgesteuerten 3-Zylinder-Hubkolbenverdichter in halboffener Bauweise, der für den Einsatz mit NH_3 konzipiert ist. Die Kolben sind horizontal sternförmig angeordnet. Durch eine Trennhaube ist der elektrische Antriebsteil des Motors von den kältemittelbenetzten Teilen des Verdichters getrennt. Diese Trennung zwischen Stator und Rotor verhindert, dass das Kältemittel mit der Kupferwicklung reagiert. Weitere Vorteile dieser Bauart sind der Wegfall von Wellendichtungen gegen Kältemittelaustritt, sowie die Austauschmöglichkeit des Stators ohne zwingendes Öffnen des Kältemittelkreislaufes. (Frigopol, 2014)

Jeder Kompressor besitzt einen Ölspiegelregulator mit Ölstandschauflas und Ölniveauüberwachung, einen Temperaturüberwachungssensor, eine Ölsumpheizung sowie „Rotalok“-Absperrventile mit Lötanschlüssen an Saug bzw. Druckseite.

In Tabelle 3-1 sind die den Datenschildern entnommenen wesentlichen Daten der eingebauten Verdichter aufgelistet. Anzumerken ist, dass die Kompressoraustrittstemperaturen durch die maximalen Einsatztemperaturen des verwendeten Öls, gemäß Auskunft von „Frigopol“, auf 140°C bis 160°C begrenzt ist.

Tabelle 3-1: Daten der Kompressoren (Typenschild „Frigopol“ Trennhaubenverdichter)

	HPC	LPC	Einheit
Typenbezeichnung	14PI-DLRD-5	24-DLRD-5,4	[]
Hubvolumen bei 1450 min^{-1}	14,35	23,57	$[\text{m}^3/\text{h}]$
Nennleistung	3,7	4	$[\text{kW}]$
Max. zul. Betriebsüberdruck	27 / 18	27 / 18	$[\text{bar}]$
Frequenzregelbereich	15 - 75	35 - 75	$[\text{Hz}]$



Abbildung 3.3: Kältemittelkompressor der Fa. „Frigopol“ (Frigopol, 2014, S.1)

3.2.2 Flüssigkeitsabscheider

Um die Effizienz der zweistufigen Verdichtung zu erhöhen und die Kompressor-Austrittstemperatur zu beschränken, wird das Kältemittel auf Mitteldruckniveau zwischengekühlt. Durch diese Abkühlung des überhitzten Gases kann es, dem jeweiligen

Betriebspunkt entsprechend, kurzfristig zur teilweisen Auskondensation und Tröpfchenbildung kommen (bspw. beim Anlagenstart), welche im folgenden Hochdruckverdichter zu Flüssigkeitsschlägen und Betriebsstörungen führen können. Deshalb wurde ein Flüssigkeitsabscheider vor den Hochdruckkompressor geschaltet. Zur zuverlässigen Rückführung des ebenfalls im Flüssigkeitsabscheider abgeschiedenen Öls ist eine Sauggasgeschwindigkeit > 7 m/s notwendig (ESK Schultze, 2014).

Tabelle 3-2: Daten des Flüssigkeitsabscheiders (ESK Schultze, 2014)

Beschreibung	Wert	Einheit
Typenbezeichnung	FA-16-FL1	[]
Volumen	2,3	[l]
Max. zul. Betriebsüberdruck	28	[bar]
Zul. Betriebstemperatur	-10 bis +100	[°C]

3.2.3 Ölmanagement

Das Kapitel Ölmanagement beschreibt den Ölkreislauf und die daran beteiligten Bauteile sowie das Öl selbst. Abbildung 3.4 gibt eine Übersicht der eingebauten Komponenten gemäß Tabelle 3-3. Zusätzlich ist hier der am Kompressor eingebaute und bereits zuvor erwähnte Ölspiegelregulator angeführt.

Tabelle 3-3: Komponenten des Ölkreislaufes

Nr.	Stk.	Typenbezeichnung	Funktion	Hersteller
1	1	OS-22F-FL1	Ölabscheider (Schwerkraft)	ESK Schultze
2	1	BOS2-22F-FL1	Ölabscheider (Koaleszenz)	ESK Schultze
3	1	OSA-7,5-FL1	Ölsammler	ESK Schultze
4	1	F-10L-FL1	Ölfilter	ESK Schultze
5	1	RV-10B/1,5-FL1	Rückschlag-/Druckventil	ESK Schultze
6	2	INT280	Ölspiegelregulator	KRIWAN



Abbildung 3.4: Teile des Ölmanagements (1 - 5: www.esk-schultze.de⁶, 6: www.kriwan.at⁷)

Ergänzend werden in der Tabelle 3-4 die empfohlenen Füllmengen der einzelnen Bauteile bei einer erstmaligen Füllung sowie die gesamte Ölmenge im System angegeben. Die Daten der Erstfüllmengen sind aus den jeweiligen Datenblättern der Komponenten der Firma „ESK Schultze“ entnommen worden. Die zulässigen Einsatztemperaturen der einzelnen Bauteile betragen 140°C bzw. Filter und Ölsammler sind für Temperaturen bis 100°C empfohlen (ESK Schultze, 2014).

⁶ http://www.esk-schultze.de/2012/Katalog/ESK_Katalog.pdf

⁷ <http://www.kriwan.at/de/download.php?publicationID=6870>

Tabelle 3-4: Öl-Füllmengen (ESK Schultze, 2014)

Bezeichnung	Füllmenge	Einheit
OS-22F-FL1	0,6	[kg]
BOS2-22F-FL1	0,6	[kg]
OSA-7,5-FL1	5,6	[l]
HPC & LPC	1,5 & 1,5	[l]
Gesamter Ölkreislauf	9,6	[l]

Ölspezifikationen

Die ölgeschmierten Verdichter benötigen ein kältemittelspezifisches Kompressoröl, das den Verdichtern als Schmierstoff der bewegten Teile dient und die Wärme dieser heißen Bauteile abführen kann. Die Mindestanforderungen für Kältemaschinenöle, unter Einwirkung von flüssigen oder gasförmigen Kältemitteln, werden in der DIN 51503 beschrieben. Hervorzuheben sind die charakteristischen Kennwerte wie Viskositätseigenschaften, die den Aufbau eines tragfähigen Schmierfilms beschreiben und die Kältemittelmischbarkeit wie auch der maximale Wassergehalt im Öl, die beide Einfluss auf die Interaktion mit dem Arbeitsmedium und somit den weiteren Kreislauf haben. (Fuchs, 2014) Weitere typische Kennzahlen sind in Tabelle 3-5 angegeben.

Tabelle 3-5: Typische Kennwerte von Kältemaschinenölen (Daten gemäß Fuchs, 2014)

Kennwerte	Norm
Farbe	DIN ISO 2049
Viskosität	DIN EN ISO 3104
Dichte	DIN 51757
Neutralisationszahl	DIN 51558-1
Wassergehalt	DIN 51777-1/-2
Pourpoint	DIN ISO 3016
Flammpunkt	DIN ISO 2592

Das verwendete qualitativ hochwertige Kompressoröl Mobil SHC 226E ist ein vollsynthetischer Hochleistungsschmierstoff, der für den Einsatz in Wärmepumpen entwickelt wurde. Seine Beständigkeit gegen Viskositätsverlust aufgrund von druckbedingter Kältemittelabsorption, ermöglicht sehr gute Lagerfilmdicken und Dichtungseigenschaften. Seine hygroscopischen Eigenschaften erfordern besondere Sorgfalt in der Handhabung und Lagerung. (Exxon Mobil, 2014). Die Spezifikationen des verwendeten Schmieröls Mobil Gargoyle Arctic SHC 226 E sind in Tabelle 3-6 aufgelistet.

Tabelle 3-6: Produktdaten SHC 226 E (Daten gemäß Exxon Mobil, 2014)

Produktdaten SHC 226E	Wert	Einheit
IOS-Viskositätsindex	68	[]
Viskositätsindex		[]
Viskosität bei 40°C	69,0	[mm ² /s]
Viskosität 100°C	10,1	[mm ² /s]
Dichte bei 15°C	0,83	[kg/dm ³]
Pourpoint	-50	[°C]
Schaumtest	10/0	[mL]/[mL]
Flammpunkt	266	[°C]

In den Kurbelgehäusen der Verdichter ist jeweils ein Ölspiegelregulator des Typs INT280 der Firma Kriwan vom Kompressorhersteller eingebaut worden die für eine Ölniveauüberwachung

und Regulierung des Ölspiegels sorgen. Sie sollen die Problematik ungünstiger Ölverteilung in Verbundanlagen (z.B. 2-stufige Verdichtung) durch aktive Speisung aus dem Ölsammelbehälter beheben. Der gemeinsam genutzte Ölsammler (ESK OSA 7,5) bildet ein ausreichendes Ölreservoir und nimmt das in den Ölabscheidern abgetrennte Öl wieder auf. Das Sammelgefäß entgast das Öl vor dem erneuten Einsatz und ermöglicht durch zwei Ölschaugläser eine grobe Abschätzung der Ölmenge im System. Zusätzlich erfolgt eine Kühlung durch Wärmeabfuhr an die Umgebung.

Die ebenfalls vom Hersteller, nachträglich eingebaute Ölumpfheizung gewährleistet eine ausreichend hohe Viskosität des Öls, die vor allem beim Anfahren bei gleichzeitig niedrigen Umgebungstemperaturen notwendig ist. Bei erstmaligem Anfahren nach längerem Stillstand soll damit auch eine unzulässig hohe Anreicherung von Kältemittel aus dem Öl ausgetrieben werden und so Schaumbildung vermieden werden.

Damit keine aus den Leitungen eventuell mitgeführten Fremdpartikel in den Ölsammelbehälter gelangen, wurde ein Ölfilter im Zulauf des Ölsammlers montiert. Eine Entgasungsleitung mit eingebautem Rückschlagventil verhindert das Zurückdrücken des aus dem Kreislauf abgeschiedenen Öls aufgrund von Überdruck im Behälter bzw. ein Gasstauen in dieser Leitung. Das miteingebrachte Gas kann durch die Mitteldruck-Ausgleichsleitung über das Rückschlagventil ($\Delta p = 1,5 \text{ bar}$) zurück in den Kältemittelkreislauf strömen.

Die Abbildung 3.5 veranschaulicht den Einbauzustand einiger der zuvor beschriebenen Komponenten.

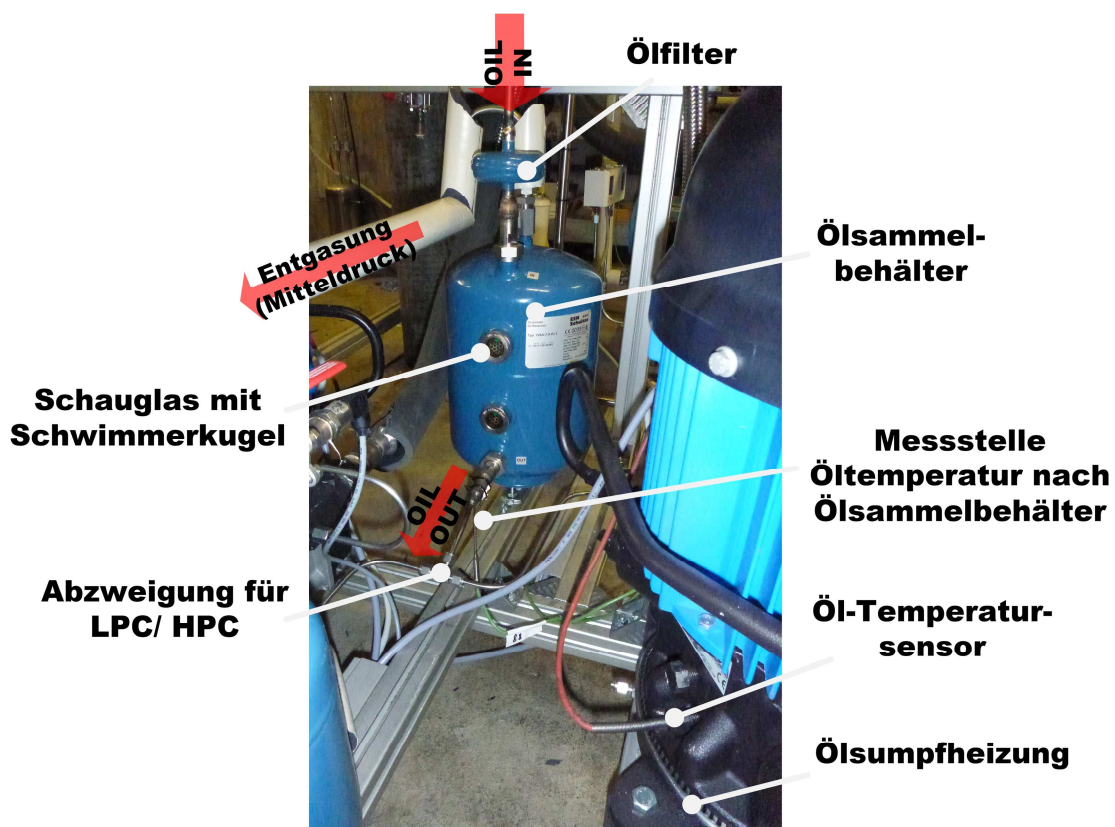


Abbildung 3.5: Bild Komponenten des Ölmanagements

Ölabscheidung

Eine Abscheidung des durch die Kompressoren in den Kompressionskreislauf gelangenden Schmierstoffs ist in Form von zwei hintereinander durchlaufenen Ölabscheidern der Firma „ESK Schultze“ verwirklicht (siehe Abbildung 3.6). Diese Abscheider trennen das ölbeladene Kältemittel nach Austritt aus der letzten Verdichterstufe, unmittelbar nach vorangegangener

Abkühlung im Desuperheater, um kein Öl in den folgenden Lösungsvorgang des Kältemittels im Absorber zu lassen. Öl das in den Lösungskreislauf gelangt kann nicht mehr oder nur mehr diskontinuierlich rückgeführt werden da, im Gegensatz zu Kompressionskältekreisläufen, keine Ölrückführung über den (Lösungs-)Kreislauf erfolgt. Überdies werden bei einem zu hohen Ölanteil im Lösungsgemisch die Stoffeigenschaften oder der Wärmeübergang in den Wärmetauschern möglicherweise ungünstig beeinflusst.

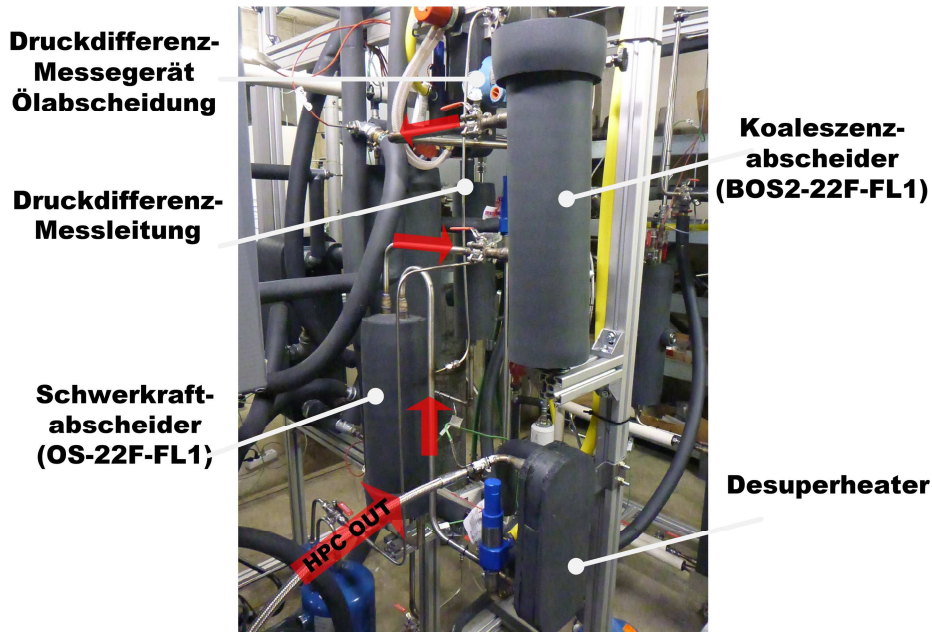


Abbildung 3.6: Bild Ölabscheidung nach dem HPC

Die beiden Ölabscheider sind mit unterschiedlichen Abscheidewirkungsgraden ausgeführt. Der Schwerkraftabscheider OS-35F trennt das mitgeführte Öl an mehrlagigen Siebkörpern sowie einem Prallblech und erreicht einen Abscheidegrad von 97 bis 99 %. Der Koaleszenzabscheider vom Typ BOS2-22F filtert die verbliebenen feinen Aerosolpartikel im Gasstrom mit Hilfe von Glasfaser-Mikrofilterelementen. Der Abscheidegrad des Filters ist dabei vom durchlaufenen Massenstrom und der durchschnittlichen Partikelgröße im Gas abhängig.

In der Abbildung 3.7 ist die Tropfengrößenverteilung bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich mit steigender Temperatur die Größenverteilung in Richtung kleinerer Partikelgrößen ändert, was direkte, negative Auswirkung auf den Abscheidegrad im Filter mit sich bringt. (ESK Schultze, 2014)

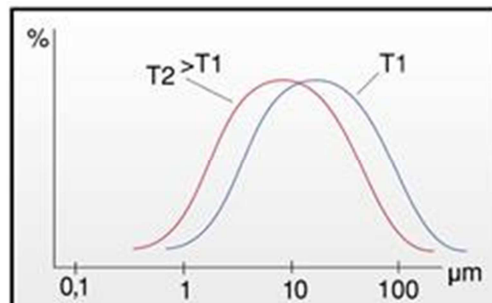


Abbildung 3.7: Tropfengrößenverteilung BOS2-22F (ESK Schultze, 2014)

Das abgeschiedene Öl wird jeweils durch eine Rückführungsleitung in den Ölsammelbehälter geleitet. Der lt. Hersteller angegebene, maximal zulässige Druckabfall für den Koaleszenz-Ölabscheider (< 1bar) soll als Richtwert für das Wechselintervall des Filterelements dienen und kann durch den an der Anlage installierten Druckdifferenzmesser ermittelt werden. Der

Koaleszenzabscheider filtert gegebenenfalls auch feste Partikel aus dem Öl-Gasstrom, ist aber nicht zur Reinigung der Anlage konzipiert. Eventuell mit dem Öl mitabgeschiedene Fremdpartikel werden im Ölfilter vor dem Sammelbehälter abgeschieden (siehe dazu Abbildung 3.5).

3.2.4 Hochdruck-Pufferbehälter

Der Hochdruck-Pufferbehälter bietet durch die unterschiedlich hohen Ammoniak Zu- und Ableitungen eine letzte konstruktive Sicherheit gegen ein mögliches Rückfließen der flüssigen Lösung aus dem Absorber in Richtung Ölabscheider und bietet außerdem Anschlussmöglichkeiten an den Kältemittelkreis vor dem Absorbereintritt. Zwei von ihm ausgehende 6 mm Druckleitungen bieten die Anbindungsmöglichkeit für die Druckdifferenzmessstelle nach der Ölabscheidung und für die Ammoniakabfuhr zum Kältemittelreservoir, welche auch als Gasbypass direkt in den Niederdruckbehälter, bspw. beim Anfahrvorgang, verwendet werden kann.

In Abbildung 3.8 ist der Aufbau des Hochdruck-Pufferbehälters dargestellt. Durch die Differenz der ein- und austretenden Rohrhöhen entsteht ein Puffervolumen für die eventuell rücklaufende, flüssige Lösung.

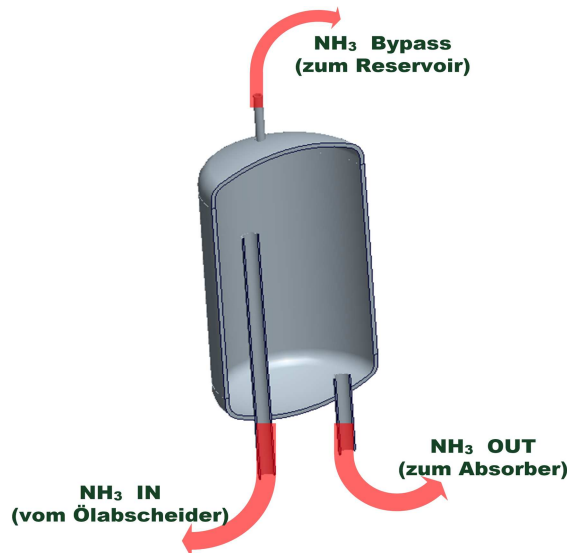


Abbildung 3.8: CAD-Schnitt Hochdruck-Pufferbehälter

3.2.5 Wärmetauscher im Kältemittelkreislauf

Der Desuperheater kühlt das verdichtete und überhitzte Gas nach der Hochdruckkompression durch Wärmeübertragung an den Wärmesenken-Kreislauf des Wassers über eine in Serie geschaltete Anbindung nach dem Absorber.

Der Lösungs-Kältemittel-Wärmetauscher (SHX1, SHX2) gleicht das Temperaturgefälle zwischen dem heißeren Kältemittel und der armen Lösung vor dem Eintritt in den Absorber an und steigert dadurch die Effizienz der Absorption.

Die Gaskühler (AUX1 & AUX2) werden dazu eingesetzt, die Verdichtungs-Endtemperaturen, durch Abkühlung des in den Kompressor eintretenden Gasstromes, noch vor Durchlaufen der Ölabscheidung, zu begrenzen. Zu diesem Zweck wurde vor jeder Verdichterstufe ein Gaskühler installiert, die aus dem Desorber austretendem Wasser der Wärmequelle gespeist werden und parallel dazu geschaltet sind.

Der Desuperheater, der SHX2 und die Gaskühler sind als Plattenwärmetauscher (PWT) der „Firma Alfa Laval“ ausgeführt, die im Kap. 3.5 gesondert beschrieben werden.

3.3 Lösungsmittelkreislauf

Der Lösungsmittelkreislauf stellt den für die Absorption und Desorption des Kältemittels notwendigen Teilkreislauf dar und wird durch die folgenden erwähnten Komponenten gekennzeichnet.

3.3.1 Lösungsmittelpumpe

Die eingebaute Kolbenmembranpumpe der Fa. „Hydra-Cell“ fördert arme Lösung aus dem PSAC in den Absorber und ist somit die treibende Kraft des Lösungsmittelkreislaufes. Die Drehzahl wird durch einen Frequenzumformer gesteuert. Die Daten der Pumpe sind in Tabelle 3-7 angeführt.

Tabelle 3-7: Daten Lösungsmittelpumpe „Hydra-Cell“ (Daten gemäß Angebot „VERDER GmbH AUSTRIA“)

	Wert	Einheit
Typenbezeichnung	G13EKSJHFEA	[]
Fördermenge bei 50 Hz	ca. 300	[l/h]
Nennleistung bei 950 min ⁻¹	0,75	[kW]
Max. Förderhöhe	83	[bar]
Max. Temperatur des Mediums	85°C	[°C]
Frequenzregelbereich	10 – 87,5	[Hz]
Max. Fördermenge	ca. 500	[l/h]

Anzumerken ist das laut Bedienungsanleitung vorgeschlagene Ölwechselintervall nach den ersten 100 Betriebsstunden (danach alle 500 oder 1000 h) und der eingebaute Schutz vor thermischer Überlastung des Elektromotors (siehe Kap. 3.6.5).

3.3.2 Absorber

Der Absorber soll den chemischen Prozess der Absorption ermöglichen und gleichzeitig die Wärmeübertragung zu der Wärmesenke ermöglichen. Das als Kältemittel verwendete Ammoniak wird von dem ammoniakarmen Lösungsgemisch aus Ammoniak und Lithiumnitrat absorbiert und gibt dabei Lösungswärme ab.

Basis der Konstruktion ist ein Plattenwärmetauscher der Firma „Alfa Laval“ (siehe Kapitel 3.5). Dieser stellt, gemäß einer dieser Arbeit vorausgegangener Auslegungsrechnung, genügend Tauschoberfläche bzw. Volumen bereit, um eine für den Gesamtprozess ausreichende Absorption und Wärmeabfuhr an die Wärmesenke, unter Berücksichtigung der Temperaturdifferenz, zu ermöglichen. Als reiner Wärmetauscher wäre er grob überdimensioniert. Die Einbringung der beiden Reaktionspartner erfolgt durch den Absorber-Einlass. Hierbei wurde das Prinzip eines Blasenabsorbers realisiert, das gemäß Vorversuchen (die dieser Arbeit vorangegangen sind) aus Gründen der besseren Phasenverteilung und Wärmeübertragung, dem des Fallfilm-Absorbers vorgezogen wurde. Die begünstigte Absorptionsrate bei höheren Gasströmen spricht ebenfalls für eine Blasenabsorption. (Lee et al., 2002, S.205)

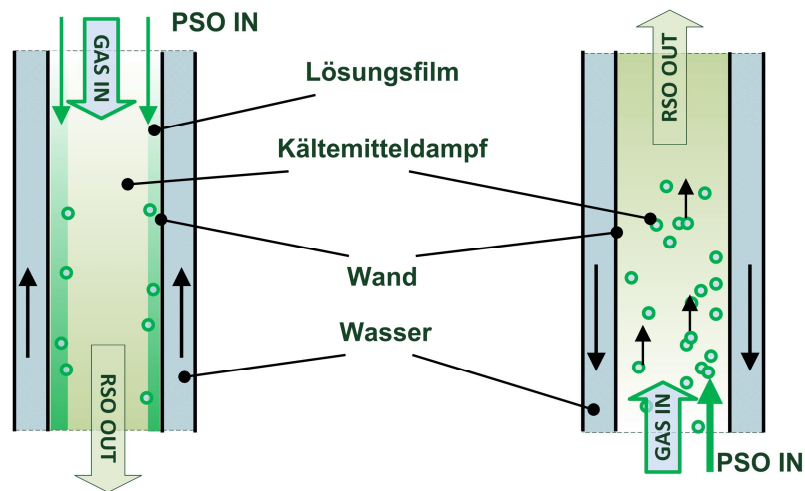


Abbildung 3.9: Fallfilm Absorber vs. Blasenabsorber

In Abbildung 3.9 sind die unterschiedlichen Funktionsweisen der genannten Absorbertypen in zwei möglichen Varianten gegenübergestellt. Der Blasenabsorber lässt Sorptionsmittel und Kältemittel in Gleichstromrichtung im untersten Teil des Wärmetauschers einströmen, sodass das gasförmige Kältemittel im flüssigen Sorptionsmittel aufsteigen kann und sich im Zuge dessen die Lösung anreichert, bzw. das Ammoniak absorbiert. Die dabei anfallende Lösungswärme wird über den gegenläufigen Wasserstrom abgeführt. Der Fallfilmabsorber lässt die flüssige Lösung, die als gleichmäßige Filmschicht an den Wandplatten herunterrinnt und gekühlt wird, mit dem zentral strömenden Gasfluss des Kältemittels reagieren.

Ergänzend sollen kurz die recherchierten Konstruktionsmöglichkeiten des Absorber-Einlasses, die im Rahmen einer Patentrecherche erkundet wurden, angeführt werden.

Ein Absorberkonzept, das in der Patentschrift vom deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt von Peter et al. (1999) veröffentlicht wurde, beschreibt eine adiabate Sprühabsorption von Kältemittel am Absorbereintritt durch die Lösungsmitteltropfen des eingespritzten Lösungsmittelnebels. Diese Konstruktion, dargestellt in Abbildung 3.10, lässt den an der Oberseite eingeleiteten Sprühnebel nachfolgend an Platten abschlagen bzw. kondensieren und ermöglicht so eine fortschreitende Fallfilm-Absorption entlang des entstehenden Lösungsmittelfilms bei gleichzeitiger Wärmeabfuhr.

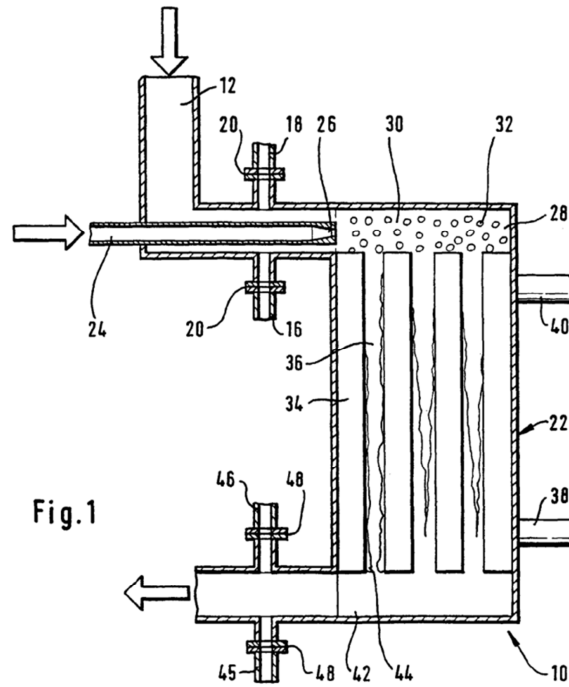


Abbildung 3.10: Absorberausführung mit eingesprühter Lösung (Peter et al., 1999, S.12)

Abbildung 3.11 zeigt die im Patent von Risberg et al. (2005) angeführte Regelungsmöglichkeit einer Blasenabsorber-Konstruktion aus geschlitzten Rohren. Durch den dementsprechenden, durch Drehung, änderbaren Öffnungsquerschnitt am Absorbereintritt lässt sich der Massenstrom bei unterschiedlichen Durchflüssen möglichst gleichmäßig verteilen. Außerdem kann durch die Anordnung und Ausrichtung der Rohre im Einlasskanal die Verteilung von Lösung und Kältemittel am Eintritt beeinflusst werden. Für diese Anwendung können Standard-Plattenwärmetauscher verwendet werden.

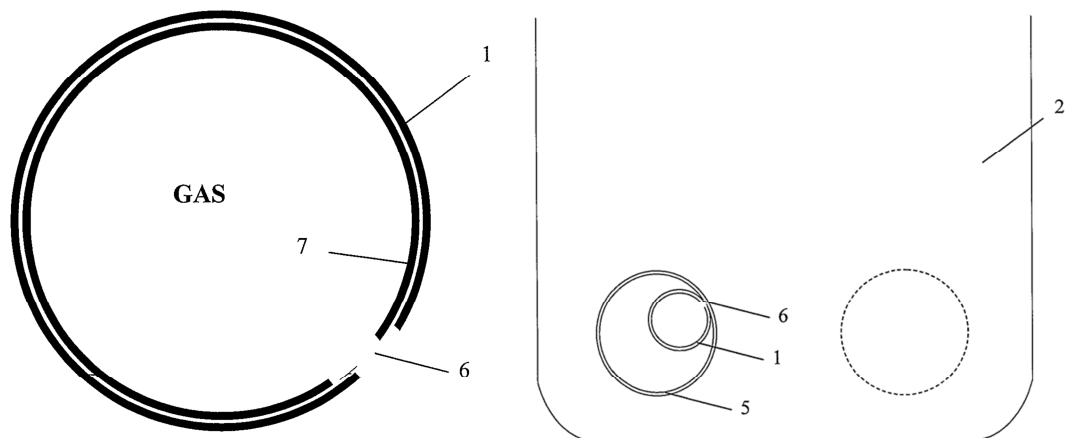


Abbildung 3.11: links: Absorbereintritt aus geschlitzten Rohren; rechts: Gerichtete Einstromung in einen Blasenabsorber (Risberg et al. 2005, Fig.5/ Fig.6)

Das in der Patentveröffentlichung von Bourouis et al. (2012) vorgestellte System einer Absorbereintritt-Konstruktion besteht aus einer in den Absorbereintrittskanal reichende Lanze durch die das Kältemittelgas über Bohrungen eingebracht wird. Die Lösung wird dabei konzentrisch zum Kältemittel in den Absorbereintritt zugeleitet. Im Wesentlichen entspricht dieses Konzept der realisierten Lanzenkonstruktion am Absorber der im Rahmen dieser Arbeit realisierten Versuchsanlage.

Die im Funktionsmuster ausgeführte Konstruktion ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Die ammoniakarme Lösung wird kurz vor der Einlassöffnung radial zur Einlassachse des Absorber-Einlasskanals eingeleitet und bildet den Großteil des im Absorber ausgefüllten Volumens. Das aus dem Hochdruck-Pufferbehälter strömende Ammoniak wird in Achsrichtung durch eine in den Absorber reichende Gas-Lanze eingebracht. Die Einstromrichtung des Gases in den Absorber wurde bei der Ausführung berücksichtigt. Ein eingebautes Rückschlagventil soll ein allfälliges Rückströmen der Lösung in die Gasleitung verhindern.

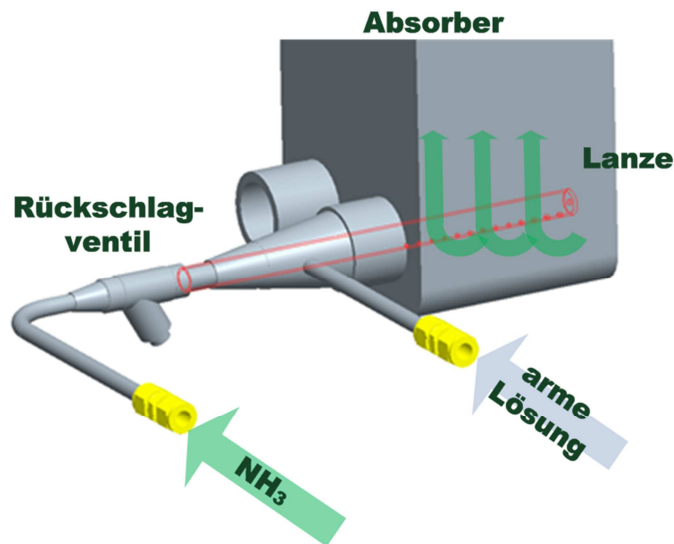


Abbildung 3.12: Fließschema im Absorber

Die Lanze selbst ist aus einem Edelstahlrohr gefertigt, an dessen Ende eine Abschlussplatte verschweißt wurde. Durch die in Achsrichtung ausgerichteten Bohrungen soll das Kältemittel gleichmäßig über die Einbaulänge ausströmen. Konstruktionsmaße können der folgenden Abbildung 3.13 entnommen werden.

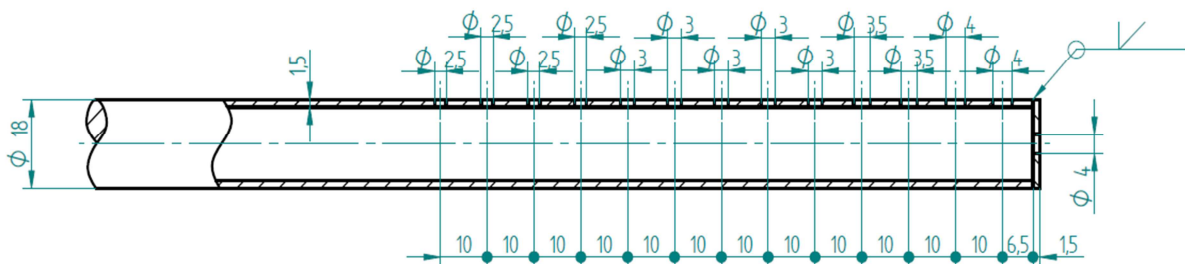


Abbildung 3.13: Fertigungszeichnung der Absorberlanze

Die Bohrungen für das ausströmende Gas werden in Strömungsrichtung zum Ende der Lanze hin größer. Diese Maßnahme soll den Druckverlust, bzw. den in Strömungsrichtung abnehmenden Kältemittelmassenstrom entlang des Rohres kompensieren und so eine gleichmäßige Ausströmung über die Lanzenlänge ermöglichen. Abbildung 3.14 zeigt die Bohrungen an der gefertigten Lanze.

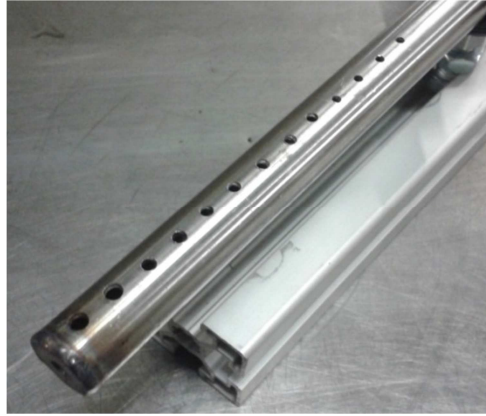


Abbildung 3.14: Bild der gefertigten Absorber-Lanze

Um die Wirksamkeit dieser Bohrungsanordnung zu überprüfen, wurde das Ausströmverhalten in einem Versuchsaufbau unter Wasser, mit Luft als Strömungsmedium, beurteilt. Die folgende Abbildung 3.15 zeigt die, mit 6 l/min luftdurchströmte Lanze unter Wasser. Die 6 l/min entsprechen hierbei in etwa dem Volumenstrom im realen Einsatz mit einem Massenfluss von 40 kgNH₃/h bei 18bar. Man erkennt eine relativ gleichmäßige Luftverteilung entlang der Lanze. Lediglich an der Stirnbohrung am Ende der Lanze nimmt der Durchfluss zufolge des Druckverlusts und der bereits zuvor erfolgten Verteilung etwas ab.



Abbildung 3.15: Aufnahme der Strömungsverteilung entlang der Lanze unter Wasser

Die Einleitungsrichtung der Gasphase im Absorber ist nicht wie in Abbildung 3.15 angedeutet, senkrecht nach oben, sondern schräg nach unten zeigend (Abbildung 3.16). So kann der sonst tote Raum unter der Einströmachse des Absorbers noch für die Reaktion genutzt werden. Durch die zusätzliche, seitwärts-gerichtete Einströmung wird das Kältemittel zentraler eingebracht und so besser über die Absorberbreite verteilt.

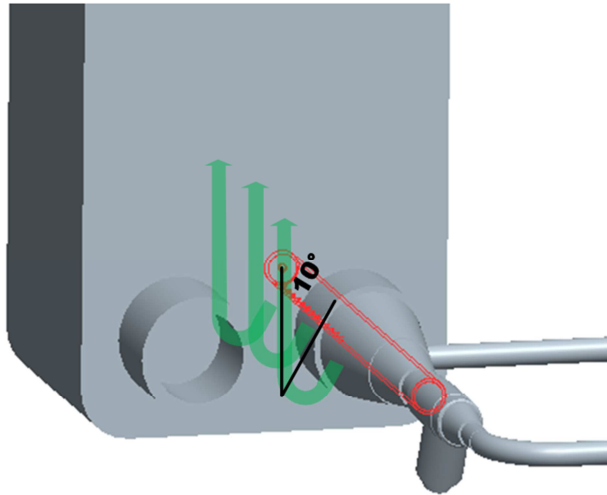


Abbildung 3.16: Ausrichtung der Einströmbohrungen der Absorber-Lanze

Abbildung 3.17 zeigt die fertiggestellte Konstruktion am bereits isolierten Absorber. Die Möglichkeit den Wärmetauscher separat zu leeren ist durch das Ablassventil (im Bild unten) gegeben.

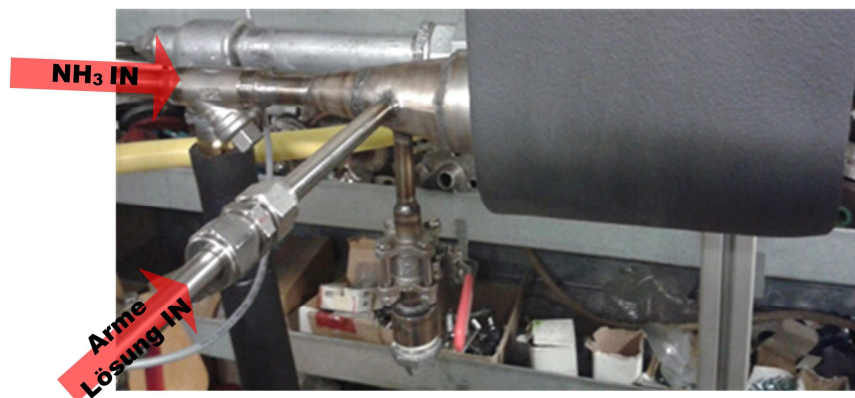


Abbildung 3.17: Bild Absorbereinlass

3.3.3 Desorber

Der Desorber (auch Generator bezeichnet) treibt das Kältemittel aus der, in Folge der Expansion abgekühlten, reichen Lösung aus, um die beiden getrennten Stoffe in die jeweiligen Teilkreisläufe weiterzuleiten. Die dafür benötigte thermische Leistung wird von der Heißwasserquelle der vorhandenen Infrastruktur über den als PWT ausgeführten Desorber übertragen. Der umfunktionierte Wärmetauscher ist deshalb, analog zum Absorber, primär für den Desorptionsvorgang dimensioniert worden. Die aus dem MSAC kommende entspannte Lösung tritt am unteren Anschluss des Desorbers ein um nach dem Desorptionsprozess erhitzt aus dem oberen Anschlussstutzen des PWT in den PSAC zu fließen.

Durch die Wärmezufuhr aus dem im Gegenstrom geführten Wärmequellenkreislauf wird das Kältemittel aus der, durch die Expansion abgekühlte, reiche Lösung, ausgetrieben. Anschließend sammeln sich beide Phasen, das gasförmige Ammoniak und die arme Lösung, im PSAC um von folgend in den jeweiligen Kreislauf zu strömen.

Für weitere Informationen zu dem eingesetzten Wärmetauscher wird auf das Kapitel 3.5 verwiesen.

3.3.4 Sammelbehälter

Die jeweiligen Drucksammelbehälter dienen als Puffer und Phasentrenner für die darin befindliche reiche Lösung auf Hochdruckniveau (RSAC), bzw. die „mittlere“ Lösung nach der Lösungsdrossel (MSAC) und die ammoniakarme Lösung auf Niederdruckniveau (PSAC) nach dem Desorber. Die aus Edelstahl geschweißten Druckbehälter bieten diverse weiterführende Anschlussmöglichkeiten, bspw. für Drucksensoren und verfügen über eine Füllstandsanzeige. Die in den Behältern eingebauten Schaugläser machen eine Sichtprüfung des Füllstandes möglich und geben auch Auskunft über mögliche Verunreinigungen in der Lösung. Daraus erkennbare Ölansammlungen, in Form einer obenauf schwimmenden Ölschicht, können in RSAC und PSAC über ein auf gleicher Höhe angebrachtes Nadelventil abgelassen werden. Weiteres Füllen des Kreislaufes mit reinem Kältemittel kann ebenfalls über diese Anschlüsse erfolgen.

Der PSAC verfügt über ein längliches Schauglas über das der sich im Betrieb ändernde Füllstand ersichtlich ist. Der Behälter bildet einen zentralen Knotenpunkt der Anlage. Über ihn finden sowohl Lösungsmittelkreislauf als auch Kältemittelkreislauf ihren gemeinsamen Ausgangspunkt. Der Füllstand der enthaltenen flüssigen, armen Lösung dient als notwendiger Puffer, von dem aus die Lösungsmittelpumpe gespeist wird. Reines, gasförmiges Kältemittel, vom Desorber und teilweise (je nach Ventilstellung der eingebauten Verbindung) auch vom MSAC kommend, wird weiter in den Kompressionskreislauf geschickt und auch die betriebspunktbedingte Zufuhr von Kältemittel in den Kreislauf, zur Regelung der Kreislaufkonzentrationen bei variablen Betriebsbedingungen, gespeist über eine Kältemittelgasflasche, schließt an den PSAC an. Ein feines Metallnetz, das im oberen Drittel des Behälters über den Querschnitt eingeschweißt ist, soll das Ansaugen von Flüssigkeitstropfen in die Zuleitung des Niederdruckkompressors verhindern. Ein Füllanschluss ermöglicht das Einfüllen der Lösung. Abbildung 3.18 zeigt die in der Anlage eingebauten Sammelbehälter.

Das in der Ammoniak-Gasleitung, zwischen MSAC und PSAC, eingebaute Stellventil ermöglicht dem, bei der Expansion ausgegasteten, Ammoniakdampf ein direktes Überströmen in den PSAC, ohne durch den Desorber zu fließen bzw. im Desorber erhitzt werden zu müssen.

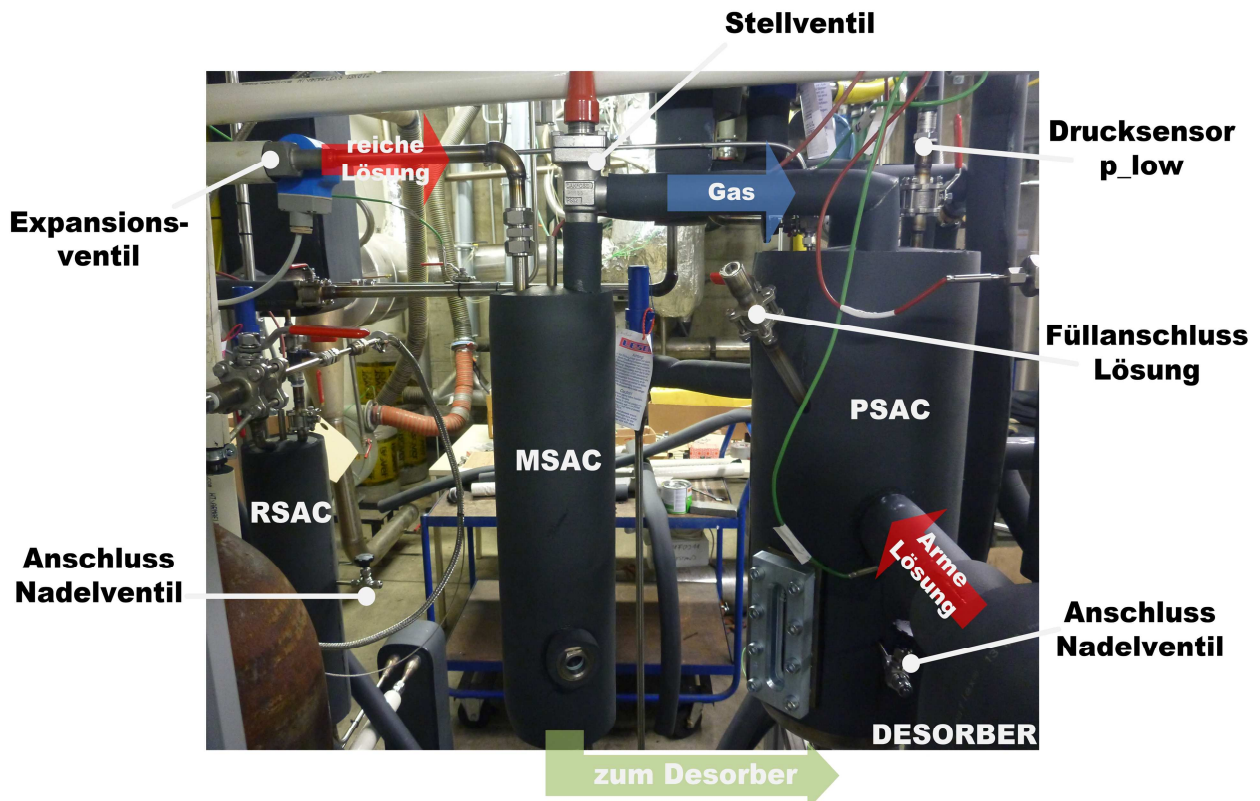


Abbildung 3.18: Bild PSAC, MSAC und RSAC

Anzumerken ist, dass alle Behälter aus Edelstahl gefertigt sind und ein Druckinhaltsprodukt < 300 bar*l besitzen. Alle Behälter wurden unter Berücksichtigung der Europäischen Richtlinie für den Druckbehälterbau ausgeführt. Weitere Daten sind aus Tabelle 3-8 zu entnehmen.

Tabelle 3-8: Daten der Sammelbehälter

Eigenschaften	RSAC	MSAC	PSAC	Einheit
Volumen	4,5	4,5	20	[l]
Auslegungsdruck	30	10	10	[bar]
Prüfdruck	40	16	16	[bar]
Anschluss-Nadelventil 6mm	1	0	1	[Stk.]

3.3.5 Expansionsventil

Das elektrisch betriebene Expansionsventil AKVA10-6 der Firma Danfoss ist als Lösungsdrossel eingebaut worden. Die, für den Lösungskreislauf notwendige Drosselfunktion wird durch eine periodische, kurzzeitige Öffnung des Strömungsquerschnittes der Drossel erreicht, was zu einer anschließenden adiabaten Entspannung mit gleichzeitiger teilweiser Kältemittelaustreibung und folglich zu einer Abkühlung der Lösung führt. Die Steuerung des Druckbereichs wird durch die Dauer der periodischen Ventilöffnungszeit bestimmt. Durch die wechselbaren Düsen im Ventilinneren kann ein breiter Leistungsbereich abgedeckt werden. Weitere Daten sind in Tabelle 3-9 gelistet.

Tabelle 3-9: Eckdaten Expansionsventil AKVA 10-6 (Danfoss, 2014 a)

Eigenschaften	Wert	Einheit
Nennleistung ¹ bei R717	40	[kW]
K _v -Wert	0,103	[m ³ /h]
Düsengröße	6	[mm]
Empfohlene Periodendauer	6	[s]
Medientemperatur ²	-50 bis 60	[°C]
Messlänge	500	[mm]
Max. Betriebsüberdruck	42	[bar]

¹ basieren auf Verflüssigungstemperatur t_k= 32°C, Flüssigkeitstemperatur t_v = 28°C, Verdampfungstemperatur t₀=5°C
² auf Anfrage bei Danfoss wurden 85°C als Obergrenze definiert

Der Massenstrom der Lösung (*m*) durch das Ventil kann mit Hilfe des vom Hersteller angegebenen Durchflussfaktor k_v, abgeschätzt werden. Ausgehend von Gl. 3-1 ergibt sich bei einer angestrebten Druckdifferenz von Hoch- zu Niederdruck Δp= 15 bar ein Volumenstrom \dot{V} , der, bezogen auf die Lösungsdichte von ca. 900 bis 1100 kg/m³, einen maximalen Massenstrom von 378 bis 418 kg/h errechnen lässt, welcher durch die Pulsweitenmodulation auf bis zu 20 % des Maximalwertes gesenkt werden kann.

$$k_v = \dot{V} * \sqrt{\frac{1}{\Delta p} * \frac{\rho}{1000}} = \frac{\dot{m}}{\rho} * \sqrt{\frac{1}{\Delta p} * \frac{\rho}{1000}} \quad \text{Gl. 3-1}$$

3.3.6 Lösungswärmetauscher

Die im Lösungskreislauf der armen Lösung seriell geschalteten Lösungswärmetauscher (SHX1 & SHX2) ermöglichen, durch Übertragung von Wärme zwischen armer und reicher Lösung bzw.

heißem Kältemittelgas und der damit einhergehenden Reduktion an Exergieverlusten beim Mischen der flüssigen bzw. gasförmigen Phase am Absorbereintritt, eine Wirkungsgradsteigerung. Der Wärmeaustausch an die dem Absorber zufließende arme Lösung erfolgt durch die aus dem Absorber austretende, ammoniakangereicherte Lösung im SHX1 und durch das erhitzte Ammoniak nach der ersten Verdichterstufe im SHX2, der kältemittelseitig die Vorstufe zum Heißgaskühler für den Hochdruckkompressor bildet. Ausgeführt wurden beide als Plattenwärmetauscher, auf die im Kap. 3.5 näher eingegangen wird.

3.4 Wärmequelle und Wärmesenke

Die beiden Wasserkreisläufe der Anlage sollen als Wärmequelle bzw. Wärmesenke mit zwei unabhängig voneinander wählbaren Temperaturniveaus und Volumenströmen dienen und werden an die umgebende Infrastruktur angebunden. Der Wärmequellenanschluss erfolgt direkt über eine 1" Schlauchleitungen, die Wärmesenke wird über einen Plattenwärmetauscher, hydraulisch abgetrennt, verbunden. Anzumerken ist, dass die am Institut vorhandene Infrastruktur sowohl eine mit bis zu 100°C heißem Wasser ausreichende Wärmequelle als auch kaltwasserseitig eine ausreichende Wärmeabfuhr garantiert. Alle Wassertemperaturen werden über PT100 Sensoren gemessen, Durchflüsse mittels MID-Sensoren.

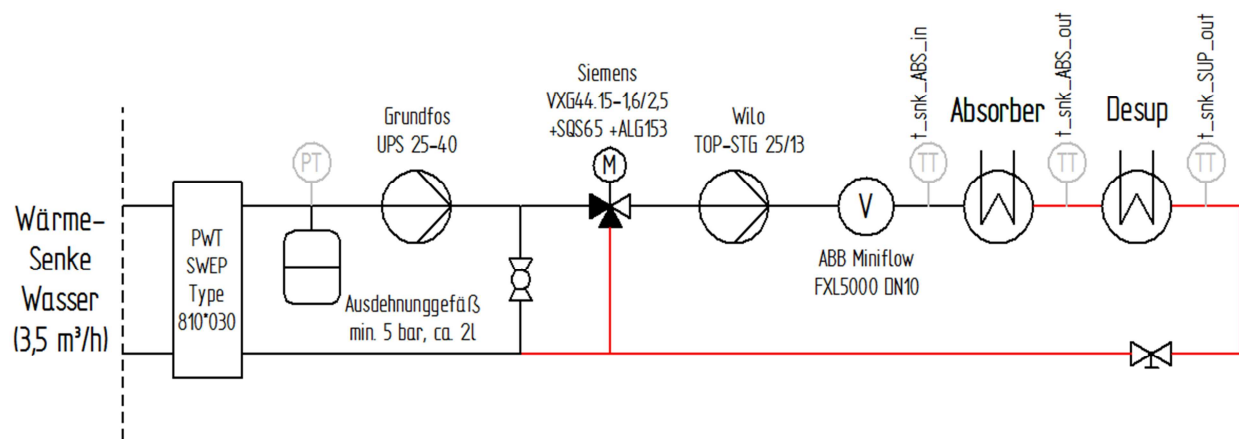


Abbildung 3.19: Schema Wärmesenken-Kreislauf

Der Senken-Kreislauf der Infrastruktur am Institut, dargestellt in Abbildung 3.19 links, wird über den Eingangs-PWT mit dem Kreislauf für den Absorber und Desuperheater verbunden.

Die vorgegebene Absorber-Eintrittstemperatur wird durch ein elektrisch angesteuertes Dreiwegeventil geregelt. Die im Bild rot markierten Strecken weisen auf „heiße“ Leitungen hin. Das MID der Fa. „ABB“ wurde im vergleichsweise kalten Bereich hinter der Pumpe eingebaut. Vor dem Absorbereintritt, der sich konstruktiv an der höchsten Stelle des Kreislaufes befindet, wurde ein Schwimmerentlüfter eingebaut der die Restluft aus dem System abführen soll.

Die Verbindung von Absorber über Desuperheater bis zum Einreguliertventil besteht aus einer Schlauchleitung. Das durchflussbegrenzende Einreguliertventil ermöglicht zusammen mit der Förderpumpe („Wilo“), die Volumenstromeinstellung am heißen Kreislauf. Über das Dreiwegeventil erfolgt schließlich die Temperatureinstellung des Absorber-Eintrittstromes, durch Zumischen des benötigten Volumenstromes vom heißen Wasser aus dem Desuperheater in das kalte Wasser des Senken-Wärmetauschers der Infrastruktur.

Ein verbindendes Rohr zwischen Vor- und Rücklaufleitung vor dem Mischventil ermöglicht einen Ausgleich der, durch die Grundfos-Pumpe erzeugten Vordrucks bzw. der entstehenden Druckunterschiede und bildet so die hydraulische Weiche im System. Das Ausdehnungsgefäß ist im unteren Teil des Kreislaufes zu finden und ist mit der Füllstelle versehen, an der auch ein Anschlussventil zur Füllung und Entleerung des Systems und ein Manometer montiert sind. Ein eingebautes Überdruckventil soll eine obere Druckgrenze zum Schutz der Komponenten bilden.

Die Realisierung des Schemas aus Abbildung 3.19 am Versuchsstand, ist in Abbildung 3.20 veranschaulicht.

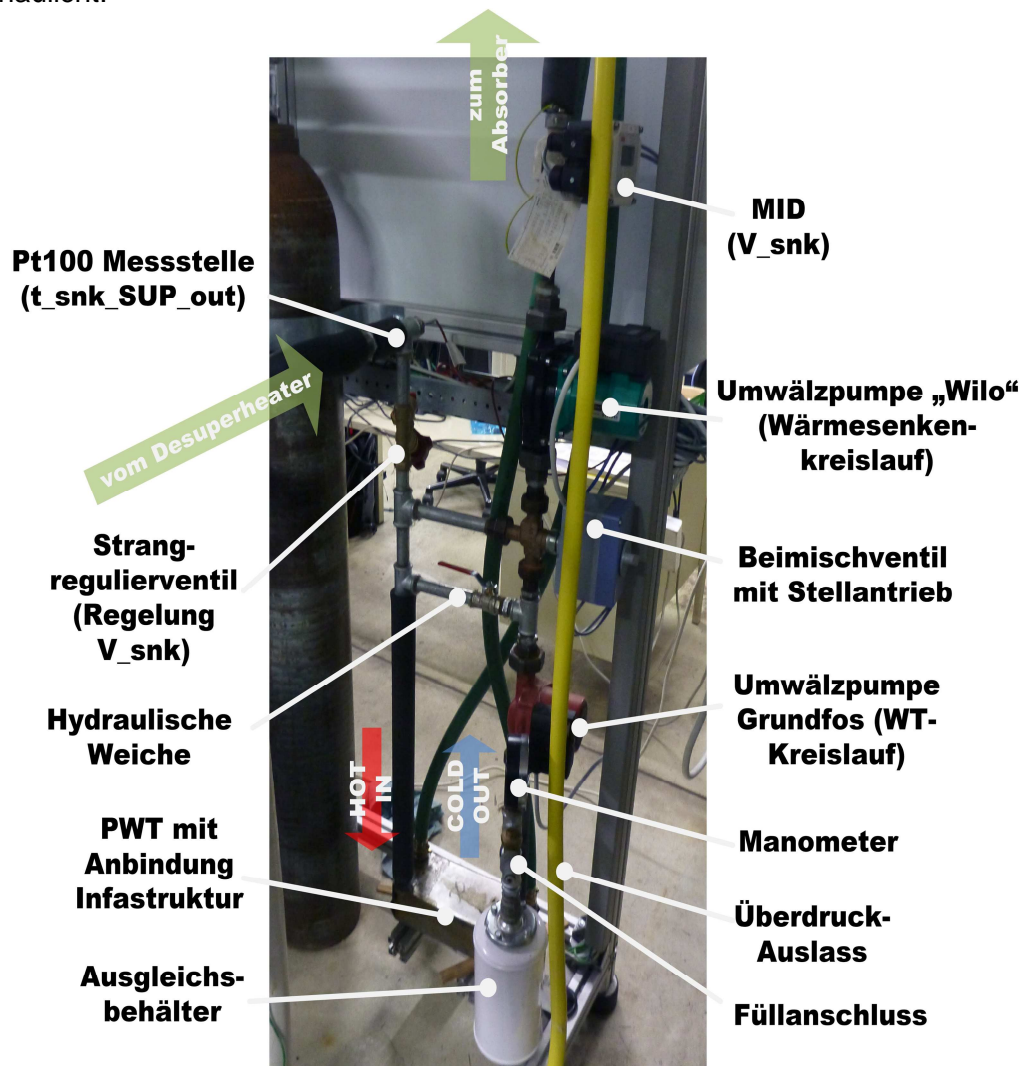


Abbildung 3.20: Bild Senkenkreislauf des Wassers

Der Quellenkreislauf (Abbildung 3.21), der den Desorber mit Wärme versorgt und die verbundenen Gaskühler-Wärmetauscher (AUX1, AUX2) speist, benötigt aufgrund der direkten Anbindung an die Infrastruktur nur eine Kreislaufpumpe („Wilo“). Wie im Senkenkreislauf wird die Temperatur durch Beimischung des bereits durchlaufenen Stromes in den Hauptstrom über ein Dreiwegeventil geregelt. Der Volumenstrom des Quellenkreislaufes kann mit Hilfe der Förderpumpe und den an den Gaskühler angebrachten Strangregulierventilen eingestellt werden. Die Wärmeübertragungsleistung der Gaskühler können somit durch das jeweilig angeschlossene Ventil relativ zu einander eingestellt werden, bzw. können die Gaskühler durch ein nach dem Desorber angeordnetes Strangregulierventil auch gänzlich aus dem fließenden Kreislauf herausgenommen werden (Abschalten der Gaskühler). Eine hydraulische Weiche wurde zwischen Vor/- und Rücklauf der Infrastruktur-Anbindung der Wärmequelle vorgesehen.

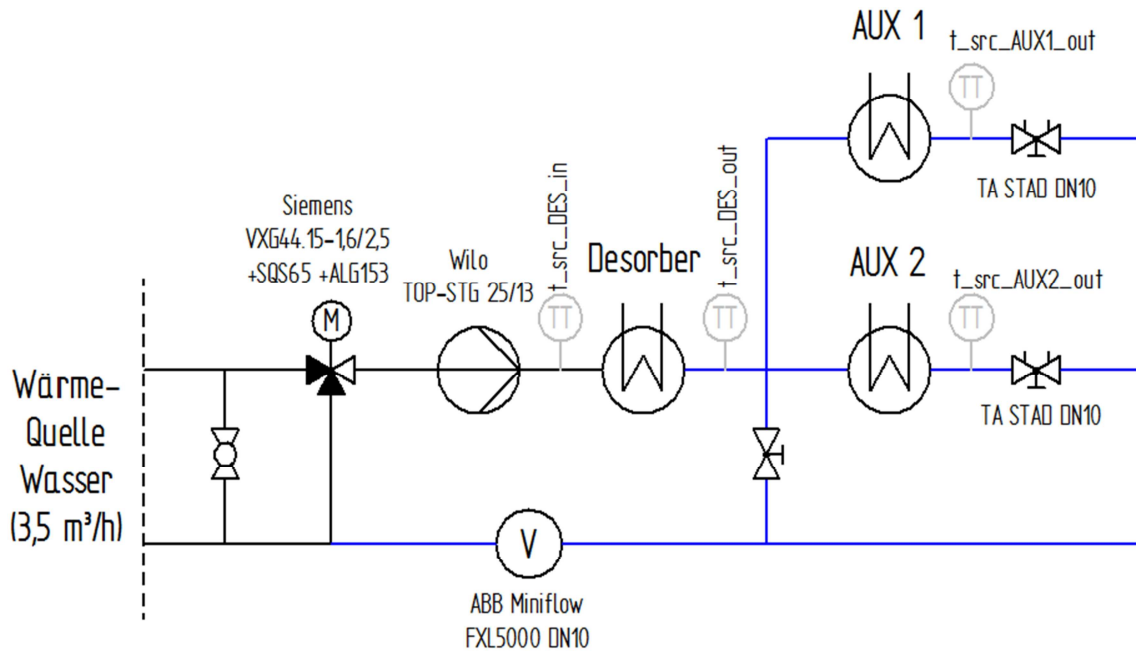


Abbildung 3.21: Schema Wärmequellen-Kreislauf

Die Einbausituation des Kreislaufes ist in Abbildung 3.22 erfasst. Der von der Infrastruktur strömende Wärmequellenfluss wird durch eine Beimischschaltung über das 3-Wegeventil auf die gewünschte Temperatur geregelt. Mittels MID wird der Volumenstrom des Kreises gemessen und durch einen Pt100-Fühler werden die Desorber- und Gaskühlertemperaturen der Wärmequellen gemessen.

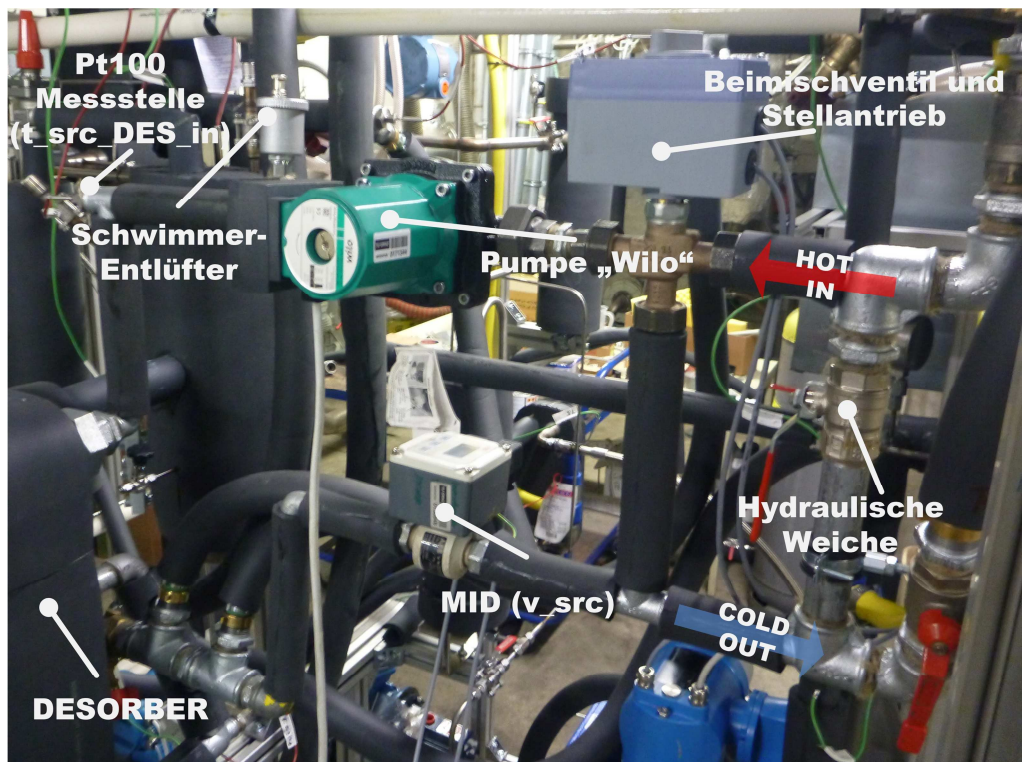


Abbildung 3.22: Bild Wärmequellenkreislauf der Anlage

Um unterschiedlichste Betriebspunkte und mögliche Schaltungsvarianten erfassen zu können, wurden (manuell) zu- und wegschaltbare Wasserkreise für die Gaskühler integriert. Durch drei angebrachte Strangregulierventile wird ein Wegschalten bzw. Drosseln der AUX1- bzw. AUX2-

Nebenkreise ermöglicht. Die Verteilung dieser Nebenkreisläufe erfolgt an der „kalten“ Stelle nach dem Desorber-Austritt, der zum besseren Verständnis in Abbildung 3.23 dargestellt ist.

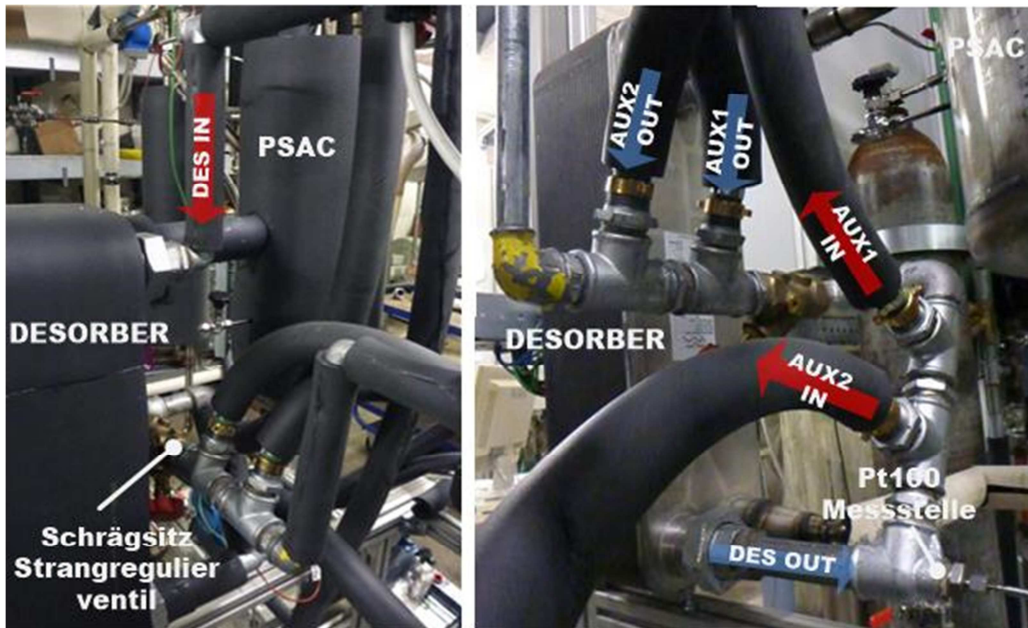


Abbildung 3.23: Bild AUX1 /AUX2 – Anbindung nach dem Desorber

3.5 Wärmetauscher

Die Wärmeübertragungsflächen der Plattenwärmetauscher bestehen aus dünnen, übereinanderliegenden Metallplatten. Durch die Profilierung der Platten werden Kanäle gebildet, welche mit den Anschlussöffnungen an den Plattenecken verbunden sind und so einen Wärmeaustausch der Medien im Gegenstromprinzip ermöglichen. Abbildung 3.24 zeigt den Aufbau und das Fließschema eines PWT.

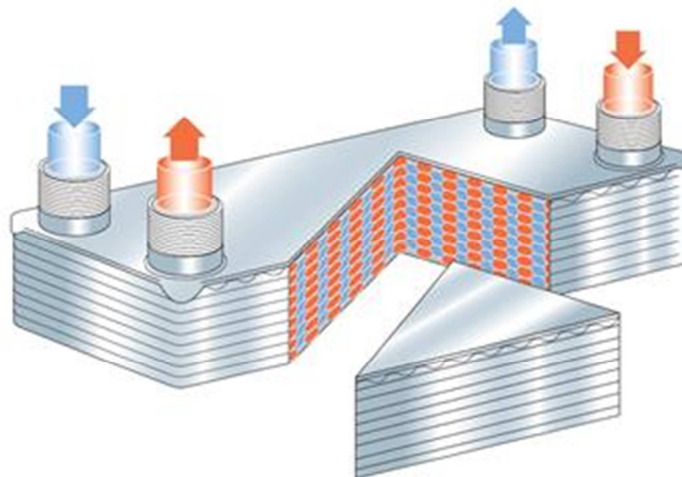


Abbildung 3.24: Fließschema und innerer Aufbau eines PWT (AlfaLaval, 2014, S.1)

Alle in der Anlage verbauten Wärmeübertrager inklusive Absorber und Desorber sind PWT vom Typ AlfaNova der Firma Alfa Laval. Die Plattenwärmeübertrager sind qualitätsgesichert gemäß DIN ISO9001. Sämtliche Komponenten sind aus Edelstahl 1.4401 gefertigt und unter Verwendung von Edelstahl fusionsgelötet. Die Wärmeübertrager werden gemäß der europäischen Druckgeräterichtlinie 97/23/EG gefertigt. Eine Druckprüfung erfolgte mit Luft, die Dichtheitsprüfung wurde mit Helium durchgeführt (Datenblatt AlfaNova). Die wichtigsten Daten der Wärmetauscher und die Funktion im Kreislauf der Anlage sind in Tabelle 3-10 aufgelistet. Ergänzend dazu sind in den vorhandenen Datenblättern die zulässigen Einsatzgrenzen mit einem max. Volumenstrom von 5,4 m³/h (bei Wasser mit 5 m/s Stützengeschwindigkeit), dem

max. Einsatzdruck (Kreislaufseite/ Wasserseite) von 27/22 bar bzw. 27/27 bar und die Temperaturgrenzen von - 196°C bis + 550°C angeführt. Der Anschluss erfolgt wasserseitig über Schraubanschlüsse, Lösungs- bzw. Kältemittelseitig durch Schweißstutzen. (AlfaLaval, 2014)

Tabelle 3-10: Liste der eingebauten Plattenwärmetauscher (Daten gemäß AlfaLaval, 2014)

Stk.	Typenbezeichnung	Nettogewicht [kg]	Volumen (Wärmepumpenkreis/ Wasser) [L]	Funktion
2	AlfaNova 76-50H	33,8	6 / 6,25	Absorber, Desorber
1	AlfaNova 52-30H	9,2	1,33 / 1,425	SHX 1
1	AlfaNova 27-18H	4,1	0,4 / 0,45	SHX 2
2	AlfaNova 52-10H	4,9	0,38 / 0,475	Gaskühler 1,2
2	AlfaNova 27-10H	3,1	0,2 / 0,25	SUP

3.6 Sicherheitseinrichtungen

Im Folgenden werden die Einrichtungen zum Schutz der Anlage bzw. zur Sicherheitsabschaltung der vordefinierten Betriebsgrenzen beschrieben.

3.6.1 Not-Aus

Kritische Betriebssituationen, die ein schnelles Abschalten der Anlage erfordern, können durch die Not-Aus-Schalter gestoppt werden. Drei Schalter sind gut erkennbar an der Vorderseite der Anlage, dem Schaltkasten und neben dem Bediener-PC angebracht und unterbrechen bei Betätigung die Stromzufuhr der Kompressoren, der Lösungsmittelpumpe, der Wärmequellenpumpe und der Lösungsdrössel. Nach Betätigung muss der aufblinkende Drucktaster, der sich an der Vorderseite des Schaltschranks befindet, gedrückt werden, um nach dem Entriegeln des Not-Aus-Schalters den Betriebszustand wieder herzustellen.

3.6.2 Druckschalter

Die Druckschalter des Typs KP 15 der Fa. Danfoss wurden zum Schutz vor zu hohem oder zu niedrigem Druck jeweils vor und nach den Kompressoren und der Lösungsmittelpumpe eingebunden. Der jeweilige Druckschalter ist somit mit der Hoch- und Niederdruckseite des zugehörigen Aggregats verbunden und löst bei Erreichen der eingestellten Druckgrenzen (siehe Abbildung 3.25), ein Abschalten der Stromzufuhr aus und gibt ein Fehlsignal an die Messdatenauswertung. In Tabelle 3-11 sind die am Versuchstand eingestellten Druckgrenzen dokumentiert. Anzumerken ist, dass die Druckschalter nicht CE-zertifiziert sind.

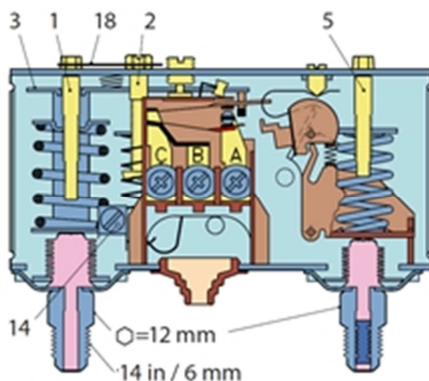


Abbildung 3.25: Druckschalter KP15

Tabelle 3-11: Einstellwerte der Druckschalter

Installationsbereich	Einstellwert ND / HD	Einheit
LPC	1,2 / 18	[bar]
HPC	1,2 / 21	[bar]
LMP	1,2 / 23	[bar]

- 1... Niederdruck- Einstellschraube (LP)
- 2... Differenz- Einstellschraube (LP)
- 5... Hochdruck- Einstellschraube (HP)

(Danfoss, 2014 b, S.6)

3.6.3 Überdruck-Sicherheitsventile & Gasabsaugung

Die eingebauten Überdruckventile der Fa. Leser stellen die letzte, mechanische Sicherheitsmaßnahme gegen zu hohem Druck in der Anlage und der mechanischen, druckbedingten Zerstörung von Komponenten dar. Durch die unterschiedlich eingestellten Auslösedrücke (Relativdruck zur Umgebung) der Ventile können so die einzelnen Druckniveaus an Lösungsmittel- und Kompressionskreislauf gegen Beschädigung abgesichert werden. In Tabelle 3-12 sind alle am Versuchsstand eingebauten Ventile mit ihren Ansprechdrücken und den dazugehörigen Einbaubereichen erfasst.

Tabelle 3-12: Ansprechdruck und Einsatzgebiet Leser Sicherheits-Überströmventile

Stk.	Bezeichnung	Ansprechdruck [bar]	Einsatzgebiet/ Anwendung
3	Leser Typ 437	24	nach HPC, LPC, im RSAC
1	Leser Typ 437	22	nach LMP
1	Leser Typ 437	9	im PASC

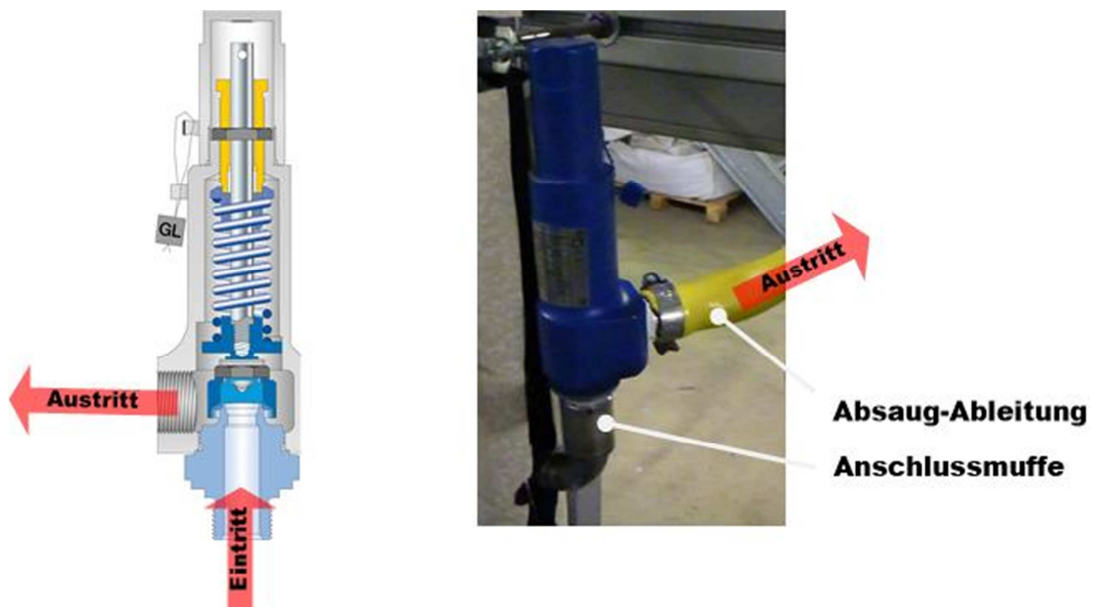


Abbildung 3.26: links: Schnittdarstellung des Überströmventils (www.leser.com⁸; rechts: Einbausituation des Sicherheitsventils mit Absaugleitung

Der Auslösedruck wurde vom Hersteller (TÜV-geprüft) mit der verstellbaren Schraubkonstruktion im Inneren des Ventils eingestellt und lässt die dadurch vorgespannte Feder mit der daraus resultierenden Kraft auf den schließenden Ventilteller drücken. Bei Erreichen des eingestellten Auslösedrucks gibt die Feder nach und lässt den Ventilteller solange öffnen, bis der aus der Druckdifferenz entstandene Kraftunterschied am Ventilteller ausgeglichen bzw. unterschritten ist ($p_{\text{EIN}} < p_{\text{AUS}} + p_{\text{FEDER}}$). Abbildung 3.26 (links) zeigt das Funktionsprinzip der federbelasteten Sicherheitsventile. Rechts davon ist die Einbausituation in der Anlage sowie die Gasableitung dargestellt. Die Anschlussmaße sind $\frac{1}{2}$ " Außengewinde am Eintritt und $\frac{1}{2}$ " Innengewinde am Austritt. Die vorgesehenen Flachdichtungen zwischen Muffe und Anschluss am Eintritt, wurden im Zuge des Aufbaus durch eine zusätzlich notwendige Gewindedichtung (Teflon) unterstützt, um die Dichtheit zu gewährleisten.

⁸ <http://www.leser.com/en/news-about-leser/media-center/images.html>

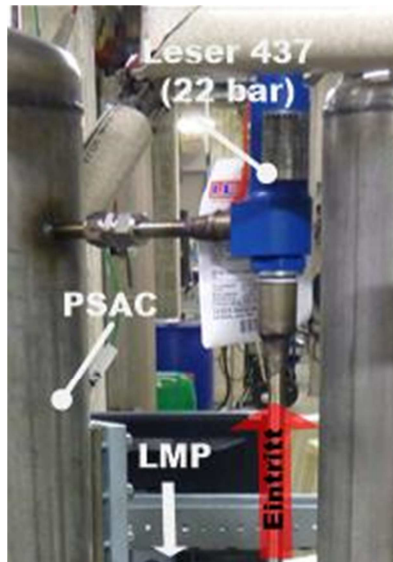


Abbildung 3.27: Überströmung Lösungsmittelpumpe – Poor Solution Accumulator

Das Sicherheitsventil der Lösungsmittelpumpe arbeitet als Überströmventil und lässt einen allfälligen Flüssigkeitsüberdruck der Lösung nach der Pumpe direkt in den PSAC überströmen (Abbildung 3.27), daher ist der eingestellte Ansprechdruck relativ zum Niederdruckniveau zu sehen. Die restlichen Ventile sind durch Schläuche mit einer Absaugvorrichtung verbunden. Die über ein Gebläse getriebene Absaugung bündelt alle Schläuche an einer oberen Ecke der Anlage (siehe Abbildung 3.28) und bietet so auch die Möglichkeit austretendes Ammoniak sicher abzutransportieren. Der verwendete Lüfter hat eine Nennleistung von 270 W, einen max. Fördervolumenstrom von 11 m³/min und wird über die Steuerung im Betrieb zugeschaltet.

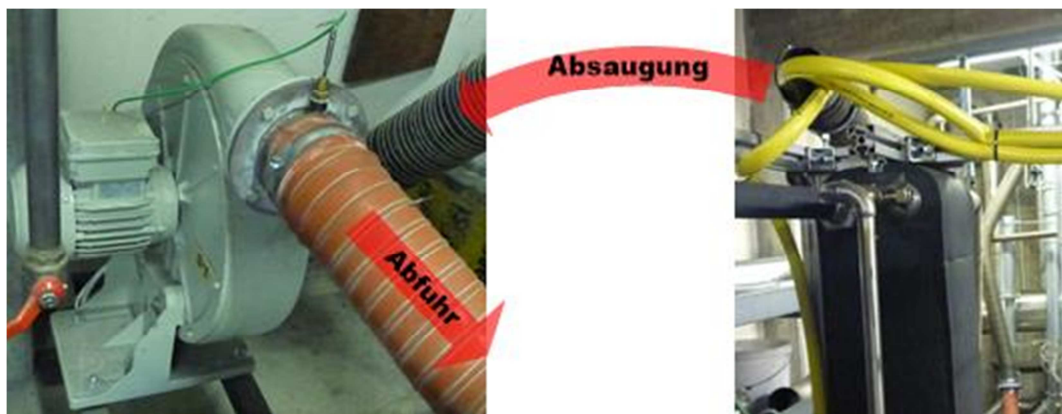


Abbildung 3.28: Absaugung-Einrichtung der Überströmventile

3.6.4 Automatische Abschaltung durch die Regelung

Eine zusätzliche Sicherheit zur Druckbegrenzung wurde in LabVIEW implementiert. Beim Erreichen von vordefinierten Druckgrenzen von 25 bar Hochdruck, bzw. 10 bar im Niederdruckteil der Anlage und beim Erreichen einer Druckuntergrenze von 0,9 bar schaltet die Anlage automatisch ab.

3.6.5 Thermischer Überlastschutz der Lösungsmittelpumpe

Wie schon in Kap. 3.3.1 erwähnt, ist zum Schutz vor thermischer Überlastung und zur Kurzschlussüberwachung ein Thermistor-Motorschutzrelais eingebaut. Dieses Thermistor-Relais überwacht die thermische Belastung des Elektromotors über die Wicklungstemperatur durch eingebaute Kalttemperaturfühler (PTC). Erwärmt sich der Motor über die zulässige Grenze fällt des Relais ab und unterbricht die Stromzufuhr.

3.7 Sonstige Komponenten und relevante Anlagendetails

Im nachfolgenden Abschnitt werden diverse weitere Bauelemente aufgezählt und relevante Informationen bezüglich deren Verwendung gegeben.

Filter Fa. Danfoss Typ FIA-SS 15 D STR

Der vor dem Expansionsventil eingebaute Filter soll etwaige Partikel-Verunreinigungen aus der reichen Lösung nach dem SHX1 herausfiltern. Die vor bzw. nach dem Filter eingebauten Sperrventile ermöglichen einen Tausch des 100 µm Filterelements, ohne größere Bereiche der Anlage leeren zu müssen.

Schläuche

Die Anbindung der Kompressoren und der Lösungsmittelpumpe an den Kreislauf erfolgt durch flexible Druckschläuche, um so die durch die Kompressoren bzw. die Pumpe verursachten Vibrationen nicht weiter auf die Rohrleitungen zu übertragen. Dabei wurden edelstahlummantelte Ringwellen- und PTFE-Schläuche verwendet. Die Temperaturbeständigkeit der eingebauten Schläuche ist primär durch die PTFE-Einlage im Inneren der Schläuche begrenzt. Die Schläuche wurden vom Hersteller ausgelegt. In Tabelle 3-13 sind die Eckdaten der eingebauten Druckschläuche aufgelistet.

Tabelle 3-13: Eckdaten Druckschläuche (Daten gemäß Angebot „Parcom Ventile & Fittings GmbH“)

Stk.	Einbauort	Max. zul. Betriebs- temperatur [°C]	(Nenndurchmesser) Maße Ø x t x L [mm], DN
2	Eintritt HPC bzw. Austritt LPC	230	18 x 1 x 1000, (DN 16)
1	Austritt HPC (in)	230	16 x 1 x 1000, (DN 12)
1	Austritt LPC (in)	450	25,4 x 1,65 x 2000, (DN 25)

Überdruckventil Wasser

Das Überdruckventil begrenzt den maximalen Wasserdruck am Senkenkreislauf der Anlage, um so ein Überschreiten des zulässigen Überdrucks im Ausgleichsbehälter bzw. den Leitungen zu verhindern. Der bei Auslösen des Ventils ausströmende heiße Wasserfluss wird aus Sicherheitsgründen über eine Schlauchleitung an die Unterseite des Versuchstandes geleitet und kann über den vorhandenen Bodenablauf abgeleitet werden.

Schaugläser

Die an den Sammelbehältern angebrachten kreisrunden Schaugläser wurden bereits in Kap. 3.3.4 angesprochen. Zusätzlich zu erwähnen ist das in der Absorber-Austrittsleitung der reichen Lösung angebrachte Schauglas, durch das die Zusammensetzung der Phasen in der Strömung beobachtet werden kann. Anzumerken ist, dass alle eingebauten Schaugläser (mit Ausnahme des langen Schauglases im PSAC) aus Borosilicat gefertigt wurden und für einen maximalen Betriebsdruck von 25 bar bei max. 230°C, gemäß Herstellerangaben, zugelassen sind (lt. Herstellerangaben). Das Schauglas im PSAC ist für 16 bar und 300°C zugelassen.

Kreislauf-Entleermöglichkeiten

An den tiefsten Punkten der Teilkreisläufe befinden sich Lösungs-Abflussmöglichkeiten über dafür vorgesehene Kugelhähne. Eine Gasabsaugung kann über die Nadelventile am PSAC und RASC erfolgen. Zusätzlich dazu wurde ein Nadelventil am Koaleszenzabscheider angebracht.

4 MESS- & REGELUNGSTECHNIK

Im folgenden Kapitel wird auf die eingesetzte Messtechnik sowie auf die eingesetzten Steuergeräte eingegangen. Des Weiteren wird ein detaillierter Einblick in die Regelung der hybriden Wärmepumpe gegeben.

4.1 Messtechnik

Die folgenden Seiten geben eine Übersicht über die in der Versuchsanlage verwendeten Messsysteme. Ihr Aufbau und ihre physikalischen Prinzipien werden kurz erläutert und relevante Daten einzelner Geräte dokumentiert. Tabelle 4-1 listet alle eingebauten Messgeräte, deren Verwendung und Lieferanten bzw. Hersteller auf. Ergänzend ist eine Messwertliste im Anhang zu finden, welche die einzelnen Messwerte beinhaltet. Die eingebauten Messstellen sind als Messschema im Anhang zu finden.

Tabelle 4-1: Liste der verwendeten Messgeräte

Stk.	Funktion / Beschreibung	Typ	Hersteller / Lieferant
7	Widerstandsthermometer	Pt100, Kl. A, $\varnothing = 3\text{mm}$, L=150mm	PMR
20	Thermoelement	Typ K, Kl. 1, $\varnothing = 3\text{mm}$, L=150mm	PMR
3	Drucktransmitter	Serie 3100, (2* 3100B0025G01B000; 1* B0016G01B000)	GEMS
2	Volumenstrommessgerät	ABB-Miniflow FXL5000, DN10	ABB
2	Massenstrommessgerät	Coriolis Promass 63MP08 & 83F15	Endress&Hauser
3	Füllstandsmessung	Schwimmer V52R & Reedkontaktkette K5-L500-1,0 SiL	KSR Kübler /WIKA Messgerätevertrieb
2	Differenzdruckmessgerät	1151DR	Rosemount
1	Differenzdruckmessgerät	652.94410000000	HUBA
2	El. Energiezähler 3-phasig	DSZ12D-3X65A	Eltako
1	El. Energiezähler 1-phasig	AAD1DSF10KR3A00	Eltako
3	Manometer (analog)		WIKA Messgerätevertrieb

4.1.1 Druckmessung

In der Absorptions/Kompressions-Wärmepumpe herrschen drei unterschiedliche Druckniveaus, die durch jeweils einen Drucktransmitter aufgenommen werden. Einzelne Bereiche wie bspw. die Ölabscheidung erfordern zusätzlich ein Erfassen der Druckdifferenzen zwischen bestimmten Abschnitten im Kreislauf.

Druckmessung im Kreislauf

Um die einzelnen Druckniveaus der Anlage zu bestimmen wurde je ein Druckaufnehmer der Fa. „Gems“ im Hoch-, Mittel- und Niederdruckteil installiert. Der Anschluss an die Messstelle erfolgt durch eine Gewindemuffe die an einen Kugelhahn geschweißt wurde, welcher zur Druckmessstelle im Kreislauf führt. Ein nachträglicher Austausch des Sensors, ohne dabei den Kreislauf zu leeren ist folglich möglich. Der auf dem Prinzip von Dehnmessstreifen basierende Dünnsfilmsensor ist ein Drucksensorelement, das den Druck bei Anlegen einer Spannung in

einen druckproportionalen, elektrischen Strom umwandelt. Das Stromsignal von 4 - 20 mA entspricht hierbei den Werten des Druckbereichs des Sensors. Anzumerken ist, dass sich die Messung relativ auf den Luftdruck bezieht und daher keinen absoluten Druckwert darstellt. Aufgrund des schwankenden Luftdrucks wurde in der Messdatenauswertung eine Möglichkeit zur manuellen Eingabe des tatsächlichen Luftdruckes am entsprechenden Betriebstag erstellt. Diese Schwankung über den Tag wurde auch bei der Kalibrierung berücksichtigt. Für den weiteren Betrieb wurde ein fixer Wert eingestellt, welcher ggf. geändert werden kann.

Zur Erfüllung der Sicherheitsvorschriften und zur Kontrolle wurden in die drei Druckbereiche ergänzend jeweils ein mechanisches Manometer gemäß EN 837 eingebaut.

Die Kalibrierung der Druckaufnehmer erfolgte durch den Messwertvergleich mit einem Referenzdrucktransmitter (Typ Burster 7315035). Über den Messbereich wurde anhand mehrerer Messpunkte eine Ausgleichsgerade erzeugt, welche über die Geradengleichung eine Nullpunktverschiebung bzw. eine Steigungskorrektur des jeweiligen Sensors, zum Angleichen an die Werte der Referenz möglich macht. Eckdaten sind der Tabelle 4-2 zu entnehmen. Die Kalibrierdaten sind im Anhang aufgelistet. Die aus den Kalibrierdaten ermittelte Standardabweichung der Messwerte zum Referenzdrucktransmitter ist ebenfalls angeführt. Für die Messunsicherheitsanalyse wurden allerdings die maximalen Messabweichungen gemäß Herstellerdatenblatt (aufgelistet in der Tabelle 4-6 im Kapitel „Messunsicherheitsanalyse“) verwendet.

Tabelle 4-2: Daten Kalibrierung Drucktransmitter

	p_low	p_mid	p_high	Einheit
Messbereich	0 - 10	0 – 25	0 - 25	[bar]
Standardabweichung zur Referenz	0,011	0,017	0,016	[bar]

Differenzdruckmessung

Am Versuchsaufbau sind drei Differenzdruckmessstellen vorgesehen. Bei der Messung wird im Messgerät die Auslenkung einer Membranschicht zwischen den Druckseiten gemessen. Einmal wird mittels eines „Rosemount“-Differenzdruckmessers der Druckabfall über die Ölabscheider gemessen und zweimal wird der Druckabfall am jeweiligen Strangreguliventil nach den beiden Gaskühlern im Wärmequellenkreislauf detektiert. Die am Institut vorhandenen Geräte der Fa. „Rosemount“ wurden vor der Ausgabe für den Differenzdruckbereich 0-1bar eingestellt. Das Gerät der Fa. „HUBA“ ist ebenfalls auf einen Differenzdruck-Messbereich von 0-1 bar voreingestellt.

4.1.2 Temperaturmessung

Die Temperaturmessungen an der Anlage erfolgt über zwei unterschiedliche Messmethoden. Zur Ermittlung der Temperaturen des Wärmequellen/-Senkenkreislaufes werden Pt100-Messfühler direkt in den Wasserstrom eingebracht. Die Bestimmung der Temperaturen des Kältemittel- und Lösungskreislaufes erfolgt mittels Thermoelemente in den Arbeitskreisläufen durch Anlegefühler („Thermocouple“).

Widerstandsthermometer

Die Tatsache, dass sich in bestimmten Materialien bei einer Temperaturänderung ebenfalls ihr elektrischer Widerstand ändert, nützen Widerstandsthermometer zur Temperaturermittlung. Besonders bei reinen Metallen ist diese Änderung stärker ausgeprägt und aufgrund eines zusätzlich über weite Bereiche konstanten Temperaturkoeffizienten eignen sich diese besonders gut. In einem definierten Temperaturbereich kann so über den annähernd linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand ein Spannungsabfall des mit konstantem Strom versorgten Fühlers gemessen werden. Abbildung 4.1 zeigt eine Vierleiter-Messschaltung eines Fühlers, die eingesetzt wird, um durch Kompensation des

Leitungswiderstands (im Vergleich zur Zweileiter-Schaltung) noch genauere Messwerte zu erhalten. (Nau, 2004, S.43f)

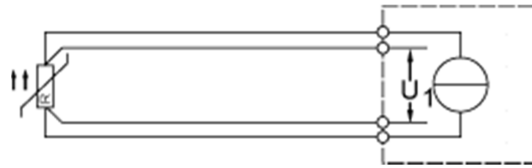


Abbildung 4.1: Messschaltung eines Vierleiters (www.fuehlersysteme.de⁹, 03.03.2014)

Der eingesetzte Fühler des Typs Pt100 ist ein auf Platin basierendes Widerstandsthermometer, das bei $T_0=0^\circ\text{C}$ einen elektrischen Widerstand von $R_0= 100 \text{ Ohm}$ besitzt. Die am Versuchsstand eingebauten Pt100 Fühler dienen zur Ermittlung der verschiedenen Wassertemperaturen an den jeweiligen Messstellen des Wärmequellen- und Wärmesenkenkreislaufes. Durch ihre axiale Einbaurichtung in den Leitungen messen sie direkt die Wassertemperatur. Zu erwähnen ist, dass auf eine Ausrichtung entgegen der Stromrichtung des Wassers mit ausreichender Einstecktiefe zu achten ist und die konischen Kunststoffdichtringe der Verschraubungen nur handfest anzuziehen sind (siehe Abbildung 4.2).



Abbildung 4.2: Pt100 - Messstelle

Thermoelemente

Thermoelemente bestehen aus einer Verbindung zweier unterschiedlicher Metalleiter, die bei einer Temperaturdifferenz zwischen den Enden auf Grund des Seebeck-Effekts eine proportionale Spannung erzeugen. Anders als Widerstandsthermometer messen sie nicht direkt die Temperatur, sondern vergleichen die Spannungen anhand einer Referenztemperatur an einem Ende. Die somit gemessene Spannung ist demnach proportional zur Differenz der Temperaturen von Mess- und Vergleichsstelle. Eine solche Schaltung ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Abhängig von den eingesetzten Materialien werden Thermoelemente für unterschiedliche Messbereiche und mit unterschiedlichen Toleranzklassen angeboten. (Busch, 2006, S.363)

⁹ <http://www.fuehlersysteme.de/wiki/pt100>

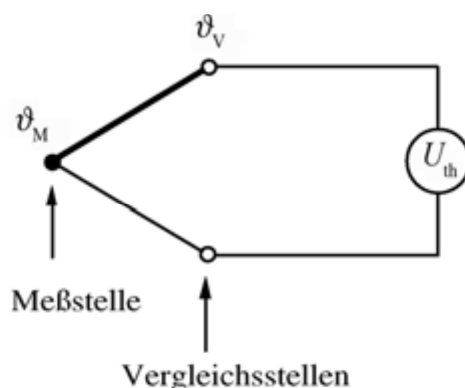


Abbildung 4.3: Schaltung eines Thermoelements (Busch, 2006, S.362)

An der Versuchsanlage wurden Thermoelemente („Thermocouple“) des Typs K (NiCr-Ni) mit der Toleranzklasse 1 nach EN 60584-2 angebracht. Sie messen die Temperaturen nicht direkt in den gasförmigen bzw. flüssigen Medien, sondern sind als Anlegefühler ausgeführt. Der Wärmeübergang an den, durch Kabelbinder bzw. Rohrstellen fixierten, Kontaktstellen zu den Rohrleitungen wurde mittels Wärmeleitpaste verbessert.

Vor dem Einbau wurden beide Typen kalibriert. Dazu wurden die Messfühler, zusammen mit einem Pt100 Referenzfühler (Typ DKD-K-06701) in einem Wärmebad (Kalibrierthermostat) platziert um verschiedene Messpunkte aufzuzeichnen. In regelmäßigen über den jeweiligen Einsatzbereich des Fühlers verteilten Abständen wurden Temperaturmesswerte aufgenommen. Durch den teilweisen Einsatzbereich über 100°C wurde bei darüberhinausgehenden Temperaturen Thermoöl, für die übrigen Messpunkte Wasser, im Wärmebad verwendet. Die Mittelwerte der 1-minütigen Messpunktaufnahmen wurden für den jeweiligen Temperaturfühler mit der Referenz verglichen und durch eine Ausgleichsfunktion linear an diese angenähert. Die Differenz zwischen Messwert und Temperatur der Referenz wurde dabei anhand einer Umrechnung der Ausgleichsgeraden mittels Nullpunktverschiebung und der Steigung ausgeglichen. Nach diversen Kontrollmessungen konnten die Standardabweichungen der einzelnen Fühler zum Referenzmessgerät berechnet werden (Maximalwert der ermittelten Standardabweichungen der Messfühler je Sensorart angeführt in Tabelle 4-3). Die Kalibrierbereiche der Fühler sind der Messwertliste im Anhang zu entnehmen.

Tabelle 4-3: Daten Temperaturmessfühler

Beschreibung	Pt100	TC Typ K	Einheit
Messbereich	0 – 200	0 - 180	[°C]
Max. Standardabweichung	0,09	0,4	[°C]

4.1.3 Massenstrommessung

Im Kältemittel- und Lösungskreislauf wird der Durchfluss mittels Coriolis-Massenstrom-Messgerät bestimmt. Dieses System hat den Vorteil den Durchfluss unabhängig von Dichte und Zustand des Mediums ermitteln zu können. Das durch eine Rohrschleife geführte Medium führt, verstärkt durch eine elektromagnetische Anregung dieser Schleife im Bereich der Eigenfrequenz und infolge der Trägheitskräfte des Mediums, zu einer Verformung der Rohrschleife. Die Auslenkung dieser Verformung wird dazu verwendet den Massenstrom abzuleiten. (Endress und Hauser, 2014, S.3)

Tabelle 4-4 zeigt den eingestellten Messbereich der verwendeten Geräte. Die beiden eingebauten Geräte der Fa. Endress & Hauser messen den Massenstrom der armen Lösung nach der Lösungspumpe und den Massenstrom des Kältemittels zwischen den Verdichtern. Des Weiteren können durch die Geräte des Typs Promass die Dichte (für flüssige Medien) und

folglich auch der Volumenstrom des durchströmten Mediums sowie dessen Temperatur gemessen werden.

Tabelle 4-4: Eingestellte Messbereiche Coriolis-Messgeräte

Funktion	Coriolis Kältemittel	Coriolis Lösung	Einheit
Massenstrom	0 – 100	0 – 600	[kg/h]
Dichte	(0 – 30)	800 - 1400	[kg/m ³]

Ein Kalibrierzertifikat der beiden vorab von Seiten des Herstellers kalibrierten Messgeräte liegt am Institut auf. Es wurden keine zusätzlichen Kalibriermessungen durchgeführt.

4.1.4 Volumenstrommessung

Um die Volumenströme der Wasserkreisläufe bestimmen zu können wurden magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte, kurz MID's, eingebaut. Das Faraday'sche Induktionsgesetz bildet die Grundlage dieses Messsystems. Durch ein erzeugtes Magnetfeld, wird senkrecht auf die Strömungsrichtung eine elektrische Spannung im fließenden Medium induziert (vorausgesetzt das Medium hat zumindest eine geringe Leitfähigkeit). Durch den proportionalen Zusammenhang zwischen der Fließgeschwindigkeit des Mediums, der Induktion und dem Rohrdurchmesser kann der Durchfluss bestimmt werden.

Der Einsatzbereich der verwendeten MID's der Fa. „ABB“ liegt bei 0 bis 2000 l/h. Sie wurden ebenfalls ohne weitere Kalibrierung übernommen. Die maximale Messfehler berechnet sich gemäß der im Datenblatt angeführten Messabweichung für Standardgeräte ($\pm 3\%$). (ABB, 2014)

4.1.5 Füllstandmessung

Zur Bestimmung der Füllstände in den Druckbehältern wurde ein elektromechanisches Schwimmersystem eingebaut. Dieses ermöglicht eine kontinuierliche Erfassung der Füllstandshöhe, unabhängig von den physikalischen Zuständen der Medien im jeweiligen Behälter.

Durch das in vertikale Richtung entlang eines Rohres verschiebbare Magnetsystem im Inneren des Schwimmers wird eine sich im Gleitrohr befindliche Reedkontakt-Messkette auf Schwimmerhöhe geschlossen und erzeugt durch die Potentiometerschaltung eine definierte messbare Spannung. Die in der Messkette somit erzeugte Messspannung ist proportional zur Füllstandshöhe und kann über eine Umrechnung in einem Bereich von 0 bis 100% der gesamten Messhöhe ausgegeben werden. Abbildung 4.4 (links) soll dieses System veranschaulichen. Abbildung 4.4 (rechts) zeigt ein Beispielbild des verwendeten Messprinzips. (Kübler, 2014, S.9)

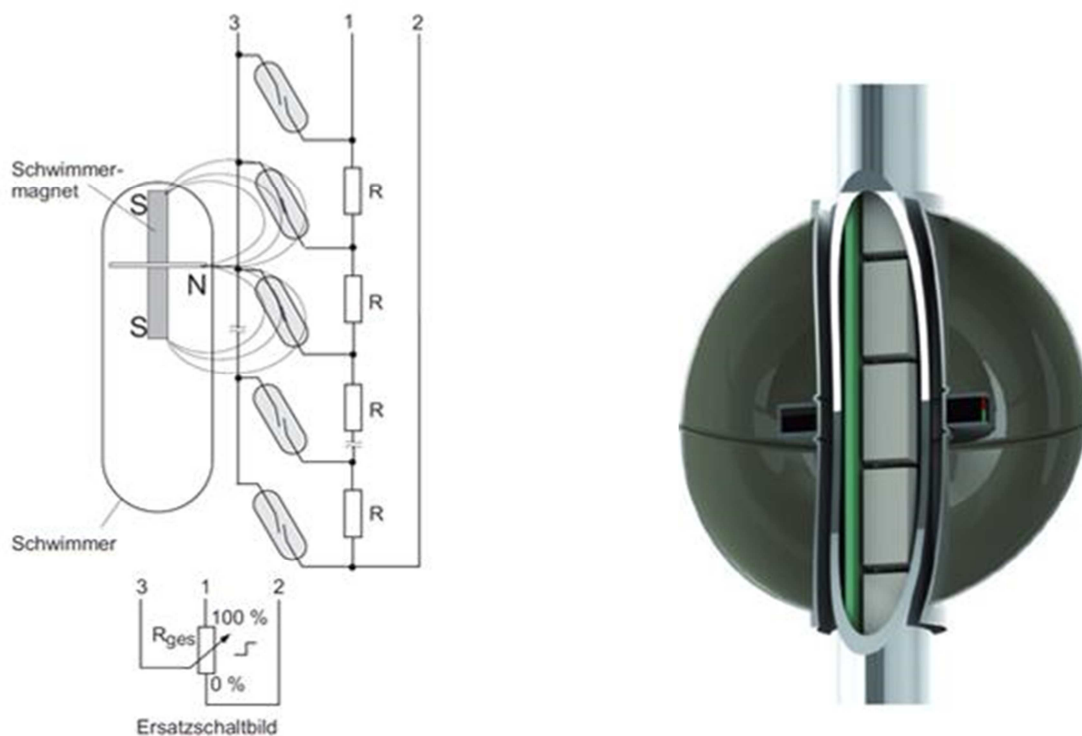


Abbildung 4.4 (links): Reedkontakt-Messkette mit 3-poliger Potentiometerschaltung
(rechts): Schwimmer-Messsystem; (Kübler, 2014)

Die Reedkontaktkette wird durch folgende Vorgehensweise im Gleitrohr positioniert. Das in den Behältern eingeschweißte Gleitrohr dient zur Führung der Magnetschwimmer und auch zur Aufnahme der Reed-Kette. Beim Einführen der Kette in das Gleitrohr des leeren Behälters wird die erstmalige Spannungsänderung gemessen, sobald die Höhe des am Boden liegenden Schwimmers erreicht wird. Um diese Einbauhöhe einzurichten und zu halten wurden Einstellschrauben am unteren Ende jedes Rohres angebracht, welche die Einstecktiefe begrenzen und justieren.

Für die prozentuell angezeigte Füllstandshöhe wird in LabVIEW der Messwert durch den gesamten Messbereich dividiert. Tabelle 4-5 zeigt wichtige Eckdaten der Füllstandsmessung. Über einen Signalwandler wird der Widerstand der Messkette in ein 4 – 20 mA-Signal umgewandelt. Zur Messgenauigkeit ist zu sagen, dass diese wesentlich von der gesamten Messlänge und dem Rasterabstand der Reed-Kontakte abhängt und sich mit zunehmender Länge verbessert (Kübler, 2014, S.9). Bei dem eingebauten Messsystem und dem gegebenen Raster befindet sich der Messfehler knapp über 1% (ca. 1% Sprünge, d.h. ca. 100 Reedkontakte), was für den Einsatzzweck zum Abschätzen und Überwachen der Füllstände völlig ausreichend erscheint.

Tabelle 4-5: Eckdaten Schwimmer und Reedkontaktkette (gemäß Angebot „WIKA-Messgerätevertrieb GmbH & Co KG“)

Eigenschaften	Wert	Einheit
Einsatz-Temperatur (Schwimmer)	-50 bis 250	[°C]
Einsatz-Druck (Schwimmer)	0 bis 150	[bar]
Einsatz Fluidichte (Schwimmer)	>400	[kg/m ³]
Widerstand Reedkontaktkette	0 bis 5	[kOhm]
Messlänge Reedkontaktkette	ca. 500	[mm]
Kontaktraster-Abstand	5	[mm]

4.1.6 Energiezähler

Die eingebauten Wechselstrom-Energiezähler messen die Wirkenergie durch Messung des fließenden Stromes und der Spannung. Damit können die für den COP-Wert notwendigen Leistungsaufnahmen der Lösungsmittelpumpe bzw. der Kompressoren erfasst werden. Die Ausgabe erfolgt mittels Impulssignal, welches für beide in Tabelle 4-1 angeführten Energiezähler mit 1000 Impulsen pro kWh angegeben ist.

4.1.7 Abgeleitete Messgrößen

Die in den Kapiteln 4.1.1 bis 4.1.5 gemessenen Werte bilden die Grundlage für die Ermittlung weiterer Kenngrößen des Prozesses. Die Wärmeleistungen der einzelnen PWT können wasserseitig (Wärmequelle, Wärmesenke) anhand der Ein- und Austrittstemperaturen und des Volumenstromes berechnet werden. Kreislaufseitig werden zur Leistungsberechnung kreislaufinterne Größen wie die Enthalpien, die sich aus Temperatur, Druck und hinterlegten Stoffdaten berechnen lassen, und die Massenströme verwendet. Die gesamte Wärme- bzw. Kälteleistung sowie die Leistungszahl erhält man schließlich durch Addition bzw. Division der einzelnen Leistungen.

Wasserseitig wurde durch ein Polynom 3. Grades abhängig von der jeweiligen Ein- und Austrittstemperatur die Enthalpien bestimmt und zusammen mit dem gemessenen Volumenstrom und den aus der Temperatur an der Volumenstrom-Messstelle ermittelten Dichtewerten des Wassers die Leistung gemäß Gl. 4-1 (für die Absorberleistung) berechnet.

$$\dot{Q}_{ABS} = \dot{V}_{snk} * \rho_{snk} * (h_{snk_ABS_in} - h_{snk_ABS_out}) \quad \text{Gl. 4-1}$$

Die Berechnung der Leistungen auf Kältemittelseite (z.B. für Wärmepumpeninterne Wärmetauscher) erfolgte mit den gemessenen Massenströmen und den Enthalpiedifferenzen (siehe Gl. 4-2), die über die jeweiligen gemessenen Temperaturen und Drücke sowie Stoffdatenkorrelationen ermittelt wurden.

$$\dot{Q}_{SUP} = \dot{m}_{NH3} * \Delta h_{NH3} \quad \text{Gl. 4-2}$$

4.1.8 Messunsicherheitsanalyse

Die Abschätzung der Messunsicherheiten ist nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz gemäß Gl. 4-3 berechnet worden. Die dabei berechnete Messunsicherheit eines, aus verschiedenen vorangegangenen Messwerten ermittelten Wertes, ist die geometrische Summe der Fehler, welche aus den jeweiligen Abweichungs-Einflüssen der einzelnen Messgrößen und deren Messunsicherheiten resultieren. In der Gleichung werden diese Fehlerterme durch die entsprechenden Produkte aus der Ableitung des Wertes nach dem jeweiligen Messwert und der Messunsicherheit dieses Messwertes zum Ausdruck gebracht.

$$s_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 * s_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 * s_y^2 + \dots} \quad \text{Gl. 4-3}$$

Die Standardabweichungen der Messwerte sind in Kap.4.1.6 beschrieben und dem Anhang zu entnehmen. In Tabelle 4-6 sind die Messunsicherheiten der einzelnen Messgeräte aufgelistet.

Tabelle 4-6: Maximale Messabweichung der verwendeten Messsysteme

Messgerät	Messwert	Max. Messabweichung	Nullpunktabweichung
Pt100 -Fühler	Wassertemperaturen	± 0,2 % v.M.	±0,15 [°C]
Thermocouple	Temp.: Lösung & NH ₃	± 1,5 [K]	
ABB Miniflow	Volumenstrom: Wasser	± 3 % v.M.	
Coriolis E&H	Massenstrom: NH ₃	± 0,5 % v.M.	
Coriolis E&H	Massenstrom: Lösung	± 0,35 % v.M.	
Coriolis E&H	Dichte Lösung		± 20 [kg/m ³]
Coriolis E&H	Temperatur	± 0,5 % v.M.	± 0,5 [°C]
Drucktransmitter	Druck	± 1 % v.E	

Um die Messunsicherheiten der einzelnen Messwerte zu ermitteln, müssen die entsprechenden maximalen Messabweichungen anhand der gemessenen Messwerte bzw. Endwerte berechnet werden. Um auf eine Standardabweichung umzurechnen, werden die maximalen Messabweichungen durch den Faktor $\sqrt{3}$ dividiert, um so eine angenäherte Normalverteilung zu erhalten. Die Nullpunktabweichung der Coriolis Massenstrommessgeräte ist zur Messung des Massenstroms der Lösung und des Massenstroms des Ammoniaks gesondert zu ermitteln, da sie von Druck-, Temperatur- und Strommessfehler abhängt.

Anhand des Absorbers soll die Messunsicherheit der Wärmesenkenleistung des Wasserkreislaufes an einem Beispiel gezeigt werden. Die Absorberleistung ist durch die Enthalpiedifferenz, die mittels der Ein- und Austrittstemperaturen und den spezifischen Wärmekapazitäten gemäß einer Korrelation berechnet werden kann und dem Massenstrom des Wassers, bestimmbar. Die im Wärmesenkenkreislauf eingebauten Messsensoren messen die Senkentemperatur vor und nach dem Absorber sowie den Volumenstrom (inkl. der Temperatur am Volumenstrommessgerät). Mit den Stoffwerten werden nun die abhängigen Enthalpie- und Dichte-Werte bestimmt.

Die Messunsicherheit der Enthalpien ist in den verwendeten Korrelationen ihrerseits von den Messunsicherheiten der Temperatur abhängig. Mit den aus den Datenblättern ermittelten Standardabweichungen (berechnet aus den maximalen Messabweichungen) der Einzelwerte (Temperaturen, Volumenstrom) kann so in die Gl. 4-4 eingesetzt werden. Aufgrund der Ungenauigkeit der Stoffwert-Korrelationen sind diese ebenfalls in der Messunsicherheitsrechnung mit einem abgeschätzten Fehlerwert berücksichtigt. Die Prognosegenauigkeit der Stoffeigenschaften von Wasser, wird mit einer maximalen Abweichung der Dichte von $\pm 0,25 \text{ kg/m}^3$ und $0,01 \text{ kJ/kgK}$ für die spezifische Wärmekapazität, zur Berechnung der Enthalpiedifferenz angenommen. Zur Umrechnung in eine Standardabweichung werden diese ebenfalls durch den Faktor $\sqrt{3}$ dividiert, um so eine angenäherte Normalverteilung zu erhalten.

$$u_{Q_{ABS}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{Q}_{ABS}}{\partial t_{snk_{ABS_{in}}}}\right)^2 * u_{t_{snk_{ABS_{in}}}^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{ABS}}{\partial t_{snk_{ABS_{out}}}}\right)^2 * u_{t_{snk_{ABS_{out}}}^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{ABS}}{\partial \dot{V}_{snk}}\right)^2 * u_{\dot{V}_{snk}}^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{ABS}}{\partial \rho_{Wasser}}\right)^2 * u_{\rho_{Wasser}}^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{ABS}}{\partial \Delta h_{Wasser}}\right)^2 * u_{\Delta h_{Wasser}}^2} \tag{Gl. 4-4}$$

Werden die Leistungen kreislaufseitig (Ammoniak oder Lösung) bestimmt ergibt sich folgende Vorgehensweise. Die Messunsicherheit der Enthalpiedifferenz Δh ist von der Unsicherheit der Temperaturmessungen abhängig. Die Enthalpien von Kältemittel oder Lösung werden gemäß Stoffwert-korrelationen gemäß EES (Engineering Equation Solver, 2011) für NH_3 , und Libotean (2007 & 2008) für die Lösung) und mit einer geschätzten Prognoseungenauigkeit (entsprechend umgerechnet in eine Standardabweichung) in der Messunsicherheitsrechnung berücksichtigt. Weiters ist die Messunsicherheit der Massenstrommessung zu berücksichtigen. Als Beispiel soll die Messunsicherheit bei Berechnung der Wärmeleistung, bezogen auf das heiße Gas des AUX2 dienen, wie in Gl. 4-5 und Gl. 4-6 angeschrieben.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{NH}_3} * (h_{\text{hot,in,(NH}_3,\text{AUX2)}} - h_{\text{hot,out,(NH}_3,\text{AUX2)}}) \quad \text{Gl. 4-5}$$

$$u_{Q_{\text{AUX2}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{Q}_{\text{AUX2}}}{\partial \dot{m}_{\text{AUX2}}}\right)^2 * u_{\Delta \dot{m}_{\text{AUX2}}}^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{\text{AUX2}}}{\partial \Delta h_{\text{AUX2}}}\right)^2 * u_{\Delta h_{\text{AUX2}}}^2} \quad \text{Gl. 4-6}$$

4.1.9 Digitale Eingangssignale

Abschließend zum Kapitel Messtechnik sollen die digitalen Siganleingänge erwähnt werden. Sie geben die aufgenommenen Messsignale des jeweiligen Signals (Druckschalter, Fehlersignale, Lösungsmittelpumpe, Kompressor & Ölspiegelregulator) über die Messdatenerfassung am Steuerschrank und durch das Interface in LabVIEW als I/O Signal wider.

4.2 Steuerungs- und Überwachungssystem

Die Schnittstelle zwischen Hard- und Software bildet die CompactRIO- Einheit der Fa. „National Instruments“. Das Chassis des Controllers ermöglicht die Einbindung der einzelnen Ein- und Ausgabemodule für die unterschiedlichen Signalarten (analog oder digital) und bietet die Möglichkeit einer Kommunikationsstelle über einen Netzwerkanschluss. Dadurch ist der Anschluss, der verschiedenen Sensortypen und Messfühler sowie die Verbindung zum Mess-PC möglich. Der durch das Netzwerk verbundene PC kann mit Hilfe der Software „LabVIEW“ die Daten visualisieren und verarbeiten sowie Ausgangsgrößen setzen und regeln. In Abbildung 4.5 ist diese Schnittstelle schematisch dargestellt.

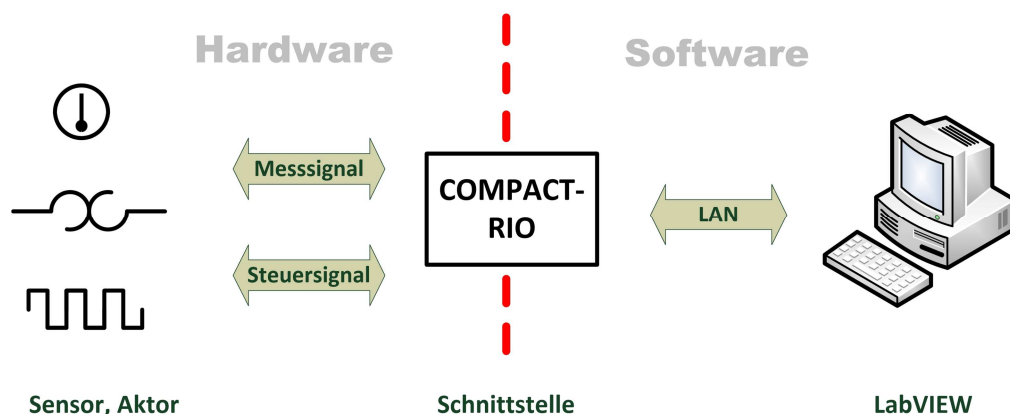


Abbildung 4.5: Datenaustausch der Schnittstelle Hardware/ Software

4.3 Steuergeräte

Steuergeräte (bzw. Stellglieder, Aktoren) ermöglichen durch ihre veränderbaren Stellparameter den Betrieb der Absorptions/Kompressions-Wärmepumpe bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen. Nachfolgend sollen die eingebauten Stellglieder, aufgelistet in Tabelle 4-7, beschrieben werden.

Tabelle 4-7: Liste der Steuergeräte

Stk.	Funktion / Beschreibung	Typ	Hersteller
2	Dreiwegeventil mit Stellmotor	VXG44.15-2,5/ SQS65	Siemens
3	Strangreguliertventile ¹	TA STAD, DN15	TA Hydronics
1	Expansionsventil	AKVA 10-6	Danfoss
2	Frequenzumrichter Verdichter	ESV153N04TXB/ FC-302P11	Lenze (LPC)/ Danfoss (HPC)
1	Frequenzumrichter Lösungsmittelpumpe	ACS310-01E-04A7-2	ABB
1	Heißgas-Bypass ¹ / Kältemittel-Sammelbehälter		
3	Absperrventil ¹ zwischen MSAC & PSAC (Gasleitung)	SVA-ST	Danfoss

¹ manuelle Stelleinrichtungen, die nicht mit der PC-Regelung verbunden sind

4.3.1 Drei-Wegeventil mit Stellmotor

Die zwei eingebauten Drei-Wegeventile haben die Aufgabe die Wärmesenken- und Wärmequellen-Eintrittstemperatur des jeweiligen Wasserkreislaufes zu steuern. Um eine vorgegebene Temperatur zu erreichen wird bspw. im Quellenkreis ein definierter Anteil des kälteren Rücklaufes zum heißeren Vorlauf der Infrastruktur gemischt. Das Ventil selbst hat eine lineare Regelcharakteristik der Mischung, die in Abbildung 4.6 (links) durch das Verhältnis von Durchfluss (über den k_v -Wert) zu Ventilhub je Strang dargestellt ist. Daneben (rechts) ist der durch den Stellantrieb gegebene Zusammenhang zwischen dem Volumendurchfluss und dem Stellsignal dargestellt. Die darin enthaltenen möglichen Zufluss-Kennlinien beschreiben eine gleichprozentige (log) und eine lineare (lin) Ventilkennlinie. Durch Umstecken des Signalkabels am Stellantrieb kann die gewünschte Charakteristik für den Stellantrieb eingestellt werden. Für die gegenständliche Regelung wurde eine lineare Ventilkennlinie gewählt. Der reversierbare Stellmotor am Ventil wird von einem proportionalen Stellsignal von 0 bis 10 V, angesteuert und erzeugt über ein blockiersicheres Getriebe den gewünschten Hub zur Einstellung des Mischverhältnisses am Dreiwegeventil.

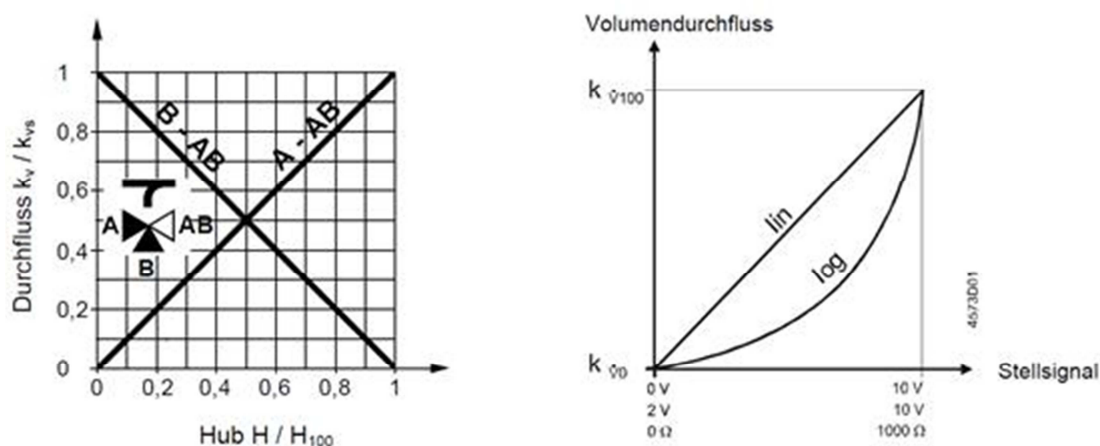


Abbildung 4.6: Regelcharakteristik Dreiwegeventil (links) und Stellantrieb (rechts); (Siemens, 2014, a, b)

Der sich einstellende Durchfluss des jeweiligen Stranges (A-AB bzw. B-AB) kann für Wasser mit Hilfe der Gleichung Gl. 4-7 beschrieben werden.

$$k_V = \frac{\dot{V}}{\sqrt{\Delta p_{bar}}} \quad \text{Gl. 4-7}$$

Der Durchfluss-Nennwert (k_{VR}) der Ventile bei voll geöffnetem Ventil und 1bar Differenzdruck beträgt gemäß Definition bei 5 bis 30-gradigem Wasser 2,5 m³/h. (Siemens, 2014, a)

4.3.2 Strangreguliertventile

Über die eingebauten Schrägsitz-Strangreguliertventile kann der Volumenstrom des Quellen- bzw. Senkenkreislauf geregelt werden. Die im Wärmequellenkreislauf direkt nach den Gaskühlern angebrachten Ventile, können daher die Volumenströme der Quelle an den einzelnen Gaskühler (AUX1 bzw. AUX2) variieren bzw. zur Gänze absperren.

4.3.3 Expansionsventil

Das Expansionsventil ist nach dem Lösungswärmetauscher SHX1 und vor dem Sammelbehälter der reichen Lösung auf Niederdruckniveau (MSAC) positioniert und soll den Eintrittszustand, d.h. den Niederdruck (und die dadurch resultierende Temperatur), in dem Desorber regeln. Die Öffnungszeit des Ventils kann durch eine Pulsweitenmodulation gesteuert werden. Während einer Periode von fünf Sekunden wird durch die Regelung für bestimmte Zeit Spannung an die Ventilspule angelegt, wodurch sich das Ventil öffnet. Durch das Verhältnis von Öffnungs- zu Schließzeit wird der aktuelle Durchfluss eingestellt. Bei hohem Durchfluss ist das Ventil nahezu während der gesamten Pulsdauer geöffnet, während es sich bei geringerem Durchfluss nur kurzzeitig öffnet.

4.3.4 Frequenzumrichter (FU)

Durch die Frequenzumrichter der jeweiligen Drehstrommotoren von Verdichter bzw. Lösungspumpe kann die vom Netz vorgegebene Eingangsspannung durch Frequenz- und Amplitudenbeeinflussung geändert werden. Durch den linearen Zusammenhang von Spannung und Stromstärke kann die Leistung und folglich auch die Drehzahl des jeweiligen Motors verändert werden, die aufgrund der sich ändernden Hubgeschwindigkeit einen direkten Einfluss auf die Massenströme im Kreislauf haben.

Die zur Verfügung gestellten FU's der Kompressoren sind für den erforderlichen Leistungsbedarf dimensioniert und sind für den Einbau in den Schaltkasten nicht geeignet. Aus diesem Grund sind sie in angefertigten Schutzkästen, die aus Platzgründen an anderen Bereichen der Anlage eingebaut sind, montiert.

4.3.5 Kältemittel-Sammelbehälter (bzw. Gas-Bypass)

Durch die Ammoniakmenge im Kreislauf wird der Betriebspunkt beeinflusst. Umgekehrt bedeutet das, dass zur Einstellung von definierten Betriebszuständen die Menge an NH₃ im System angepasst werden muss. Dies geschieht über den Gas-Bypass, der überflüssiges bzw. fehlendes Ammoniak mittels eines Kältemittel-Sammelbehälters (Gasflasche) aus dem Kreis herausnehmen bzw. es wieder zuführen kann. Mit Hilfe dieser Konzentrationssteuerung kann bspw. bei zu hohen Hochdruckverhältnissen und folglich resultierenden hohen Kompressor-Austrittstemperaturen Kältemittel aus dem System genommen werden und so das Hochdruckniveau gesenkt werden. Abbildung 4.9 zeigt die Bypassleitung zur Kältemittelentnahme aus dem Hochdruck-Pufferbehälter, die in weiterer Folge in die Gasflasche bzw. den PSAC führt. Umgekehrt kann vom Kältemittel-Sammelbehälter Ammoniak in den PSAC auf Niederdruckniveau zugeführt werden. Die Gasflasche ist, über einen Kugelhahn absperrbar, mit der Bypassleitung verbunden. Der eigentliche Bypass verbindet den Hochdruck-Pufferbehälter, des heißen Ammoniaks vor dem Absorber, mit dem Sammelbehälter der armen Lösung nach dem Desorber (PSAC). Mit einem Nadelventil an jedem Behälter kann der Ammoniak Zu- und Abfluss per Hand reguliert werden und so Kältemittel von der Hochdruckseite entnommen oder zur Niederdruckseite zugeführt werden.

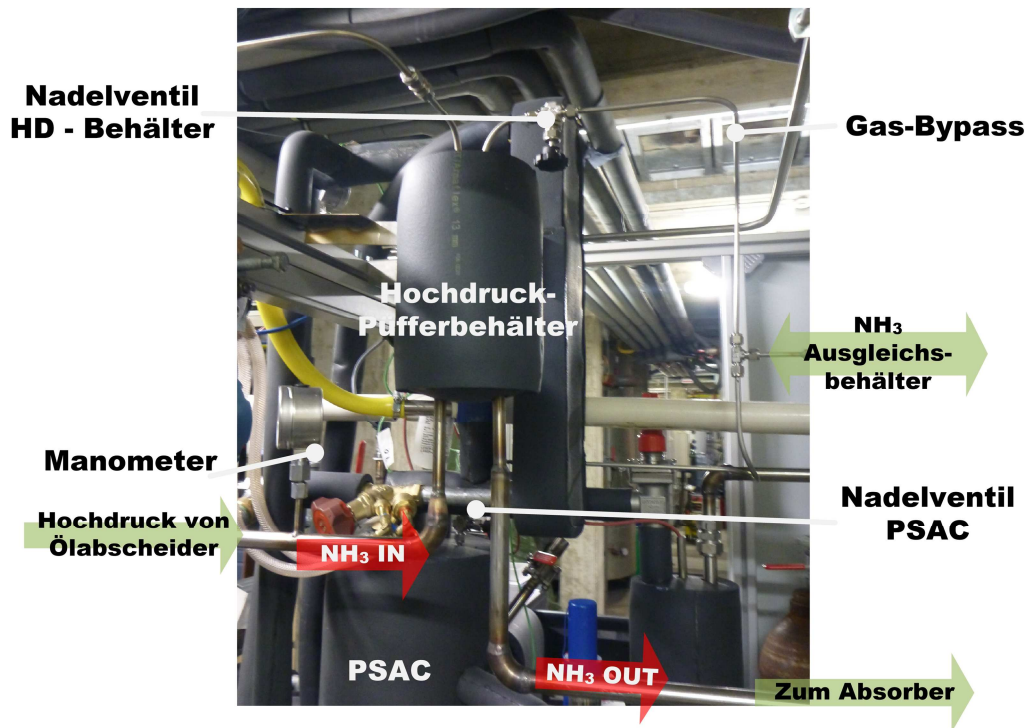


Abbildung 4.7: Bild Gas-Bypass mit Verbindung zur Kältemittel-Gasflasche

In Abbildung 4.8 ist dieser Regeleinfluss nochmals im $\log(p)/(-1/T)$ -Diagramm dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich der grün dargestellte Lösungskreislauf bei gleichbleibenden Temperaturniveaus in Absorber und Desorber infolge einer Ammoniakentnahme zu Bereichen ärmer Konzentrationen verschiebt und sich dabei auch das Druckniveau senkt.

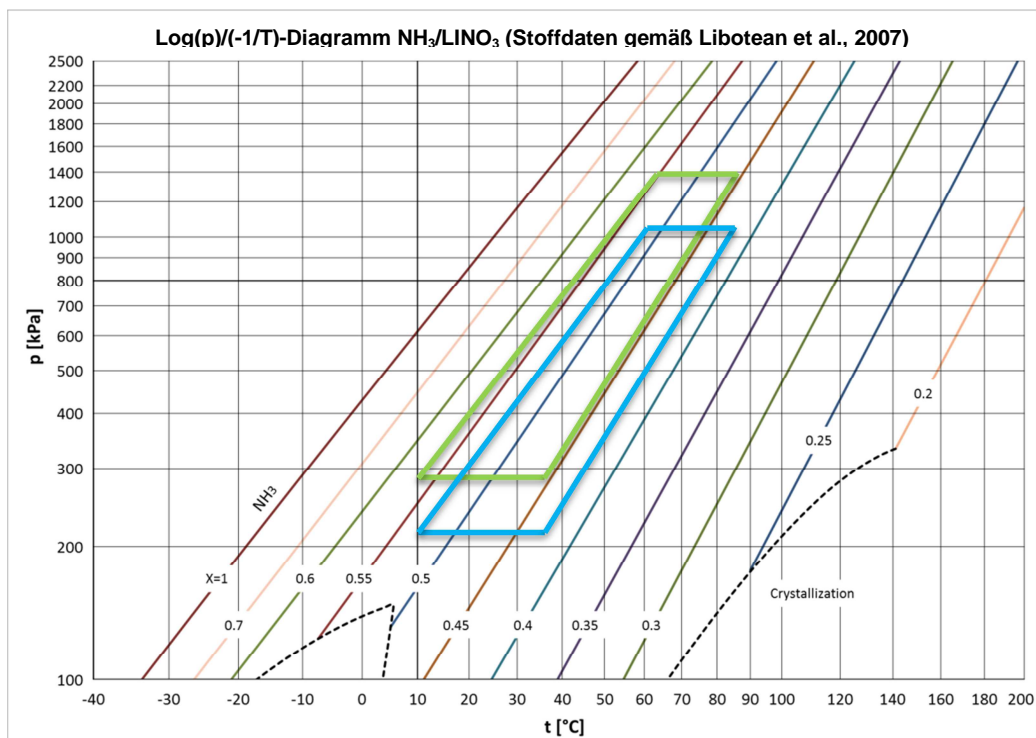


Abbildung 4.8: Auswirkung der Regelung durch Veränderung der Ammoniakfüllmenge auf den Prozess im $\log(p)/(-1/T)$ - Diagramm

In Abbildung 4.9 ist eine Veränderung der Prozesstemperaturen bei gleichbleibendem Druckniveau und die in Folge dessen anzupassenden NH_3 -Konzentration der armen und reichen Lösung im System dargestellt. An dieser Stelle sei auf Kapitel 2.4.2 verwiesen, wo dieser Zusammenhang aufgezeigt wird.

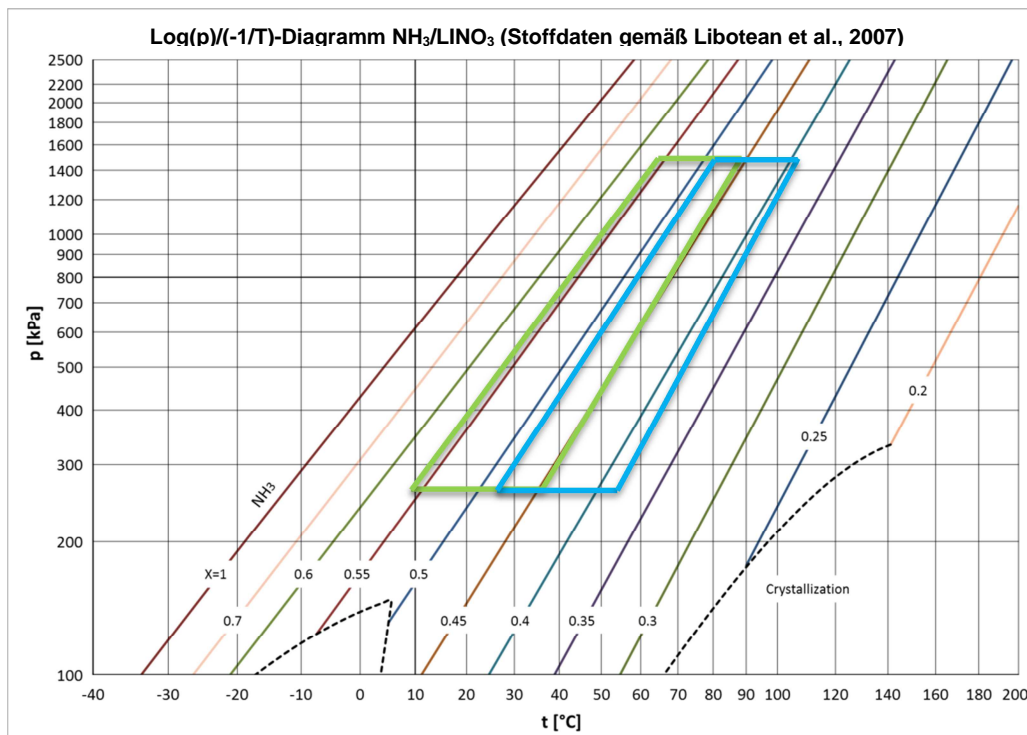


Abbildung 4.9: Auswirkung der Regelung durch Veränderung der Betriebstemperaturen auf die Ammoniakfüllmenge im Prozess, im $\log(p)/(-1/T)$ - Diagramm

4.3.6 Absperrventil SVA-ST

Mit Hilfe des Absperrventils kann das, nach der Lösungsdrösel aus der Lösung ausgetretene, gasförmige Kältemittel aus dem MSAC direkt in den PSAC strömen, ohne den Desorber durchlaufen zu müssen. Durch die veränderbare Ventilöffnung kann dieser Gas-Bypass eingestellt werden. Die Einstellung am Ventil hat Einfluss auf die sich im Betrieb einstellende Füllstandshöhe der Lösung im MSAC. Bei geschlossenem Ventil ist der Behälter fast ausschließlich gasförmig gefüllt und das Kältemittelgas wird über den Desorber in den PSAC geführt.

4.3.7 Digitale Steuersignale

Abschließend zum Kapitel Steuergeräte sollen, analog zum Kapitel „Digitale Eingangsgrößen“, die digitalen Steuersignale angesprochen werden. Kompressoren, Lösungspumpe, Ölsumpfeheizung, Abluft-Ventilator, Lösungsdrösel und die Wasserkreislaufpumpen können mittels Ein-/Ausschalter geschaltet bzw. zuvor initialisiert werden. Vergleiche hierzu Abbildung 4.17 im Kapitel LabVIEW-Einbindung.

4.4 Regelung

Im folgenden Abschnitt werden die zu Grunde liegenden Regelschemen und die Regelstrategie erläutert.

4.4.1 Allgemeines

Die Regelung hat die Aufgabe bestimmte vordefinierte Sollwerte, unter Einfluss der Regelstrecke und Störeinfluss anderer Parameter, zu erreichen und stabil zu halten. Ein solcher, sich wiederholender Vorgang durch Steuerung und Lenkung bildet die Grundlage für

einen Regelkreis. Abbildung 4.10 zeigt die allgemeine Darstellung eines Regelkreises, der einen vorgegebenen Sollwert (w) mit dem aktuellen Messwert (y) vergleicht und über den Regler und das Stellglied die Regelstrecke ansteuert um somit die Differenz aus Ist- und Sollwert auszugleichen. Die durch die Regelstrecke gegebene Regel-Charakteristik ist maßgeblich durch das Stellverhalten bestimmt.

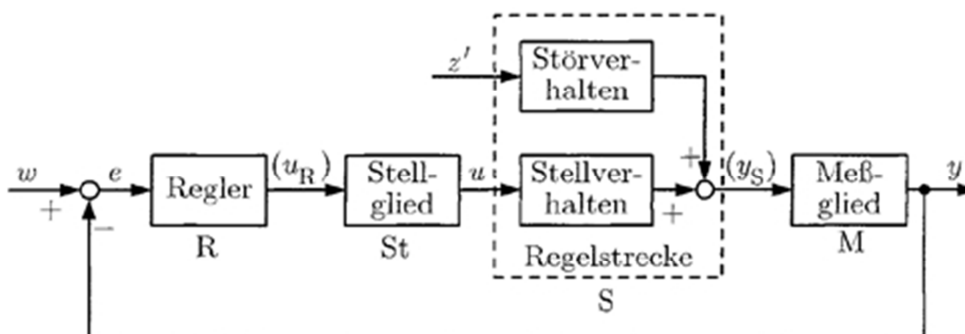


Abbildung 4.10: Schema Regelkreis (Unbehauen, 2008, S.11)

Die am Versuchsstand eingesetzten Regler-Modelle sind PID-Regler. Auf Grund der Kombination aus Proportional-, Integral- und Differenzialregler wird dieser Regler-Typ durch seine Anpassungsfähigkeit weit verbreitet eingesetzt.

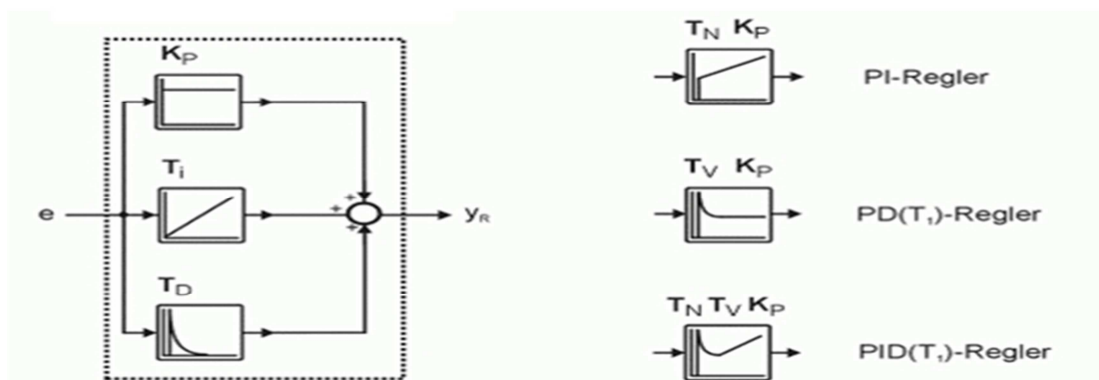


Abbildung 4.11: Blockschaubild eines PID Reglers (www.geltec.de¹⁰, 10.03.2014)

Die Regelfunktion des P-Gliedes stellt einen rein proportionalen Zusammenhang zwischen der Stellgröße u_R und der Regeldifferenz e (= Sollwert (w) minus Istwert (y)) auf, wobei der Proportionalitätsfaktor K_P eine Konstante ist. Im I- & D-Glied wird dieser Zusammenhang durch die proportionale Abhängigkeit der Stellgröße die von dem zeitlichen Integral (I) bzw. Differential (D) der Regeldifferenz ersetzt. Faktoren für Integrationszeit (Nachstellzeit T_N) bzw. den Differentialanteil (Vorhaltezeit T_V) können dabei vorgegeben werden. Durch Addition der Signalwerte der einzelnen Reglertypen wird der PID-Regler, wie in Abbildung 4.11 ersichtlich, zusammengesetzt.

4.4.2 Regelgrößen

Im Betrieb können durch das Setzen von Sollwerten im Interface der Bedienoberfläche verschiedene Parameter und somit unterschiedliche Betriebszustände vorgegeben werden.

Temperatur des Quellen- und Senkenkreislaufes

Durch Setzen des Sollwertes der Wärmequellen/Wärmesenken-Eintrittstemperatur wird durch den in LabVIEW hinterlegten PID-Regler die Temperatur des Senken- bzw. Quellenkreislaufes

¹⁰<http://www.geltec.de/startup-ndash-access-ndash-basics-lehrsysteme/konzept-basics-uebersicht-zum-trainingssystem/trainingssystem-basics/dt1-regler/>

an den entsprechenden Messstellen am Absorber- und Desorbereintritt geregelt. Die Regelung erfolgt durch die in Kap. 3.4 besprochene Beimischschaltung des jeweiligen Wasserkreislaufes.

Füllstand des RSAC/ Drehzahl der Lösungsmittelpumpe

Der Lösungsmittelmassenstrom wird durch die Drehzahl der LMP gesteuert. Durch den Regelbereich von 10 bis 87,5 Hz, kann ein Massenstrom von etwa 60 bis 600 kg/h eingestellt werden. Die Drehzahl der LMP wird automatisch durch den Füllstand des Hochdrucksammelbehälters geregelt, kann aber auch durch eine Umstellung manuell eingestellt werden. In Abbildung 4.12 ist das beschriebene Regelschema dargestellt.

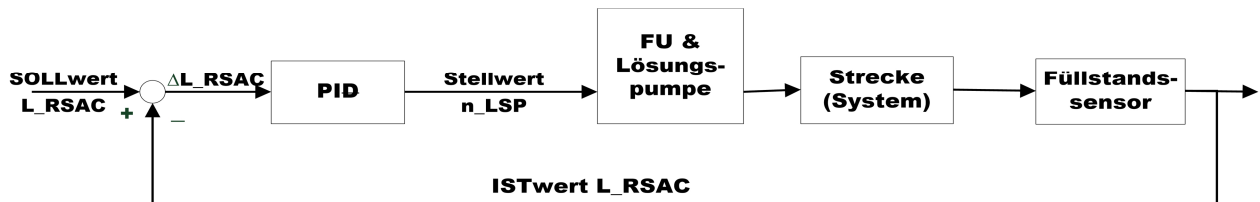


Abbildung 4.12: Regelschema Lösungspumpendrehzahl über Füllstand RSAC

Drehzahl der Kompressoren

Durch Einstellen der Frequenz des Niederdruckkompressors kann seine Drehzahl variiert und folglich auch die Leistung (bzw. der Kältemittelmassenstrom) geregelt werden. Der regelbare Frequenzbereich liegt zwischen 35 und 75 Hz, was einem Drehzahlbereich von 1015 bis 2175 min^{-1} entspricht. Zur Sicherstellung gleichartiger Verdichtungsverhältnisse von Hoch- und Niederdruckstufe, erfolgt eine automatische Drehzahlanpassung des Hochdruckkompressors an die Drehzahl des Niederdruckkompressors. Gl. 4-8 zeigt die Abhängigkeit der HPC-Drehzahl von dem Gesamtdruckverhältnis, dem Hubvolumen beider Verdichter und der Drehzahl des Niederdruckkompressors. Anhand eines Multiplikators zur Feineinstellung kann das Drehzahlverhältnis noch manuell im Betrieb angepasst werden. Auch bei 1-stufigem Betrieb des HPC, kann dessen Frequenz manuell eingestellt und verändert werden.

$$n_{HP} = \sqrt{\frac{p_{LP,mess}}{p_{HP,mess}} \cdot \frac{V_{LP}}{V_{HP}}} * n_{LP} \quad \text{Gl. 4-8}$$

Niederdruckniveau (im PSAC)

Anhand der Expansion der Lösung von Hochdruckniveau auf die Niederdruckseite in der Lösungsdrossel kann der Niederdruck in Folge des Durchflusses bestimmt werden. Der abgeführte Kältemittelvolumenstrom aus dem PSAC in den Niederdruckkompressor ist durch die Kompressordrehzahl vorgegeben. Durch den Niederdruck p_{low} wird die Dichte des Kältemittels sowie die Entgasungsbreite im Desorber bestimmt. Bei zu geringem Durchfluss durch die Lösungsdrossel reicht die desorbierte Ammoniakmenge nicht mehr aus, um den Druck im PSAC konstant zu halten, da der Massenfluss nicht ausgeglichen ist ($\dot{m}_{zu} \neq \dot{m}_{ab}$). Die Dauer der Ventilöffnung innerhalb eines fünf Sekunden Zykluses wird durch die Pulsdauer des Signals eingestellt und bestimmt über den Durchfluss (gemeinsam mit einem unter Umständen manuell zugeführten Volumenstrom) das Druckniveau im PSAC. Abbildung 4.13 zeigt schematisch das Regelschema durch das Drosselsignal unter dem Einfluss einer manuellen NH_3 Zufuhr aus dem Kältemittelreservoir.

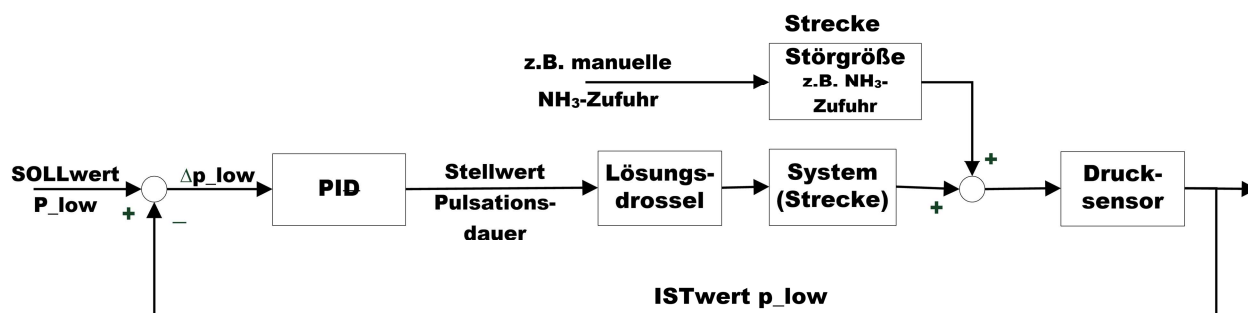


Abbildung 4.13: Regelschema Pulsweitenmodulation der Lösungsdrössel über den Niederdruck im PSAC

Durch die Verringerung der Pulsweite bleibt das Dröselventil während der fünf Sekundenperiode länger geschlossen wodurch der Niederdruck, aufgrund des reduzierten Volumenstroms aus dem Hochdruck, sinkt.

Der implementierte PID-Regler regelt das Pulsweitesignal selbstständig, eine manuelle Vorgabe (analog zur Drehzahlregelung des HPC) der Pulsationsdauer ist ebenso möglich.

Ammoniak-Füllung

Abhängig vom Betriebszustand muss durch manuelle Zu- bzw. Abfuhr von Ammoniak die Lösungskonzentration im System verändert werden, um so die Druckniveaus anzupassen (siehe dazu Kap. 4.3.5). In der Anlage ist diese Möglichkeit durch den, an den NH_3 - Bypass gekoppelten, absperrbaren Puffer einer 50 l Druckgasflasche gegeben. Diese manuelle Regelmöglichkeit ermöglicht eine Ammoniakabfuhr von der Hochdruckseite sowie eine Zufuhr zur Niederdruckseite. Das in der Flasche aufgenommene Gas verflüssigt sich dabei ab ca. 8 bar (bei 20°C).

Bei den ersten Messversuchen erwies sich diese Regelmöglichkeit als äußerst wichtig um exakte Einstellungen der Durchflussniveaus bei vorgegebenen Temperaturniveaus manuell vollziehen zu können.

4.5 LabVIEW – Arbeitsumgebung

LabVIEW ermöglicht die Regelung, das Monitoring und die Datenspeicherung im Betrieb. Der Aufbau, die Struktur und die Anbindungsmöglichkeiten an den Prüfstand sollen im Folgenden kurz besprochen werden.

Zum Starten der Anlage muss ein Programm, das zur besseren Strukturierung aus verschiedenen Unterprogrammen (sogenannte VI's) besteht, ausgeführt werden. In Abbildung 4.14 ist die Baumstruktur des Hauptprogramms „HyPump“ dargestellt die in zwei Bereiche unterschieden werden kann. Ein Bereich stellt die hinterlegten Programme am Laufwerk des PC's dar, der andere die CPU am Chassis der CompactRIO-Einheit, welche die erstellten Programme in Echtzeit (augenblicklich) ausführt. Beide Bereiche können noch weiter unterteilt werden. Die VI's des PC's haben verschiedene Aufgaben wie Regelung, Umrechnung der Messsignale anhand der Kalibriereinstellungen oder Ausgabefunktionen der gemessenen Werte.

Die Module am Chassis bieten die Anschlussmöglichkeiten der einzelnen Signalübertragungen. Modul 1 und Modul 2 nimmt acht analoge Ausgangssignale auf (z.B. Stellsignale der Mischventile,...), durch Modul 3 können 16 analoge Eingangssignale (z.B. Drucksensoren, Füllstandsensoren, ...) angeschlossen werden. Digitale Ein- und Ausgangssignale, zu denen alle Schalter und Fehlermeldungen zählen, können an Modul 4 angebunden werden. Die Widerstandsthermometer werden an den acht Steckplätzen der Module 5 und 6 angeschlossen, alle Thermoelemente an den 32 der Module 7 und 8. Das VI Counter wiederholt sekundlich alle

Einzelmessungen und ermöglicht eine kontinuierliche Programmausführung bzw. Datenerfassung.

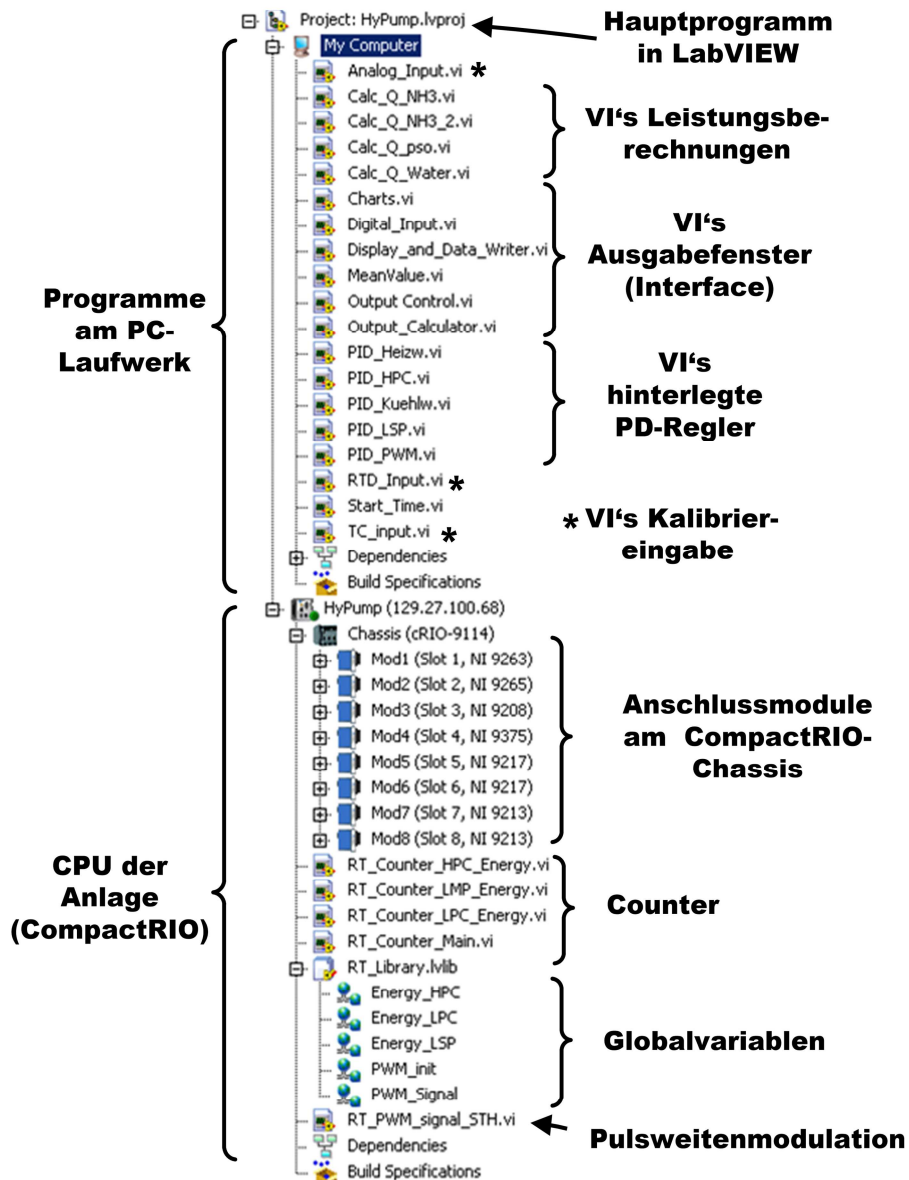


Abbildung 4.14: Programmstruktur in LabVIEW

In der Messwertliste im Anhang sind alle Steckplätze der beschriebenen Module aufgelistet und beschrieben.

Die notwendigen Regelgrößen wurden durch die in der Software hinterlegten PID-Regler in das Regelsystem der Anlage in LabVIEW integriert. Abbildung 4.15 zeigt schematisch die Einbindung und die Schnittstelle der Software in den Regelkreis.

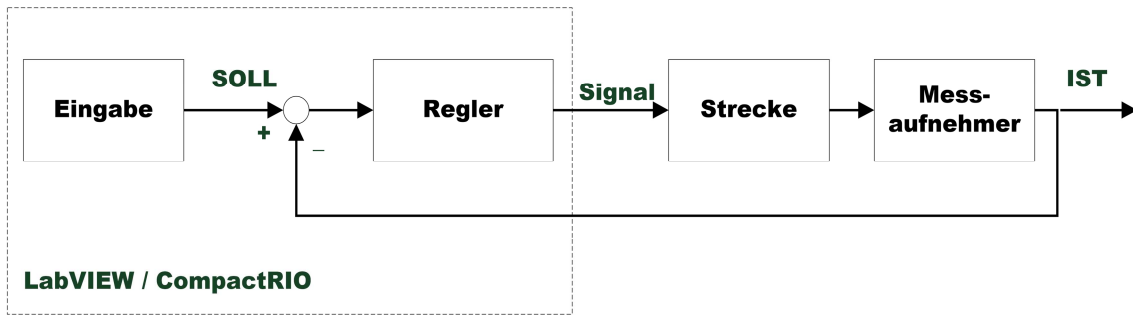


Abbildung 4.15: Einbindung in LabVIEW

Die Eingabe erfolgt im Interface der frei gestalteten Benutzeroberfläche durch weiteres VI in LabVIEW. Das Unterprogramm „Display and Data Writer“ zeigt die tabellarisch aufgelisteten Messwerte des aktuellen Betriebszustandes. Diese Ausgabedaten sind gegliedert nach Kontroll- und Signalinformationen der einzelnen angesteuerten Ein- und Ausgabemodule. Abbildung 4.16 zeigt das beschriebene Fenster.

Start der Messung

Analog Inputs, (Drücke, Füllstände, etc.)

Variable	Value	Unit
p_high	3,637	bar abs
p_mid	2,315	bar abs
p_low	2,307	bar abs
V_src	-0,333	l/h
V_snk	-2,152	l/h
m_dot_nh3	0,165	kg/h
rho_nh3	1,82	kg/m³
m_dot_pso	-0,079	kg/h
rho_pso	1322,466	kg/m³
L_RSAC	30,731	%
L_MSAC	0,068	%
L_PSAC	16,022	%
dp_oil_sep	-0,008	bar
dp_snk_ALIX	0,038	bar
dp_src_ALIX	-0,017	bar
na	0	na

Messwerte Temperaturen Thermocouple (Kreislauf)

Variable	Value	Unit
io_hp_LSP		I/O
io_hp_HPC		I/O
io_hp_LPC		I/O
io_lb_LSP		I/O
io_lb_HPC		I/O
io_lb_LPC		I/O
err_LSP_motor		I/O
err_LPC_motor		I/O
err_HPC_motor		I/O
err_LPC_oil		I/O
err_HPC_oil		I/O
P_el_LPC (Signal)		I/O
P_el_HPC (Signal)		I/O
P_el_LSP (Signal)		I/O
na		I/O
na		I/O

Digital Inputs, Störsignale & Energiezähler

Variable	Value	Unit
t_snk_ABS_in	21,25	°C
t_snk_ABS_o	20,07	°C
t_snk_SUP_o	19,00	°C
t_src_DES_in	20,78	°C
t_src_DES_ou	20,09	°C
t_src_ALIX_1	20,55	°C
t_src_ALIX_2	20,66	°C
t_oil_comp	20,79	°C

Messwerte Temperaturen Pt100 (Wärmequelle, Wärmesenke, Kompressoröl)

Variable	Value	Unit
t_NH3_PSAC_out	20,53	°C
t_NH3_ALIX_1_out	21,07	°C
t_NH3_LPC_out	21,06	°C
t_NH3_SHX_2_out	20,99	°C
t_NH3_ALIX_2_out	20,95	°C
t_NH3_HPC_out	20,51	°C
t_NH3_SLIP_out	20,75	°C
t_NH3_OS_out	20,51	°C
t_PSO_PSAC_out	20,19	°C
t_PSO_PMP_out	19,69	°C
t_PSO_SHX_1_out	19,48	°C
t_PSO_SHX_2_out	20,77	°C
t_RSO_ABS_out	19,94	°C
t_RSO_RSAC_out	19,62	°C
t_RSO_SHX_1_out	19,46	°C
t_VAP_STH_out	20,67	°C
t_RSO_STH_out	20,12	°C
t_RSO_DES_out	20,13	°C
t_RESERVE_1	19,8	°C
t_RESERVE_2	20,37	°C

Messwerte Temperaturen Pt100 (Wärmequelle, Wärmesenke, Kompressoröl)

Variable	Value	Unit
sig_src_valve	5	V
sig_snk_valve	5	V
sig_f_LPC	0,01	mA
sig_f_HPC	0,02	mA
sig_f_LSP	0,01	mA
sig_PWM_STH	50	%
io_ALL		I/O
io_LSP		I/O
io_LPC_init		I/O
io_HPC_init		I/O
io_snk_pump		I/O
io_src_pump		I/O
io_HPC_release		I/O
io_HPC_release		I/O
io_FU_main_power		I/O
io_ventilator		I/O
io_heizband		I/O

Ausgabesignalinformationen (Regelung, Schalter)

Variable	Value	Unit
E_el_LPC	5,78E+3	Wh
E_el_HPC	4,36E+3	Wh
E_el_LSP	500	Wh
Q_ABS	2,94	W
Q_SLIP	-0,03	W
Q_DES	0,27	W
Q_ALIX_1	0,06	W
Q_ALIX_2	-0	W
Q_SHX_1	0,01	W
Q_SHX_2	-0,05	W

Leistungswerte (berechnet)

Stoppen der Messung und Datenspeicherung

Programme ENDE! date/time string 21.03.2014 12:01:09

file path K:\LabVIEW\Daten

Name Ending Daten.xls

Abbildung 4.16: Benutzeroberfläche in LabVIEW („Display and Data Writer“)

Das Unterprogramm „Output Control“ dient als eigentliche Bedienoberfläche. Sie ist in Abbildung 4.17 dargestellt. Die verschiedenen einstellbaren PID-Regler sind auf der rechten Seite des Fensters zu finden. Die Regelwerte Wärmequellen-Eintrittstemperatur Absorber und Wärmesenken-Austrittstemperatur Desorber der Wasserkreisläufe werden bei „set value“ eingestellt. Ein Umschalten auf eine automatische oder manuelle Signaleinstellung beim entsprechenden Regler, ist durch Drücken des Knopfes bei „Manuell“ möglich. Durch Eingabe der Drehfrequenz im Eingabefenster des LPC Drehzahlreglers kann die gewünschte Drehzahl, die im Ausgabefenster daneben dargestellt ist, eingestellt werden. In gleicher Weise wie zuvor kann, mit dem Knopf „einstufiger Betrieb“, der HPC alleine betrieben werden und somit ein einstufiger Betrieb realisiert werden.

Auf der linken Seite des Fensters finden sich Knöpfe zum notwendigen Initialisieren (Spannungsanlegen) und Ein-/ Ausschalten der einzelnen Komponenten, sowie ein Hauptschalter, der den gesamten Strom der Geräte unterbricht. Dieser wird bei Fehlermeldungen (Störsignale) ebenfalls im Programm unterbrochen. Der Regler im unteren Bereich des Bildes ermöglicht über die Eingabe bzw. das Ändern des Pulsweitsignals der Lösungsdrossel eine entsprechende Niederdruckanpassung. Durch den Regler darüber können, über die automatische oder manuelle Eingabe der Lösungspumpendrehzahl, die Füllstände beeinflusst werden. Im Ausgabefenster neben den Reglern, wird der jeweilige zeitliche Regelverlauf des Steuersignals ausgegeben. In Abbildung 4.17 ist das beschriebene Fenster „Output Control“ zum besseren Verständnis dargestellt.

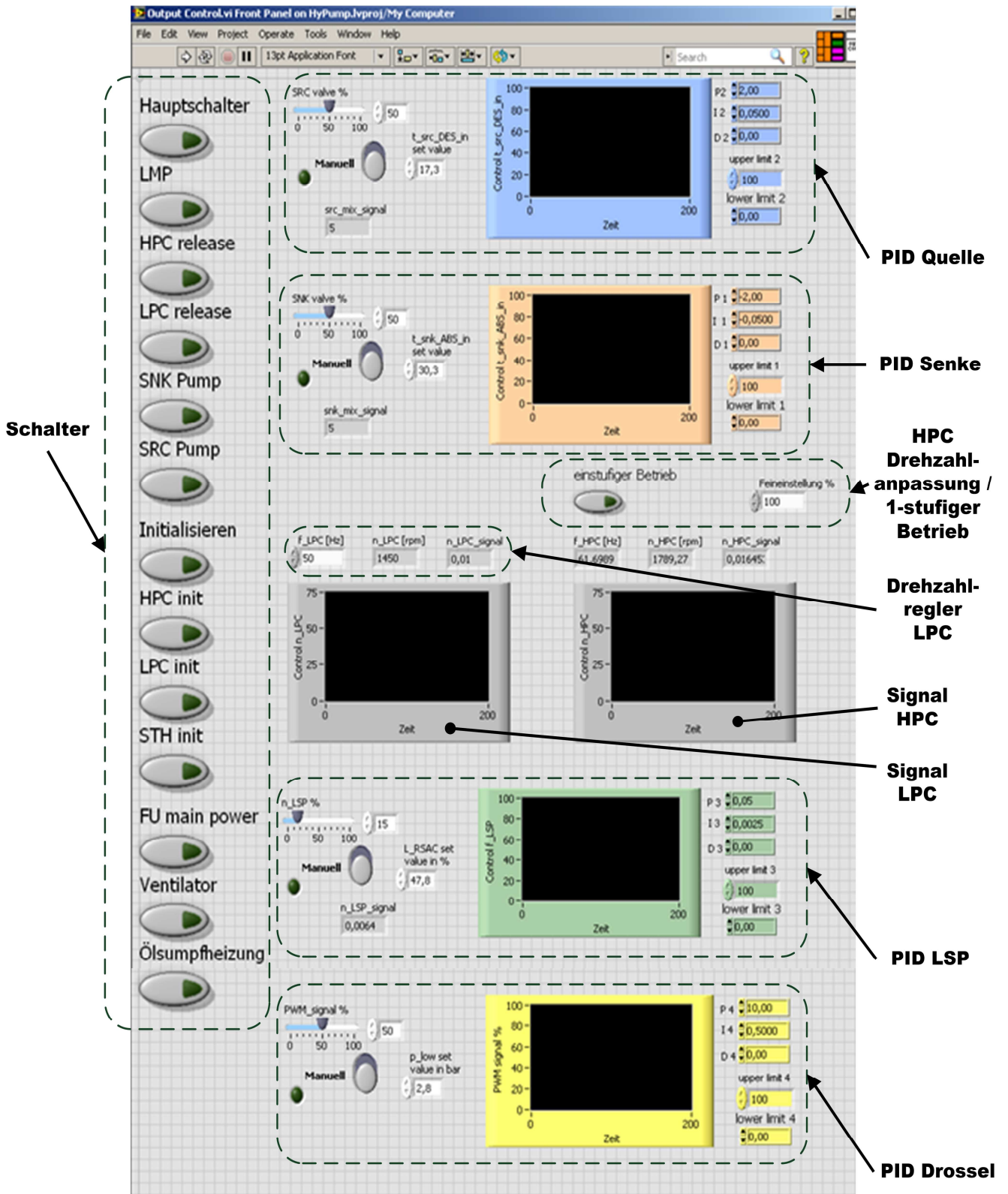


Abbildung 4.17: Benutzeroberfläche „Output Control“

Im Programm „Charts“ sind weitere graphische Ausgabefenster implementiert. Somit besteht die Möglichkeit gleichzeitig mehrere Ausgaben in einem Sekunden- bzw. Minutenverlauf, zuvor gewählter Werte, wie Druck, Temperatur oder Leistung zu verfolgen. Neben der Messung werden alle anfallenden Messwerte des gemessenen Betriebszeitraumes als externes Datenfile gespeichert.

5 ERSTINBETRIEBNAHME DER VERSUCHSANLAGE

Auftretende Besonderheiten im Zuge der Inbetriebnahme, der Füllvorgang sowie der Ein- bzw. Ausschaltvorgang der Anlage werden im folgenden Kapitel beschrieben.

5.1 Füllen der Anlage

Um den Kreislauf mit dem Arbeitsstoffgemisch zu füllen mussten diverse Vorbereitungen getroffen werden. Im folgenden Kapitel soll auf diese Vorbereitungen eingegangen werden und die Arbeitsschritte zum Füllen beschrieben werden.

Füll- und Mischbehälter

Der Mischbehälter (siehe Abbildung 5.2 bzw. Abbildung 5.3) wurde eigens für diesen Versuchsstand entworfen und gefertigt. Es handelt sich um eine Edelstahl-Schweißkonstruktion mit einer 1" Rohrschleife integrierten Kühlleitung und mit einem schraubbaren 1½" Verschluss, über den das LiNO₃-Salz eingefüllt werden kann. Zwei absperrbare Leitungsanschlüsse im oberen und unteren Bereich des Behälters dienen als NH₃-Zufuhr und als Abgang der füllfertigen Lösung. Ein Manometer und das eingebaute Schauglas geben Aufschluss über den Zustand des Inhalts. Vier Aufhängungspunkte ermöglichen ein flexibles und sicheres Aufhängen des Behälters und bieten so auch verschiedene Lage-Ausrichtungsmöglichkeiten. Bei der Konstruktion wurde die europäische Richtlinie für Druckbehälter berücksichtigt und der Füllbehälter wurde abschließend mit 20 bar Überdruck geprüft.

Herstellung der Lösung

Das Arbeitsstoffgemisch ist, wie schon in Kap. 2.5 beschrieben, eine Mischung aus LiNO₃ und dem Kältemittel NH₃. Beim ersten Lösungsvorgang bildet das Salz mit dem sich verflüssigenden Ammoniak eine zähflüssige Grenzschicht aus und lässt das restliche, hinter dieser Schicht liegende Salz verklumpen, was in engen Querschnitten zu Problemen führen kann. Um sicher zu stellen, dass sich kristallines LiNO₃ nicht beim Lösungs- und Füllvorgang im Kreislauf der Anlage verteilt und dabei in engen Querschnitten verklumpt, musste vorab eine füllfertige, flüssige Lösung hergestellt werden. Der dafür erforderliche Mischaufbau ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

Nach der Reinigung des Mischbehälters folgte (vor der Salzfällung) ein Absaugen der enthaltenen Luft, um letzte Wasserrückstände zu verdampfen. Das, nahezu zu einem Block verklumpte, Lithiumnitrat musste nach dem entpacken zerkleinert werden und konnte über einen Trichter in den Behälter gefüllt werden. Es folgte ein erneutes Vakuumieren um die eventuell im Salz angereicherte Luftfeuchte -so weit möglich- zu entfernen.

Zur Ermittlung der gewünschten Lösungskonzentration musste das Massenverhältnis der zugefügten Stoffe bestimmt werden. Ausgehend von der zuvor abgewogenen, zugeführten Menge LiNO₃ konnte über den Druckanschluss solange Ammoniak zugeleitet werden, bis die gewünschte Lösungskonzentration erreicht wurde. Die Massenmessung des NH₃ erfolgte durch eine Gewichtsmessung der Ammoniak-Druckgasflasche mittels Plattformwaage. Um die Reaktionsfläche bei der anfänglichen Absorption im Salz zu vergrößern, und somit den Absorptionsvorgang zu beschleunigen wurde der Behälter horizontal ausgerichtet. Unter Beachtung der Einsatzgrenzen des Druckbehälters wurde der im Mischbehälter vorgegebene Druck durch die Druckarmatur der NH₃-Flasche auf 2 bar (Überdruck) eingestellt.

Die an der Reaktionsfläche entstehende, gelartige Lösungsschicht bildete eine stark reaktionsverzögernde Sperrschicht zwischen dem weiter einströmenden NH₃ und dem hinter dieser Schicht liegende LiNO₃ und ließ den Behälterdruck rasch ansteigen und den zugeführten Ammoniak-Massenstrom sinken. Durch zeitweises Schwenken des Behälters erfolgte eine Umschichtung und es konnte eine erhöhte Absorption bei gleichzeitigem Druckabfall im

Behälter erreicht werden, jedoch stellte sich nach kurzer Zeit (2-5 min) wieder ein ähnlicher gasgesättigter Zustand ein.

Durch eine umgestellte Ausrichtung des Mischbehälters wurde, nachdem sich eine einheitliche zähflüssige Masse gebildet hat, das Gas von unten eingeleitet. Durch die dabei vollzogene Blasenabsorption konnte auch ein kontinuierliches Umschichten der flüssigen Lösung erzielt werden und machte eine kürzere Herstellzeit der Lösung möglich. In Tabelle 5-1 sind die Eckdaten für diesen Herstellprozess festgehalten. Die dabei angesetzten Mengen zur Füllung der Anlage haben sich aus Simulationswerten und den zugehörigen Volumen berechnet.

Die bei der Absorption entstandene Lösungswärme wurde durch die interne Kühlung über die eingebaute Rohrschleife und ein Lauda-Becken (verwendet als Thermostat) abgeführt. Vor allem zu Beginn der Lösungsherstellung stieg die Temperatur im Behälter stark an, weshalb es für die Absorption zwingend notwendig war, diese Wärme rasch abzuführen und dadurch den Sättigungsdruck niedrig zu halten.

Tabelle 5-1: Daten der Lösungsherstellung

Kennwert	Wert	Einheit
Lösungszeit	21 (3 Etappen)	[h]
Lösungskonzentration	0,48 (0,55 ¹)	[kg _{NH} /kg _{LSG}]
Masse LiNO ₃	12,12	[kg]
Masse NH ₃	11,12 (13,5) ¹	[kg]
Kühltemperaturen	20 bis 10	[°C]
Lösungstemperatur	< 50	[°C]

¹ endgültige Füllmenge bzw. Konzentration nach zusätzlichem Zufügen von Ammoniak direkt an der Anlage

In Abbildung 5.1 sind die unterschiedlichen Lösungszustände am Schauglas des Behälters dokumentiert. Beginnend von links nach rechts ist das ungelöste LiNO₃, die sich mit NH₃ entwickelnde zähflüssige Mischphase und die 48 % Ammoniaklösung dargestellt.

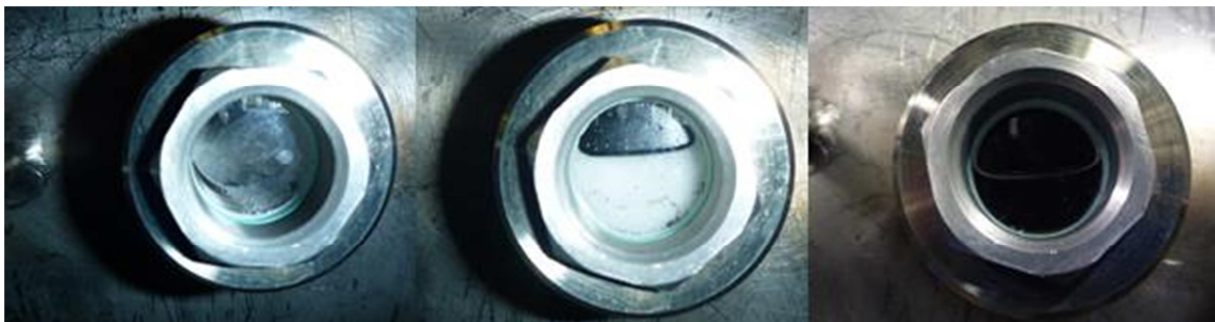


Abbildung 5.1: Bild unterschiedlicher Lösungszustände, beobachtet durch das Schauglas des Mischbehälters

In der Abbildung 5.2 ist der beschriebene Mischaufbau veranschaulicht dargestellt.

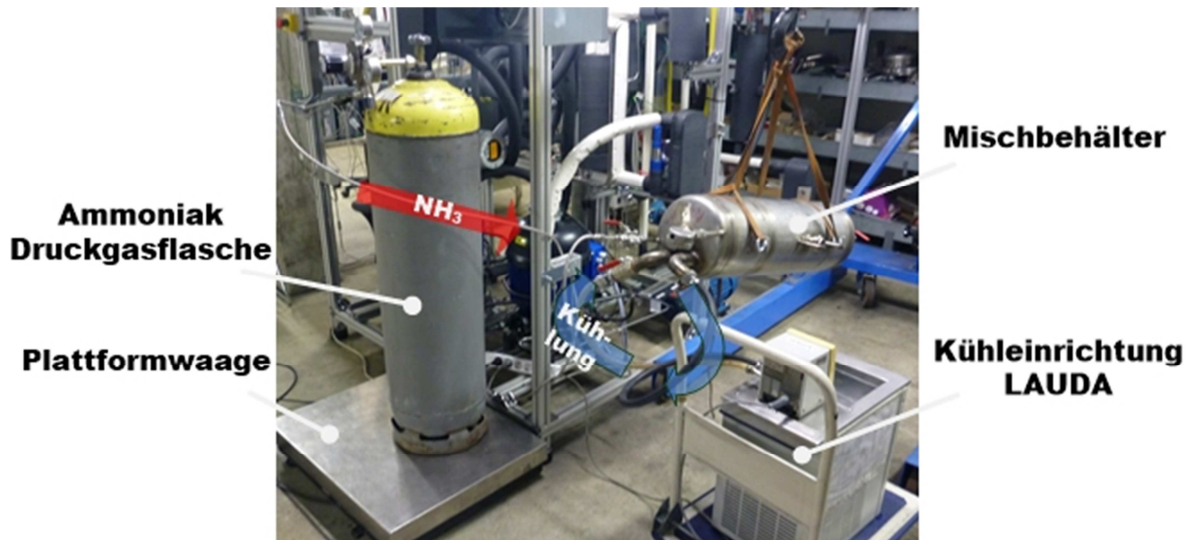


Abbildung 5.2: Bild Aufbau für die Herstellung der Lösung

Um die fertig hergestellte Lösung in die Anlage zu füllen, musste zuvor ein definierter Ausgangszustand im Anlagenkreis vorbereitet werden. Nach mehrmaligem Vakuumziehen an der Anlage wurde der Aufbau mit 2 bar Ammoniak beaufschlagt, um so ein Abgleiten der zufließenden Lösung in den Kristallisationsbereich auf Grund des Druckausgleichs während des Füllens zu vermeiden. (vgl. hierzu Kap. 2.5.1)

Der Druckbehälter wurde senkrecht gelagert über der Anlage (über der Höhe des Einfüllstutzens) positioniert und mit einem Druckschlauch an den PSAC angeschlossen. An der oberen Seite wurde am Behälteranschluss eine Verbindung zur Ammoniak-Druckgasflasche angeschlossen, um so durch den dort eingestellten Gasdruck (> 2 bar) den Füllvorgang zu beschleunigen und auch den letzten Rest der Lösung aus dem Mischbehälter zu drücken. In der Abbildung 5.3 ist der Füllvorgang an der Anlage dargestellt.

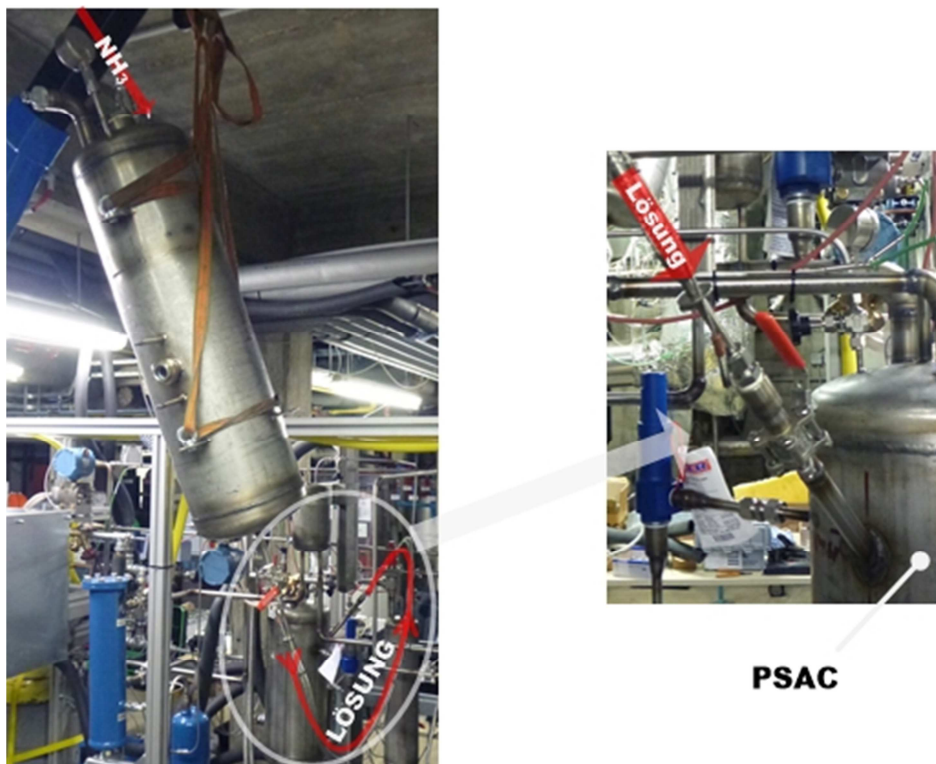


Abbildung 5.3: Füllaufbau der Anlage

5.2 Schwierigkeiten/Probleme

Kompressor-Lieferzustand

Der Anlieferungszustand der Kompressoren entsprach nicht dem nötigen Ausgangszustand für den Einbau. Beide Verdichtergehäuse sollten ursprünglich mit zwei bis drei bar reinem Stickstoff und dem Kältemaschinenöl (ca. 1,5 l) gefüllt sein, um eine etwaige Korrosion, die bei zu langer Lagerung auftreten kann, zu verhindern. Dass dieser Zustand nicht gegeben war, wurde erst nach ein paar Tagen erkannt und nach Rücksprache mit dem Hersteller wurde der geforderte Auslieferungszustand nachträglich hergestellt. Korrosive Ablagerungen konnten weder festgestellt, noch völlig ausgeschlossen werden, was in weiterer Folge bei den beschriebenen Öl-Ablagerungen gegebenenfalls berücksichtigt werden muss. Eine Ölablassschraube aus Messing (am HPC) wurde durch eine entsprechende Edelstahlschraube ersetzt.

Ölverunreinigung

Nach den ersten (ca. 25) Betriebsstunden der Anlage wurde eine Trübung des Öles im Hochdruckkompressor festgestellt, worauf Ölproben entnommen wurden. Der visuelle Vergleich des Ölzustandes an den Ölschaugläsern beider Kompressoren in Abbildung 5.4 kontrastiert den Unterschied zum ungetrübten Öl im LPC.

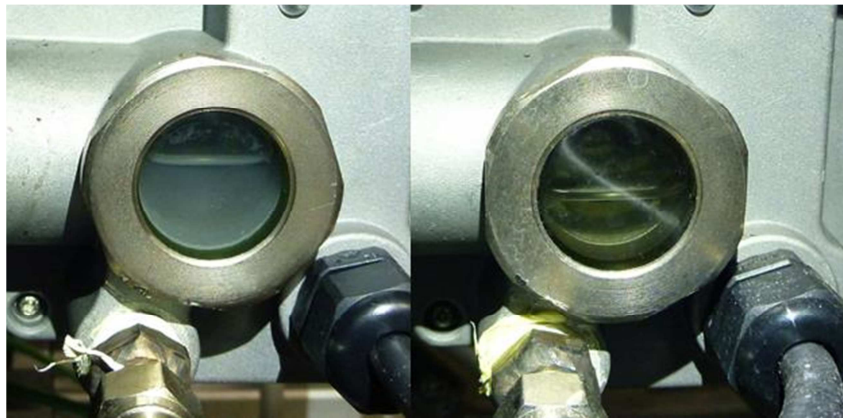


Abbildung 5.4: Bild Öltrübung des HPC (links) im Vgl. zum reinen Öl des LPC (rechts)

Abbildung 5.5 zeigt die entnommene Ölprobe des LPC, in der sich nach mehrtägiger Sedimentationsdauer die Trübstoffe der Probe abgelagert haben. Verglichen dazu ist eine später entnommene Probe und eine Referenzprobe des reinem Kältemittelöls platziert.

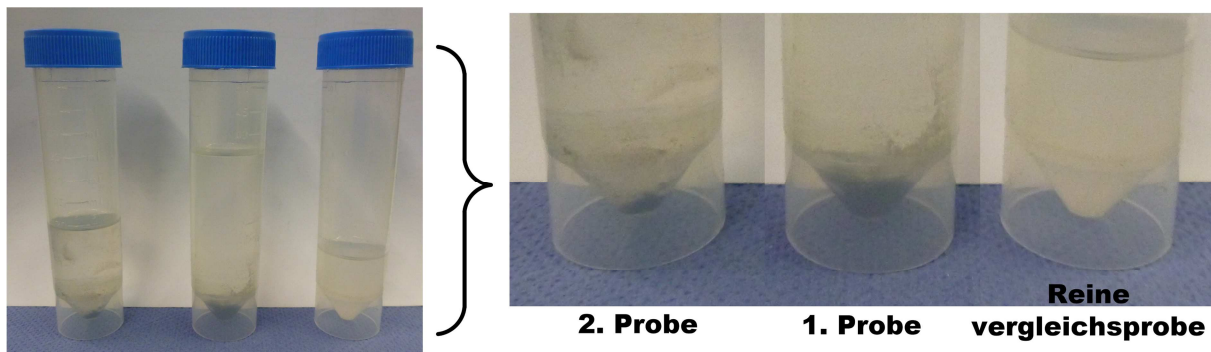


Abbildung 5.5: Bild Ölablagerungen Vergleichsproben

Die nach langer Zeit (Tagen) ausgesonderten Ablagerungen wurden zur besseren Darstellung am Boden einer Petrischale abgeschieden (siehe Abbildung 5.6). Die Zusammensetzung dieser Ablagerungen konnten noch nicht identifiziert werden.



Abbildung 5.6: Bild der abgeschiedenen Ölverunreinigungen

Unklar ist noch der Grund dieser Verunreinigung. Mögliche Gründe dafür könnten Korrosion oder Zersetzung von im Kältemittelkreislauf angeordneten Bauteilen (z.B. Schläuche) sein. Auch mechanische Rückstände aus der Produktion und dem Betrieb der Kompressoren, eine Ansammlung von Schweißrückständen aus den Rohrleitungen im Kältemittelkreislauf oder auch Anteile von Lithiumnitrat im Öl könnten möglich Gründe sein. Letzterer könnte durch das Zurückströmen des Lösungsmittels ausgehend vom Absorber über den Hochdruck-Pufferbehälter und die Ölabscheider und einer anschließenden Vermischung mit dem Öl eine Trübung bewirken. Die Verunreinigungen werden in weiterführenden Untersuchungen analysiert. Anzumerken ist, dass im weiteren Betrieb etwaige Änderungen des Ölzustandes regelmäßig beobachtet werden müssen und vor allem geprüft werden muss, ob sich die Verunreinigungen auch auf den Niederdruckkompressor ausbreiten, was auf eine Verunreinigung des NH_3 -Sauggases mit LiNO_3 nach dem PSAC hindeuten würde. Eine Laboranalyse, in Absprache mit dem Kompressorhersteller, ist im weiteren Verlauf ebenfalls möglich.

Leistungseinbruch der Lösungsmittelpumpe

Nachdem erste Funktionstests durchgeführt waren, wurden versuchsweise verschiedene Betriebspunkte angefahren. Durch das allmähliche Steigern der Betriebsparameter erkannte man, ab einem gewissen Leistungsbereich, ein plötzliches Abfallen des Massenstromes der Lösungsmittelpumpe. Nach dem zwangsweisen Versuchsabbruch wurde die Anlage heruntergefahren und die Pumpe auf eine etwaige mechanische und thermische Beschädigung untersucht (Verdacht auf Wellenverriegelung oder Kurzschluss). Beim erneuten Versuchsstart wenige Minuten später, wurde die Pumpe wieder aktiviert und lief komplikationsfrei an, um in weiterer Folge in einer ähnlichen Situation wieder abzuschalten. Dieses sich unregelmäßig wiederholende Verhalten bei unterschiedlichen Betriebsparametern konnte anfangs nicht erklärt werden.

Es stellte sich schließlich heraus, dass bei zu starker Beanspruchung der Pumpe, begründet durch Änderungen der Betriebsparameter, der Frequenzumrichter nicht die benötigte Leistung lieferte. Die erforderliche Leistung die, bei einer Betriebspunktänderung auftrat, konnte aufgrund der eingestellten quadratischen Leistungsfunktion des Pumpenmotors im mittleren Drehzahlbereich nicht erreicht werden. Mit der Umstellung durch eine linear ansteigende Leistungsfunktion, wie diese im gegebenen Fall auf Grund des linearen Zusammenhangs des Massenstroms mit der benötigten Leistung gegeben ist, konnte dieses Problem bei Laständerung behoben werden.

Austausch des Frequenzumformers des HPC

Bei Betriebsbedingungen mit hohem Verdichtungsverhältnis und hohem Kältemittelmassenstrom wurde mit steigender Kompressorleistung die Notwendigkeit eines leistungsstärkeren FU's für den Hochdruckkompressor erkannt. Folglich wurde der zu Beginn eingesetzte 4 kW Frequenzumformer im Schaltschrank durch ein leistungsstärkeres Gerät (11 kW) ersetzt, das an der Außenseite des Schaltschranks befestigt wurde.

Undichtigkeiten

Im Zuge des Aufbaus wurde die Anlage wiederholt auf Dichtheit geprüft sowie einzelne undichte Stellen nach und nach erfasst und behoben, bis sich schließlich, bei mehrtägiger Druckbeaufschlagung des gesamten Kreislaufes, kein relevanter Druckabfall mehr bemerkbar machte. Dabei sind einzelne Stellen der Anlage, bei denen die Dichtheit erst nach wiederholtem und erhöhtem Aufwand sichergestellt werden konnte, bemerkt worden. Im Folgenden sollen diese Stellen, zur Berücksichtigung bei etwaigen späteren Dichtheitsproblemen, genannt werden.

- Der Gewindeanschluss der Sicherheitsüberlauf-Ventile wurde zusätzlich zu den angedachten Flachdichtungen mit Hilfe eines Teflon-Bandes am Gewinde abgedichtet da sich hier mehrmals Leckagen bemerkbar machten.
- Die Flachdichtungen der Sicherheits-Druckschalter konnten nur unter großem Aufwand dicht bekommen werden und sollten mit besonderem Augenmerk beobachtet werden. Um notwendige Dichtheit zu erreichen sind die zulässigen Anzugsdrehmomente der Verschraubungen (2 Nm) weit überschritten worden. Aufgrund von zu starker Verformung musste eine der Aluminium Flachdichtungen bereits durch eine Teflon-Dichtung ersetzt werden.
- Die analogen Manometer dichten ebenfalls durch Aluminium-Flachdichtungen. Aufgrund der nach dem Einbau aufgetretenen Undichtheiten und der Tatsache das sich Aluminium stark verformt, wird an diesen Stellen ebenfalls vermehrte Aufmerksamkeit empfohlen.
- Die Anschlüsse (Verschraubung) des Coriolis-Messgeräts in der Leitung der armen Lösung sind erst nach mehrmaligen Überprüfungen und wiederholtem Nachziehen dicht geworden.

Rückschlagventil

Die Funktion des Rückschlagventils der Gaszuleitung in den Absorber ist nicht sicher gewährleistet. Es wird von einem unvollständigen Verschluss des Ventils ausgegangen, was in den Stillstandszeiten der Anlage zu Problemen, wie etwa einer Ölverunreinigung oder ein Fließen von Lösungsmittel in den HPC, führen kann. Das davor eingebaute Absperrventil sollte daher bei Stillstand immer geschlossen sein. (siehe Abbildung 5.7)

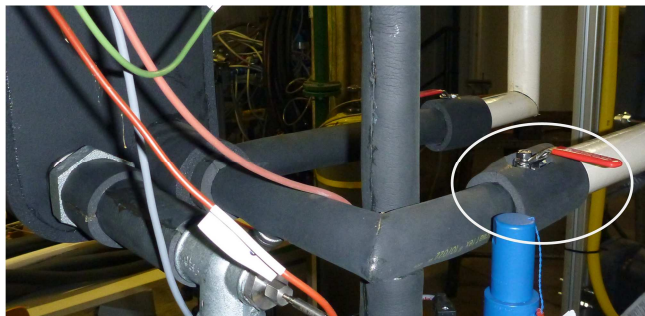


Abbildung 5.7: Bild Ammoniak-Zufluss-Ventil bei Absorbereinlass

5.3 Ein- / Ausschalten der Versuchsanlage

Das Starten der Versuchsanlage erfordert gewisse Vorbereitungen und wird am besten auf folgende Weise durchgeführt.

- LabView wird geöffnet und es müssen im Projekt „Hypump“ die Programme „Display and Data Writer“ sowie „Output and Control“ und „Counter“ und gestartet werden. Der Hauptschalter der Anlage in „Output and Control“ ist einzuschalten.
- Die Infrastruktur-Anbindung am Institut wird gestartet (Heizung der Wärmequellen, sowie Rückkühlung der Wärmesenke und die Kreislaufpumpen der hydraulischen Kreise der Anlage werden eingeschaltet) und die Kugelhähne der Anschlussleitungen werden geöffnet. Die Temperaturen der Wärmequelle müssen im Vorfeld eingestellt und erreicht (ca. 30 min) werden.
- Die Ölsumpfheizung der Kompressoren muss rechtzeitig vor Betriebsbeginn eingeschaltet werden (ca. 1 Std.) und soll das Öl auf ca. 25°C aufheizen.
- Der Füllstand des RSAC sollte niedrig genug sein, um so ein Anfahren der Lösungsmittelpumpe zu ermöglichen.
- Das Öl der Verdichter soll zudem bei den Schaugläsern auf Zustand und Füllstand kontrolliert werden.
- Die Ventilstellungen im Kreislauf müssen kontrolliert werden und je nach Betrieb (einstufig oder zweistufig) angepasst werden. Wichtig hierbei ist, dass das Ventil der Absorber-Zuleitung NH₃ bis kurz vor dem Start geschlossen sein muss, um ein mögliches Rückströmen der Lösung in den Kältemittelkreislauf zu vermeiden.
- Die Wärmequellen- und Wärmesenken-Kreislaufpumpen werden gestartet und der gewünschte Volumenstrom über die Strangreguliertventile eingestellt. Im Wärmequellenkreislauf können die Gaskühler (AUX1, AUX2) ggf. zu- und weggeschaltet werden.
- Die Systemdrücke bei Betriebsbeginn (und Stand allgemein) sollen nicht zu hoch liegen (< 8bar), jedoch aber über Atmosphärendruck, um so eventuell entstandene Leckagen bemerkbar zu machen und Luftzufuhr von außen zu unterbinden. Weiters ist für den Start der Kompressoren ein minimaler Druck (Druckschalter) im PSAC notwendig.
- Die Bypassleitung von HD-Pufferbehälter zu PSAC kann geöffnet werden, um zu hohe Druckunterschiede auszugleichen und ein gesondertes Anfahren der Kompressoren zu ermöglichen.
- Nach Aktivierung der FU's erfolgt die Initialisierung der Kompressoren HPC und LPC. Diese benötigt anschließend in etwa 2-3 Minuten (interne Verriegelung).
- *...
- Kurz nach Starten der Verdichter (nach Druckaufbau) können Lösungsmittelpumpe und Lösungsdrossel zugeschaltet werden.
- Der Kugelhahn der Absorber-Leitung kann nun geöffnet werden um so den Absorber langsam in den Kreislauf miteinzubinden. Dabei kann das blubbernde Geräusch hörbar an der Rückwand des Absorbers zur Kontrolle (der beginnenden Blasenabsorption) dienen.
- Die Füllstände der Akkumulatoren sollten konstant gehalten werden; speziell ist darauf zu achten, dass der PSAC immer ein Mindestfüllstand aufweist um ein ausreichendes Reservoir vor der Lösungsmittelpumpe zu gewährleisten.
- Nach dem Schließen des Gas-Bypasses aus dem Pufferbehälter, bzw. dem Kältemittelbypass zwischen MSAC und PSAC, erfolgen weitere Reglereinstellungen an der Bedienoberfläche „Output and Control“
- Das Verdichtungsverhältnis der Kompressoren sollte annähernd gleich sein und kann mittels Feineinstellung am Hochdruckkompressor ggf. angeglichen werden.
- Im Betrieb sind die Grenzwerte für eine automatische Abschaltung zu beachten. Die Temperaturen (Kompressorausstrittstemperaturen) sind im Betrieb zu überwachen.
- *... Alternativ kann an dieser Stelle nach dem Initialisieren der einzelnen Komponenten der Hauptschalter und damit die Kompressoren bzw. Lösungspumpe und -Drossel gleichzeitig aktiviert werden.

Ausschalten

Der Abschaltvorgang erfolgt im Wesentlichen durch das Ausschalten der Lösungsmittelpumpe und der Kompressoren sowie Deaktivierung (Schließen) der Lösungsdrössel, wobei darauf zu achten ist, dass unmittelbar danach das Kugelhahnventil der kältemittelseitigen Absorber-Zuleitung zu schließen ist. Aufgrund der Problematik die in Kap. 5.2 (Undichtheiten) kurz angesprochen wurde, muss das besagte Ventil während des gesamten Stillstandes geschlossen sein. Anschließend muss die Wärmezufuhr über die Wärmequelle abgeschaltet werden. Über die Wärmesenke kann noch Wärme abgeführt werden. Alternativ können über den Hauptschalter die Lösungspumpe, die Kompressoren, die Drössel und die Wärmequellen gleichzeitig abgeschaltet werden. Bei Betriebsende sind in LabVIEW alle sonstigen Komponenten abzuschalten (Ventilator, Initialisierungssignale, etc.), anschließend kann die Infrastruktur ausgeschaltet sowie die Kugelhähne der Verbindungsleitungen geschlossen werden.

6 ERSTE MESSERGEBNISSE

Im folgenden Kapitel wird auf die ersten Messungen die am Versuchstand durchgeführt wurden eingegangen. Dabei werden die wichtigsten Messdaten erfasst und veranschaulicht, sowie einzelne Werte detailliert analysiert. Weiters sollen markante Messwerte oder auftretende Unregelmäßigkeiten erfasst und diskutiert werden. Abweichungen von gemessenen Werten zu den Simulationsergebnissen, die im Zuge einer Vorfeldanalyse vor dieser Arbeit entstanden sind, werden ebenfalls erwähnt.

Vorab sollen die Rand- bzw. Betriebsbedingungen der Messdurchläufe geschildert werden. Die nachfolgend beschriebenen Messungen wurden nach der Fertigstellung der Anlage, im Anschluss an eine Funktionsprüfung des Aufbaus, im Jänner bzw. Februar 2014 durchgeführt. Nach dem Hochfahren der Anlage wurde ein stationärer Betriebspunkt angefahren, der über die Messdauer von mindestens 10 Minuten stabil gehalten wurde. Die sekundlich aufgenommenen Messwerte wurden dann als Durchschnittswert über die Messdauer gemittelt und als ein Betriebspunkt in einem MS Excel-file abgespeichert. Insgesamt wurden im Bezugszeitraum 16 Messpunkte (MP) aufgezeichnet.

Alle nachfolgend beschriebenen Versuche wurden mit zweistufiger Verdichtung, bei einem verhältnismäßig hohen Gesamt-Verdichtungsverhältnis von ca. fünf bis sechs durchgeführt. Die Eintrittstemperaturen der Wärmesenke und Wärmequelle waren gleich groß. Nach den ersten Versuchen und gemäß Simulation wurde festgestellt, dass bei den gegebenen Betriebsbedingungen und bei Betrieb mit geöffnetem Gas-Bypass vom MSAC zum PSAC mit eher moderaten Saugtemperaturen am Niederdruckkompressor zu rechnen ist, welche niedriger waren als die Wassertemperaturen aus dem Desorber. Aus diesem Grund wurde teilweise auf eine Kühlung (bzw. in diesem Fall Erhitzung) des Ammoniakgases vor dem Niederdruckkompressor, durch Wegschalten des ersten Gaskühlers (AUX1), verzichtet.

Die folgenden Messpunkte wurden bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen aufgenommen, siehe Tabelle 6-1. Die ersten vier Messpunkte sind nicht aufgelistet, da es sich um die ersten Betriebsversuche handelte und die gemessenen Werte im Rahmen dieser Auswertung schwer vergleichbar sind (die Kompressordrehzahlen sind im Unterschied zu den restlichen Messpunkten auf Grund eines Umrechnungsfehlers nicht korrekt eingestellt worden). Die LPC-Drehzahl wurde für sämtliche Messpunkte auf 1450 min^{-1} gesetzt.

Es wurden Messungen bei zwei verschiedenen Hochdruckniveaus durchgeführt (MP5 und MP6 bei $p_{\text{high}}=15 \text{ bar}$ zu $p_{\text{low}}=3 \text{ bar}$, MP7 bis MP16 $p_{\text{high}}=18 \text{ bar}$ zu $p_{\text{low}}=3 \text{ bar}$). Beim Erfassen dieser Betriebspunkte waren die Volumenströme des Senkenkreislaufes für das Druckverhältnis 18/3 in etwa gleich groß um den Wert von 1100 und 1000 l/h eingestellt. Die Volumenströme des Druckverhältnisses 15/3 wurden mit rund 1100 l/h eingestellt.

Während des Betriebs bei MP10 – MP16 wurde der Gasbypass zwischen MSAC und PSAC vollständig geschlossen was zum gänzlichen Abfallen des Füllstandes (L_MSAC) im MSAC und zu zweiphasigem Desorber-Eintritt der Lösung führte.

Tabelle 6-1: Betriebsbedingungen der MP 5 bis MP 16

MP #	p_{high} [bar]	p_{low} [bar]	\dot{V}_{src} [l/h]	$t_{\text{scr, in}}$ [°C]	\dot{V}_{snk} [l/h]	$t_{\text{snk, in}}$ [°C]	AUX1 I/O	AUX2 I/O	Bypass MSAC-PSAC AUF/ZU
5	15,1	2,9	1090,0	45,1	1144,7	45,0	O	I	AUF
6	14,9	2,8	1076,6	49,9	1107,4	50,0	O	I	AUF
7	17,9	3,0	1081,0	50,0	1114,0	50,0	O	I	AUF
8	18,2	3,0	1083,2	50,0	1104,5	50,0	O	I	AUF
9	17,9	3,0	1090,3	55,0	1091,0	55,0	O	I	AUF
10	18,0	3,0	1100,3	55,0	1094,3	55,0	O	I	ZU
11	18,1	3,0	1093,3	55,0	1098,8	55,0	I	I	ZU
12	18,0	3,0	1001,1	45,0	1000,6	45,0	I	I	ZU
13	18,0	3,0	1005,1	50,0	985,3	50,0	I	I	ZU
14	17,8	3,0	1039,7	60,0	970,1	60,0	I	I	ZU
15	17,9	3,0	1005,9	55,0	1003,4	55,0	I	I	ZU
16	18,0	3,0	998,9	60,0	1001,5	60,0	I	I	ZU

Zur Veranschaulichung des Lösungskreislaufes, werden die Werte zweier aufgezeichneter Betriebspunkte in ein $\log(p)/(-1/T)$ -Diagramm übertragen. Tabelle 6-2 gibt die dafür erforderlichen Messwerte für Drücke und Temperaturen an.

Tabelle 6-2: Messwerte Messpunkt (MP) 5 und 8

MP #	p_{high} [bar]	p_{low} [bar]	$t_{\text{RSO, ABS, out}}$ [°C]	$t_{\text{RSO, STH, out}}$ [°C]	$t_{\text{RSO, DES, out}}$ [°C]
5	15	3	56,2	17,3	33,5
8	18	3	63,3	21,9	39,2

Diese Daten beziehen sich auf die Drücke und Temperaturen der ein- und ausströmenden Lösung und beschreiben weitestgehend den Lösungsvorgang im Absorber bzw. Entgasungsvorgang im Desorber. Da am Absorbereintritt die einströmende Lösung und das eingeleitete Ammoniak unterschiedliche Eintrittstemperatur besitzen und sich ein Sättigungszustand erst an der Mischstelle im Absorber einstellt, welcher messtechnisch nicht erfasst wird, kann nur ein begrenzender Bereich und keine genaue Eintrittstemperatur ermittelt werden. Dieser Punkt wird im Diagramm durch den Bereich einer möglichen realen Mischung dargestellt.

Abbildung 6.1 zeigt den Lösungskreislauf des Messpunktes 5 aus Tabelle 6-2. Die bekannten Temperaturen und Drücke der reichen Lösung beim Verlassen des Absorbers ($t_{\text{RSO, ABS, out}}$) und nach der Drossel ($t_{\text{RSO, STH, out}}$), sowie die Temperatur und der Druck nach dem Desorber ($t_{\text{RSO, DES, out}}$) definieren die eingezeichneten Messwerte. Neben den angeführten Messwerten wurde ein idealer Verlauf, ausgehend von den bekannten, gesättigten angenommenen Eckpunkten nach dem Absorber und Desorber, strichliert eingezeichnet. Die zuvor beschriebene Absorber-Eintrittstemperatur ergibt sich im Diagramm folglich aus den übrigen Eckpunkten. Bedingt durch teilweise Absorption direkt am Absorbereintritt wird sich der tatsächliche Mischungspunkt zwischen der gemessenen Wärmesenken-Absorbereintrittstemperatur und dem idealisierten Eckpunkt befinden. Auf Grund der teilweisen Ammoniakdesorption nach der Lösungsdrossel liegt der Eintrittszustand der reichen Lösung in den Desorber ebenfalls zwischen den Lösungslinien armer und reicher Lösung des Kreislaufes.

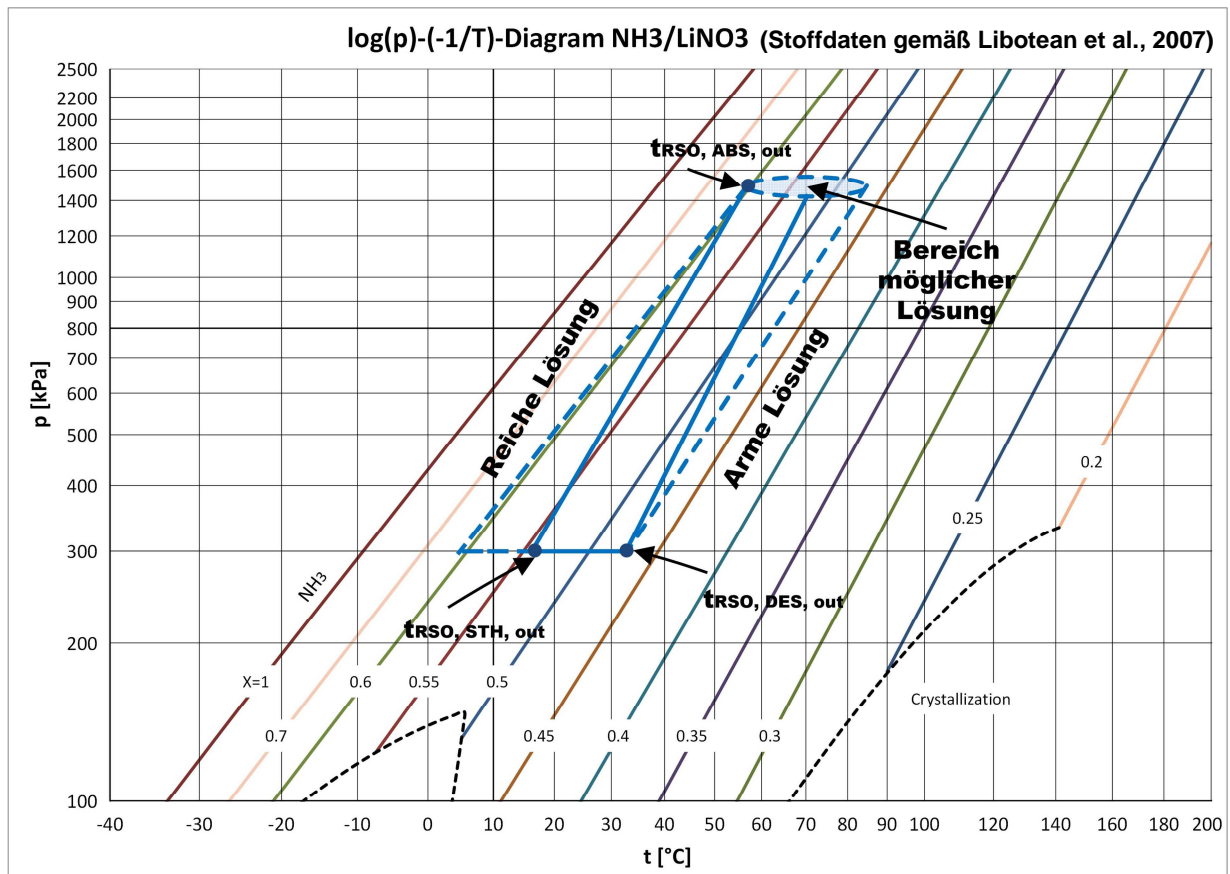


Abbildung 6.1: Schematischer Lösungskreislauf von Messpunkt 5 im log(p)/(-1/T)-Diagramm

In Abbildung 6.2 ist ein weiterer aufgenommenener Betriebspunkt (MP8 gemäß Tabelle 6-2) mit veränderlichem Druckverhältnis und geänderter Wärmesenken-/Wärmequellen-Eintrittstemperatur, ausgehend von 3 bar Niederdruck eingetragen. Verglichen zu Abbildung 6.1 ist aus den Messdaten erkennbar, dass sich die Temperaturpreizung zwischen Ein- und Austritt am Desorber mit steigendem Druckverhältnis erhöht. Der Bereich möglicher Lösung am Absorbereintritt ist in der Darstellung ebenfalls strichliert angedeutet.

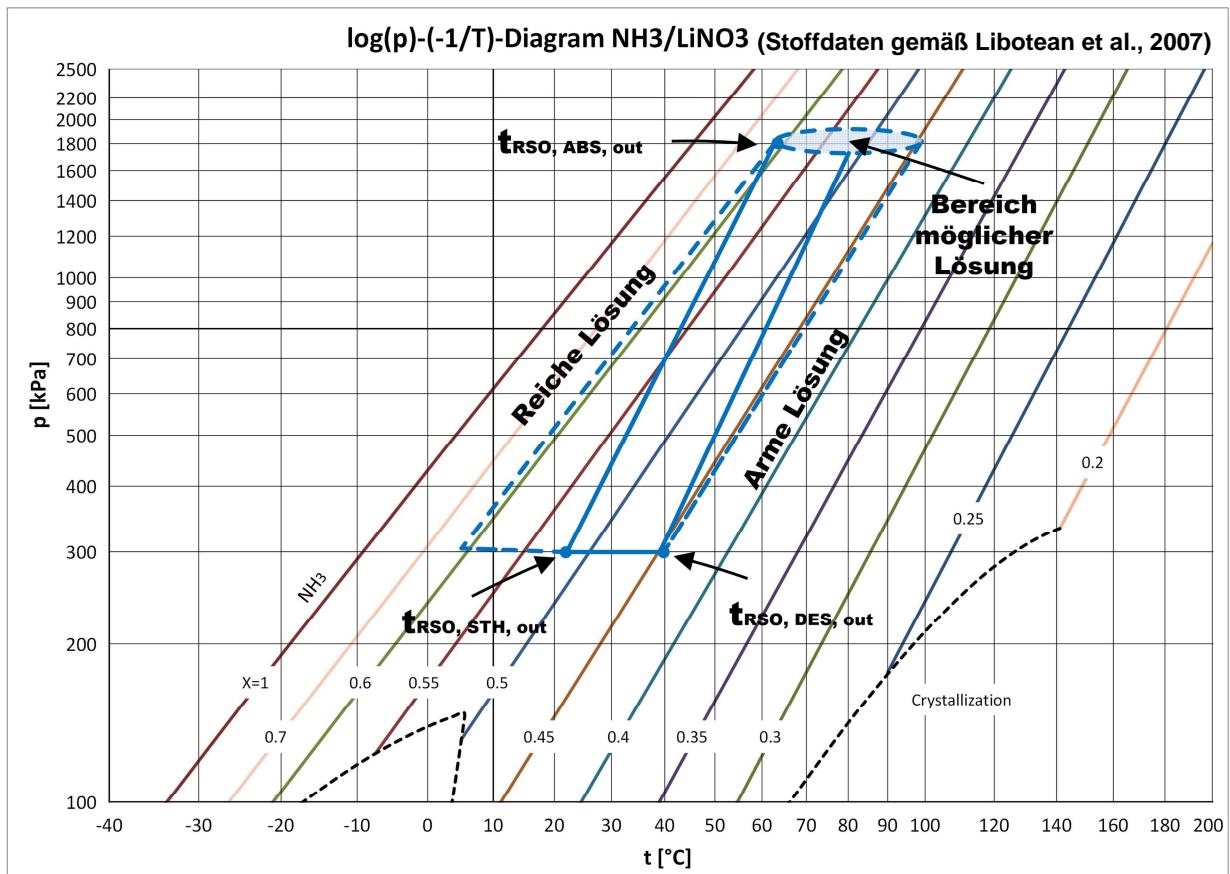


Abbildung 6.2: Schematischer Lösungskreislauf Messpunkt 8 im log(p)-(-1/T)-Diagramm

Wärmeleistungen Wärmesenke

Die Wärmesenken-Austrittstemperatur des Absorbers ist verglichen zur Austrittstemperatur des Desuperheaters auffällig hoch, was zu einer gesteigerten Leistung bzw. Verzerrung der Absorberleistung führt. Dadurch, dass die senkenseitige Temperatur nach dem Desuperheater teilweise deutlich unter der Absorber-Austrittstemperatur liegt, ergeben sich negative Wärmeleistungen im Desuperheater (unrealistisch, da Desuperheater Wärme aus heißem Kältemittelgas nach dem HPC aufnimmt und nicht abgibt). Als möglichen Grund für diesen Messwert-Unterschied wird eine Temperaturschichtung des austretenden Wassers an der Messstelle des horizontal axial im Rohr (1“) positionierten Messfühlers vermutet. Die Messung der Desuperheater-Austrittstemperatur ist im Vergleich auf Grund einer langen Strecke zwischen Austritt und Messstelle und eines kleineren Rohrdurchmessers (½“) als genauer anzunehmen.

Das Problem der nicht aussagekräftigen wasserseitigen Absorber-Austrittstemperatur muss in der Leistungsberechnung des Absorbers berücksichtigt werden. Dazu wird die Absorberleistung nicht direkt über die Absorberein- und Austrittszustände des Wassers berechnet, sondern indirekt über die gesamte, an die Senke im Absorber und Desuperheater abgegebene Heizleistung ermittelt. Anschließend wird die Leistung des Desuperheaters abgezogen (gemäß Gl. 6-1 bis Gl. 6-4). Die Leistungswerte des Desuperheaters wurden, wie in Kapitel 4.1.7 beschrieben, über die ammoniakseitige abgeführte Wärmeleistung berechnet. Durch diese Vorgangsweise wird der Messwert am Absorber-Austritt nicht in die Rechnung miteinbezogen. \dot{Q}_{hot} kann wasserseitig als Funktion von „ $t_{snk,ABS,in}$ “, „ $t_{snk,SUP,out}$ “ sowie dem Durchfluss und den entsprechenden Stoffdaten (Dichte und Wärmekapazität des Wassers) berechnet werden.

$$\dot{Q}_{hot} = \dot{Q}_{ABS} + \dot{Q}_{SUP}$$

Gl. 6-1

Bzw.

6 Erste Messergebnisse

$$\dot{Q}_{hot} = \dot{V}_{snk} * \rho_{snk} * (t_{ABS,IN} - t_{SUP,OUT}) \quad \text{Gl. 6-2}$$

$$\dot{Q}_{ABS,Messung} = \dot{V}_{snk} * \rho_{snk} * (t_{ABS,OUT} - t_{ABS,IN}) \quad \text{Gl. 6-3}$$

$$\dot{Q}_{SUP,NH3} = \dot{m}_{NH3} * \Delta h_{NH3} \quad \text{Gl. 6-4}$$

Tabelle 6-3 zeigt die unterschiedlichen Werte der eben beschriebenen Berechnungsmethoden der Absorberleistung und stellt diese der gemessenen gesamten Heizleistung gegenüber. Die Werte der Leistung des Desuperheaters können der Tabelle 6-4 entnommen werden.

Tabelle 6-3: Unterschiedliche Leistungsermittlung Absorber

MP	\dot{V}_{snk}	$t_{snk,ABS,in}$	$t_{snk,ABS,out}$	$t_{snk,SUP,out}$	$\dot{Q}_{ABS,Messung}$	\dot{Q}_{hot}	$\dot{Q}_{SUP,NH3}$	$\dot{Q}_{ABS,Rechnung}$
#	[l/h]	[°C]	[°C]	[°C]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
5	1145	45	57,5	56,6	16,39	15,13	0,82	14,31
6	1107	50	62,6	61,6	16,14	14,73	0,69	14,05
7	1114	50	63,3	62,4	17,07	15,84	0,97	14,87
8	1105	50	63,3	62,4	16,86	15,65	1,00	14,65
9	1091	55	68,6	67,4	16,98	15,44	0,69	14,75
10	1094	55	69,0	67,8	17,59	15,96	0,76	15,20
11	1099	55	69,1	67,8	17,72	16,06	0,74	15,33
12	1001	45	59,9	59,1	17,17	16,07	1,03	15,05
13	985	50	65,4	64,4	17,44	16,18	0,93	15,25
14	970	60	75,9	74,6	17,60	16,08	0,72	15,37
15	1003	55	70,3	69,1	17,56	16,13	0,80	15,33
16	1001	60	75,5	74,2	17,76	16,14	0,70	15,44

In Abbildung 6.3 sind die Werte für Wärmesenkenleistung (\dot{Q}_{hot}) und der unterschiedlich ermittelten Absorberleistungen (\dot{Q}_{ABS}) aus Tabelle 6-3 nochmals graphisch dargestellt. Es ist erkennbar, dass im jeweiligen Messpunkt die gemessene Absorberleistung höher als die gesamte Heizleistung ist, was gemäß wasserseitiger Berechnung auf unrealistische, negative Desuperheaterleistungen schließen lässt. Aufgrund vergleichender Wärmeverlustwerte im Leerlauf der Anlage, können Wärmeverluste, die im Betrieb signifikant höher sein müssten, als Grund für diese Differenz ausgeschlossen werden.

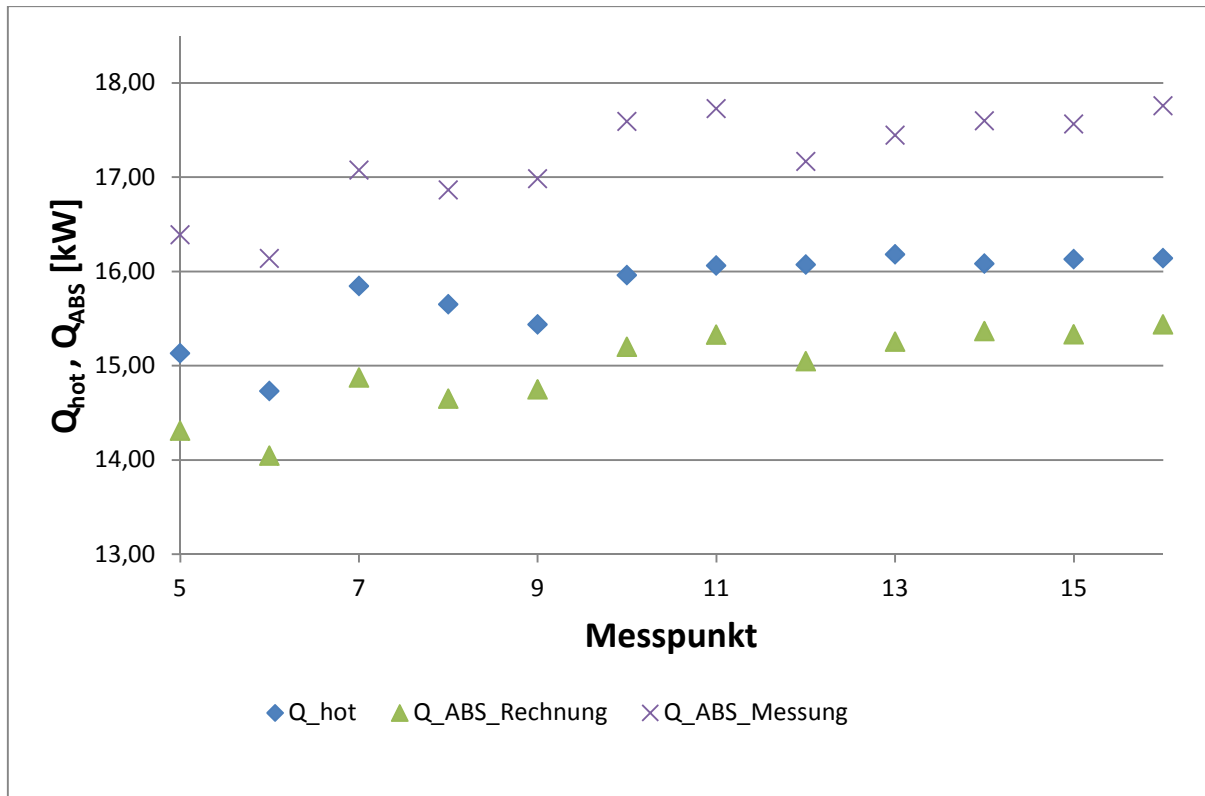


Abbildung 6.3: Diagramm Heizleistung/Absorberleistung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Berechnungsmethoden (vgl. Tabelle 6-2)

Entsprechend der Erkenntnissen ist die Leistung am Desuperheater wasserseitig ebenfalls nicht berechenbar. Analog zur Absorberleistung werden in Tabelle 6-4 die unterschiedlichen Leistungswerte der Ermittlungsarten des Desuperheaters aufgelistet (wasserseitig bzw. ammoniakseitig berechnet).

Tabelle 6-4: Unterschiedliche Leistungsermittlung Desuperheater

MP	\dot{V}_{snk}	$t_{\text{snk, SUP, out}}$	$t_{\text{snk, ABS, out}}$	$\dot{Q}_{\text{SUP, H}_2\text{O}}$	\dot{m}_{ref}	$t_{\text{nh}_3, \text{HPC, out}}$	$t_{\text{nh}_3, \text{SUP, out}}$	$\dot{Q}_{\text{SUP, nh}_3}$
#	[l/h]	[°C]	[°C]	[kW]	[m³/h]	[°C]	[°C]	[kW]
5	1145	56,6	45	-1,18	35,9	84,4	0,82	0,82
6	1107	61,6	50	-1,32	33,5	86,7	0,69	0,69
7	1114	62,4	50	-1,14	36,5	93,7	0,97	0,97
8	1105	62,4	50	-1,12	36,3	94,7	1,00	1,00
9	1091	67,4	55	-1,44	32,0	92,7	0,69	0,69
10	1094	67,8	55	-1,52	35,1	93,2	0,76	0,76
11	1099	67,8	55	-1,55	35,1	92,3	0,74	0,74
12	1001	59,1	45	-0,99	37,0	91,2	1,03	1,03
13	985	64,4	50	-1,15	36,5	94,3	0,93	0,93
14	970	74,6	60	-1,38	35,6	98,6	0,72	0,72
15	1003	69,1	55	-1,31	35,0	96,1	0,80	0,80
16	1001	74,2	60	-1,48	33,6	99,1	0,70	0,70

Die unterschiedlich berechneten Leistungen des Desuperheaters sind in Abbildung 6.4 nochmals vergleichend, von MP5 bis MP16, dargestellt. Die negativen Werte weisen auf erhebliche Probleme bei der derzeitigen Messung der wasserseitigen Absorber-Austrittstemperatur hin.

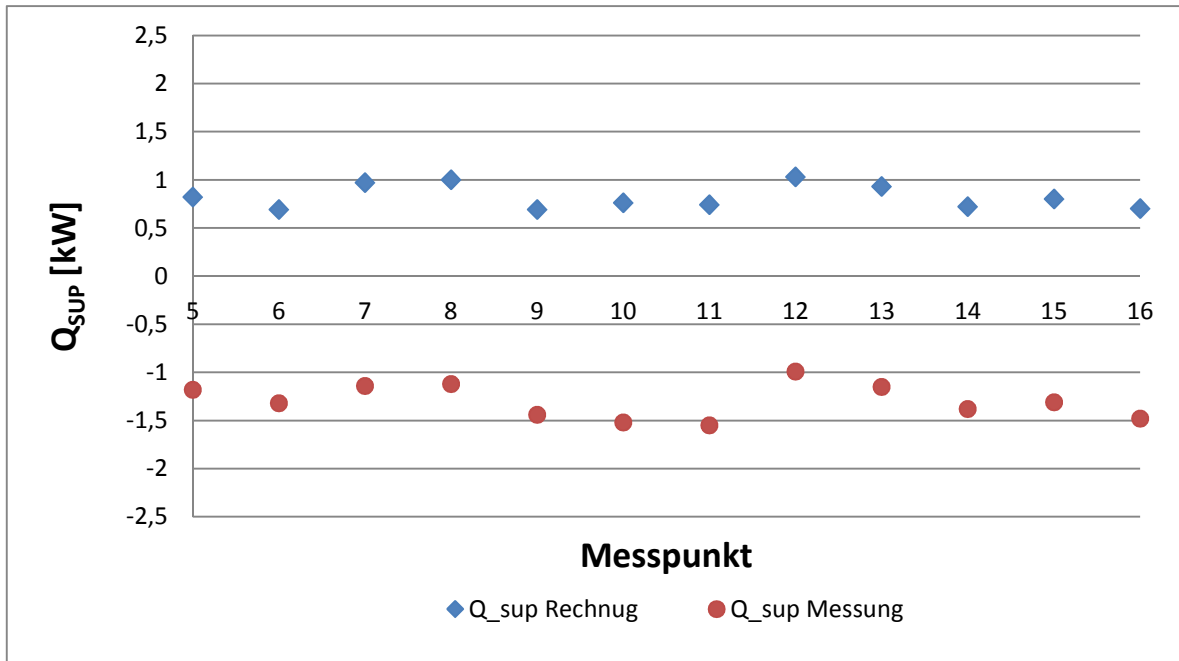


Abbildung 6.4: Leistung Desuperheater bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen unter der Berücksichtigung der unterschiedlichen Berechnungsmethoden (vgl. Tabelle 6-3)

Temperaturen Wärmesenke

In Abbildung 6.5 sind die Wärmesenkenein- und die Wärmesenkenaustrittstemperaturen (nach dem Desuperheater) in Abhängigkeit zweier eingestellter Druckverhältnisse, über einen Temperaturbereich am Eintritt von 45°C bis 60°C dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Wärmesenke bei den gegebenen Volumenströmen ($\dot{V}_{snk} \sim 1000$ bis 1100 l/h) und Kompressordrehzahlen ($n_{LPC} = 1450 \text{ min}^{-1}$) moderat, um 10 K bis 15 K erhitzt wird. Die Messwerte können ebenfalls aus Tabelle 6-3 entnommen werden. Bei den Messwerten ist zu beachten, dass der Gaskühler vor dem Niederdruckkompressor (AUX1) aufgrund der geringen Austrittstemperaturen, während den ersten Messungen abgeschaltet wurde.

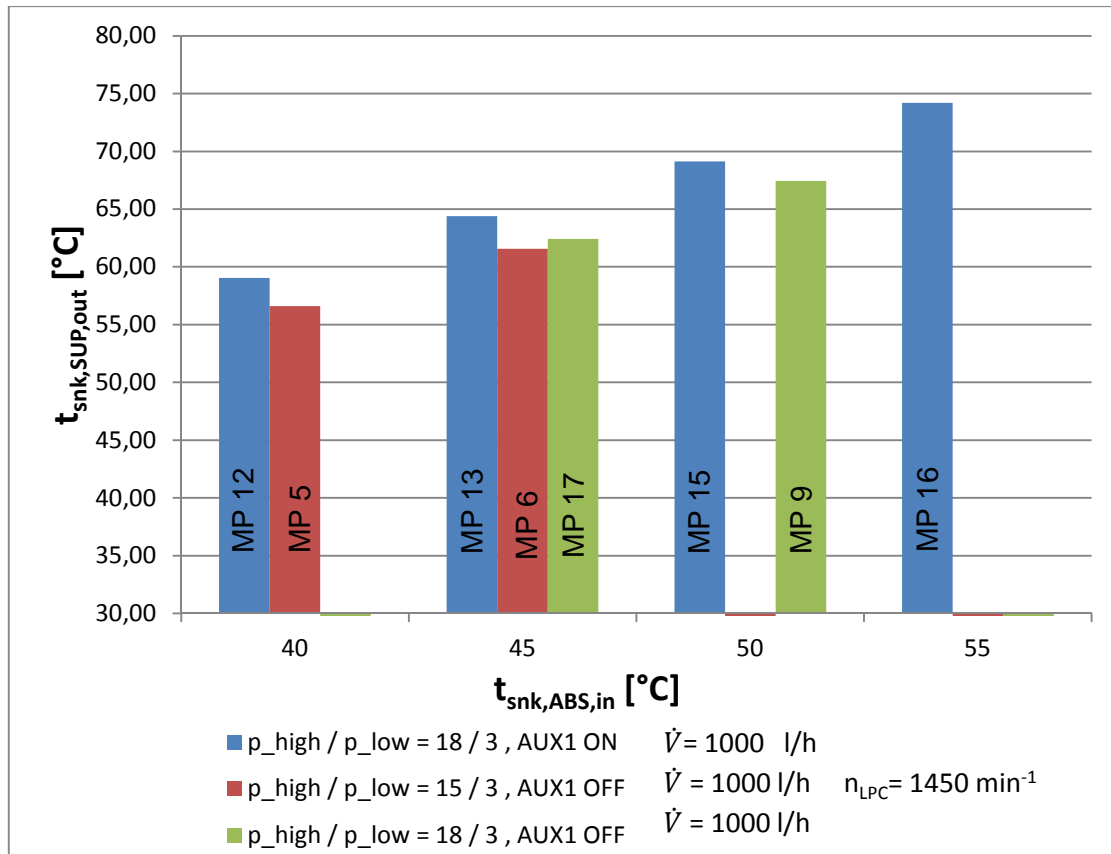


Abbildung 6.5: Ein- und Austrittstemperaturen der Wärmesenke bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen

Leitungszahlen

Die Auswertung der ersten anhand der Messwerte berechneten COP-Werte zeigte, dass diese im Vergleich zur Simulation aus vorangegangenen Arbeiten (Rabensteiner, 2012) deutlich geringer sind. Um die Ursache dieser fast um die Hälfte niedrigerem COP-Werte festzustellen, wurden die Leistungsdaten der Kompressoren genauer analysiert. Bei Vergleich der Simulationswerte mit der Messung der Stromzähler der Anlage (und Querprüfung mit Anzeigen an den Frequenzumformern der Verdichter) konnte festgestellt werden, dass beide Kompressoren mehr elektrische Leistung zum Umsetzen der entsprechenden Verdichtungsleistung des Gases benötigen als in der Simulation angenommen (ca. + 30%). Das lässt auf einen niedrigeren Isentropen-Wirkungsgrad, als der im Vorfeld abgeschätzte $\eta_{is,over}$ 0,6 – 0,7 schließen. Anzumerken ist, dass sich der beschriebene Wirkungsgrad (siehe Gl. 6-5) auf die gesamte Kompression bezieht und alle auftretenden Verluste (mechanische, elektrische, Wärme) miteinbezieht.

$$\eta_{is,over} = \frac{\dot{m}_{NH_3} * \Delta h_{NH_3}}{P_{el}} \quad \text{Gl. 6-5}$$

Der merklich geringere Isentropenwirkungsgrad, bei gleichzeitig auftretenden im Vergleich zu den Simulationswerten niedrigeren Kompressor-Austrittstemperaturen stellt jedoch einen gegenläufigen Zusammenhang dar, da durch die höhere zugeführte Leistung die Temperatur steigen sollte. Mögliche Ursache sind hohe thermische Verluste am Kompressor (> 50%), die bei hohen Kompressor-Austrittstemperaturen noch höhere Werte annehmen. Die entsprechenden Werte für die Berechnung der Leistungszahl können aus Tabelle 6-5 entnommen werden. Die Messunsicherheiten werden gemäß der in Kapitel 4.1.8 beschriebenen Berechnungsmethode angegeben.

6 Erste Messergebnisse

Tabelle 6-5: Relevante Messwerte und berechnete Leistungszahlen

MP	p_{high}	p_{low}	\dot{V}_{snk}	$t_{\text{snk, ABS, in}}$	$t_{\text{snk, SUP, out}}$	\dot{Q}_{hot}	P_{el}	COP_H
#	[bar]	[bar]	[l/h]	[°C]	[°C]	[°C]	[W]	[]
5	15,07	2,95	1144,7	45,06	56,61	15,13	5892	2,57 ±0,11
6	14,86	2,79	1107,4	49,91	61,56	14,73	5712	2,58 ±0,11
7	17,91	3,00	1114,0	49,96	62,42	15,84	6318	2,51 ±0,11
9	17,94	3,00	1104,5	55,00	67,43	15,65	6348	2,47 ±0,11
12	17,97	3,00	1091,0	45,00	59,05	15,44	6210	2,49 ±0,11
13	17,98	3,00	1094,3	49,99	64,40	15,96	6156	2,59 ±0,11
15	17,89	3,00	1098,8	55,00	69,13	16,06	6198	2,59 ±0,11
16	18,02	3,00	1000,6	59,99	74,19	16,07	6270	2,56 ±0,10

Um die Leistungszahlen der Versuchsanlage bzw. den Einfluss der Betriebsparameter zu veranschaulichen, sind in Abbildung 6.6 die COP_H -Werte (für Heizanwendung), nochmals graphisch für die Betriebspunkte dargestellt.

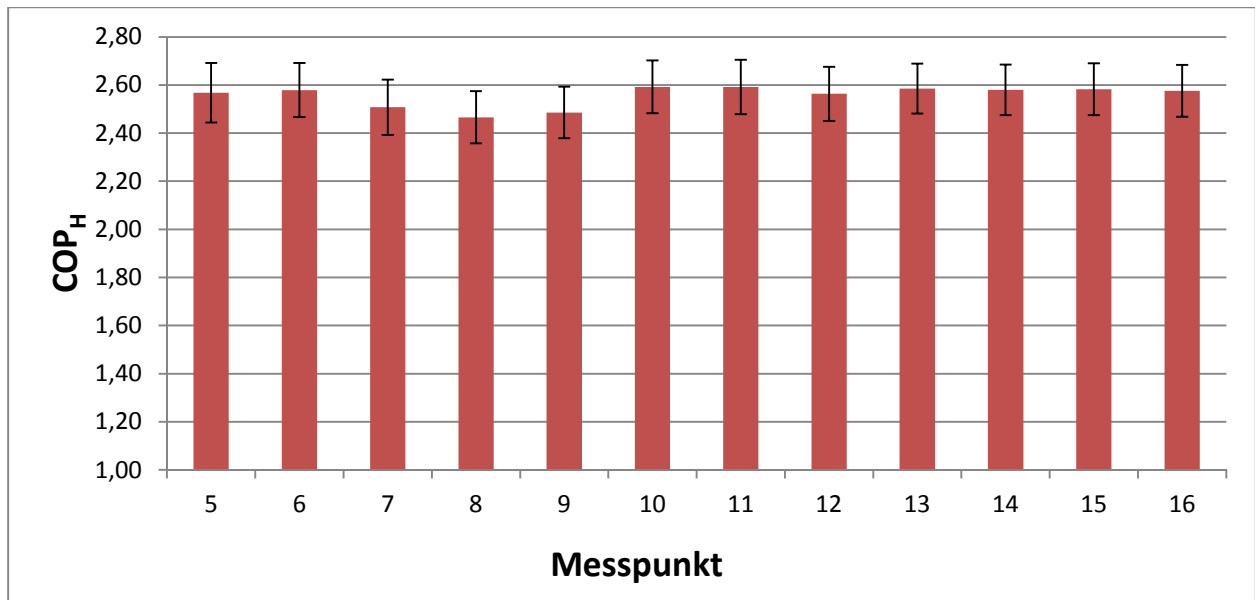


Abbildung 6.6: COP_H der Messpunkte 5 bis 16 (vgl. Tabelle 6-6) (Fehler entspricht einfacher Messunsicherheit)

Betriebsverhalten

In Abbildung 6.7 sind die Massenstromverläufe der Lösung bzw. des Kältemittels für einen Messpunkt (MP10) dargestellt. Man erkennt das einschwingende Regelverhalten der Massenströme.

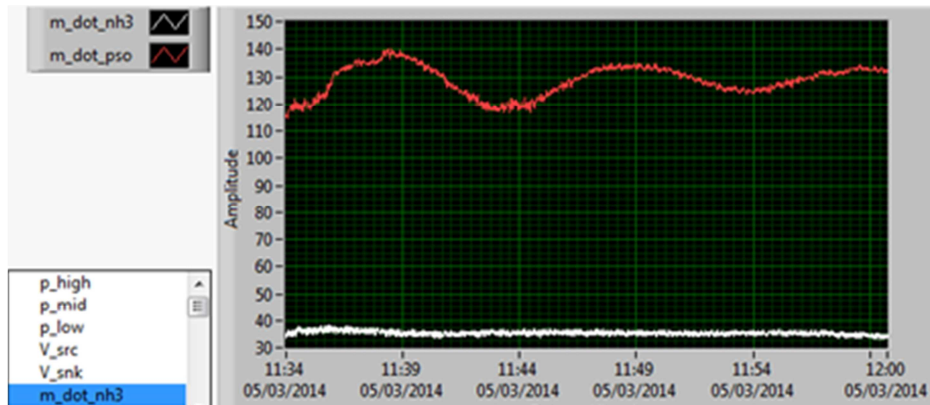


Abbildung 6.7: Zeitliche Massenstromverläufe in kg/h (MP10)

In Abbildung 6.8 sind die zeitlichen Füllstandsverläufe der Sammelbehälter (RSAC, MSAC, PSAC) dargestellt. Die schwankenden Verläufe korrelieren, auf Grund des trägheitsbedingten Nachlaufes des Massenstromes der Lösung die sich bei Änderung der Lösungsmittelpumpendrehzahl (bei gleichbleibenden Betriebsparametern) ergibt.

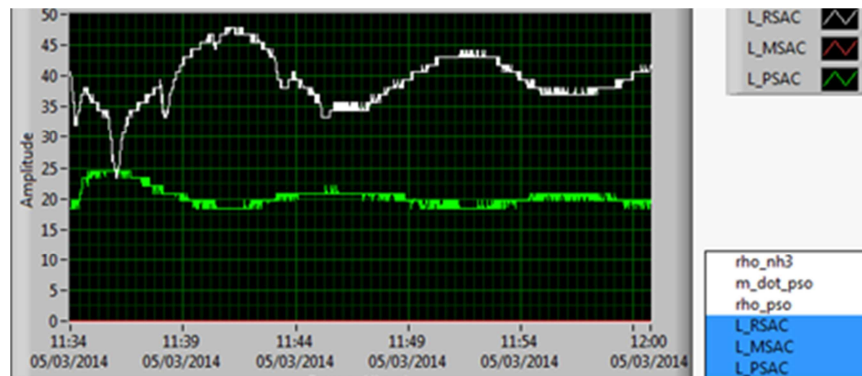


Abbildung 6.8: Zeitliche Füllstandsverläufe in cm (MP10)

Weiters ist im Bild zu erkennen, dass sich der Sammelbehälter vor dem Desorber (MSAC) völlig geleert hat, was mögliche Probleme für eine kontinuierliche Desorption hervorruft. Der gegenseitige Einfluss von Massenstrom und Füllstand ist durch den ähnlichen einschwingenden Verlauf (nachlaufender Füllstandsverlauf) ersichtlich.

Nach veränderlich langen Einschwingphasen zeigt die Anlage im Allgemeinen einen gleichmäßigen Betrieb, bei dem alle relevanten Betriebsparameter stabil gehalten werden können. Abbildung 6.9 zeigt einen solchen Verlauf über die gesamte Messdauer. Bei der Ansteuerung eines neuen Betriebspunktes (MP15 → MP16), der rasch angefahren werden kann, werden die entsprechenden Parameter erneut stabil gehalten.

Im Bild sind im linken unteren Verlauf die stabilen Druckniveaus bzw. der kurze Ausschlag bei Ansteuerung auf den folgenden Betriebspunkt zu sehen. Darüber ist der Einregelvorgang des Massenstromes der Lösung (vor Erreichen des Messpunktes) und die unterschiedlichen Massentröme der Lösung, bei gleichzeitig konstantem Kältemittelmassenstrom in den Betriebspunkten zu sehen. Der rechte, untere Verlauf zeigt die zeitlich schwankende Änderung der Füllstände. Die Abhängigkeit des Lösungsmassenstromes ist durch den Einregelvorgang gut erkennbar. Im rechten, oberen Sektor des Bildes sind die konstanten Temperaturen der Lösung dargestellt.

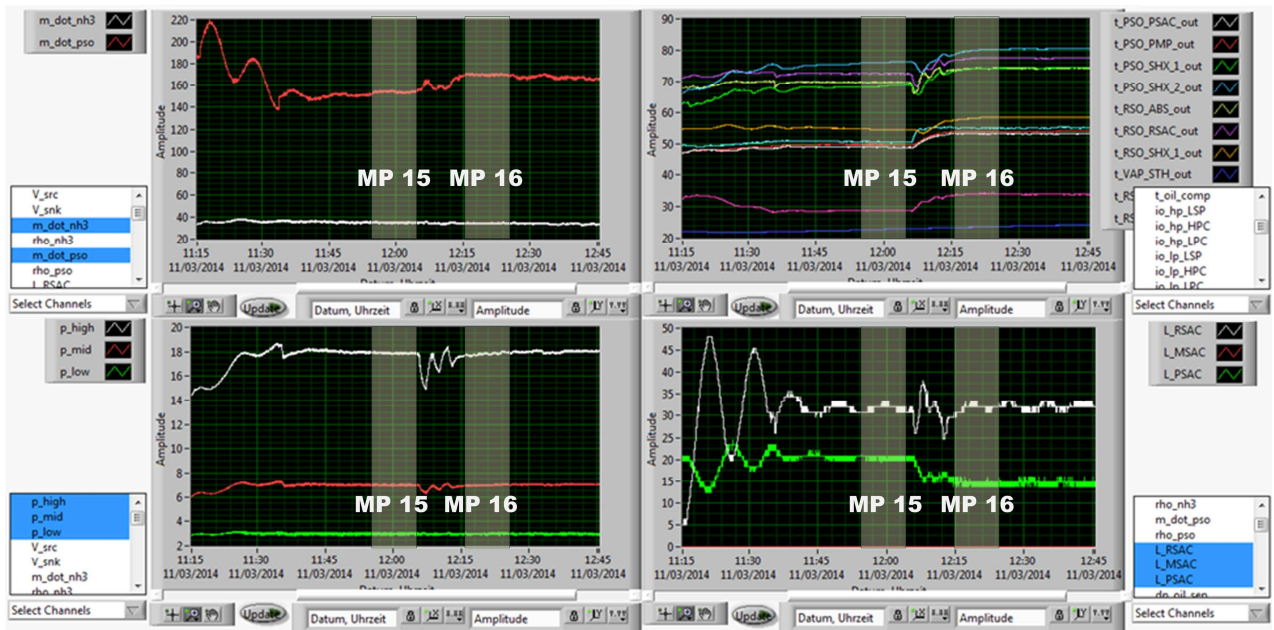


Abbildung 6.9: Zeitliche Änderung der Massenströme, Temperaturen, Drücke und Füllstände, bei Änderung des Betriebspunktes (MP15 auf MP16)

Bei einigen Betriebspunkten ist eine auffälligere Regelcharakteristik (Schwankungen) anhand der Leistungen im Absorber bzw. Desorber festzustellen (siehe Abbildung 6.10). Das Verhalten wird maßgeblich von der Senken- bzw. Quellenregelung der Wasserkreisläufe beeinflusst.

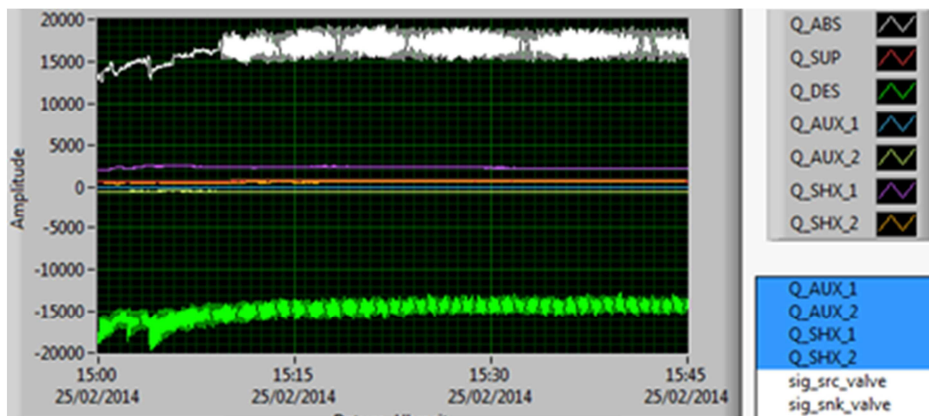


Abbildung 6.10: Regelcharakteristik der Absorber-/ Desorberleistung

Unvereinbarkeit der Stoffdatenbank nach Libotean (2008) mit der Dichtemessung der armen Lösung

Nach einer ersten Sichtung der Messwerte fiel auf, dass die gemessene Dichte der Lösung von den recherchierten Werten deutlich abweicht. Obwohl der qualitative Verlauf, der durch das Coriolis-Massenstrom-Messgerät („Endress & Hauser Promass 63MP08“) detektierten Werte, eine richtige Tendenz vermuten ließ (zunehmende Dichte bei abnehmender Ammoniak-Lösungskonzentration), wich der Wert im Durchschnitt um ca. 20 % von dem, gemäß der Publikation von Libotean et al. (2008), berechneten Wert ab. Abbildung 6.11 zeigt den Verlauf der Lösungsmittel-Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur veröffentlicht von Libotean et al. (2008), mit drei verschiedenen Lösungskonzentrationen, die in Relation zu den strichliert eingezeichneten Stoffwerten nach Infante Ferreira (1984) dargestellt sind.

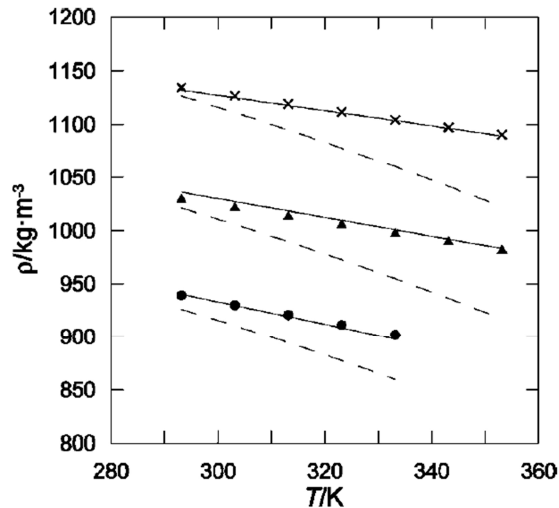


Abbildung 6.11: Verlauf der Dichte einer Lösung aus NH_3 und LiNO_3 mit unterschiedlichen NH_3 -Konzentrationen \bullet : $x=0,4$; \blacktriangle : $x=0,5$; \times : $x=0,6$ (Libotean, 2008, S.2383)

Abhängig von den Ammoniakkonzentrationen der armen Lösung bei den Einzelmessungen, die sich im Bereich zwischen 0,4 und 0,55 $\text{kg}_{\text{NH}_3}/\text{kg}_{\text{LSG}}$ bewegen (ermittelt aus dem $\log(p)/(-1/T)$ -Diagramm anhand des Drucks und der Temperatur am Desorberaustritt), kann ein Vergleich mit den Linien vergleichbarer Konzentrationsangaben in Abbildung 6.11 erfolgen. Es kann abgeschätzt werden, dass die Messwerte aus Tabelle 6-6 um etwa 20 % höher sind, als die von Libotean et al. (2008) dokumentierten Dichtewerte, die bei den gegebenen Konzentrationen in dem Bereich um ca. 1000 kg/m^3 angeführt sind. Die gemessenen Dichtewerte können folglich nicht zur ursprünglich beabsichtigten Bestimmung der NH_3 -Konzentration der Lösung verwendet werden.

Tabelle 6-6: Dichte bzw. Konzentration der armen Lösung - Messung vs. Berechnung

MP	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Messung $\rho_{\text{Lösung}} [\text{kg}/\text{m}^3]$	1242	1271	1265	1265	1291	1334	1331	1279	1299	1343	1322	1342
Messung Konzentration	0,246	0,246	0,253	0,252	0,224	0,178	0,181	0,237	0,215	0,168	0,191	0,170
Rechnung Konzentration	0,468	0,443	0,450	0,449	0,429	0,402	0,403	0,440	0,424	0,391	0,407	0,392

Als mögliche Ursachen können Feststoffablagerungen im Messgerät, höhere Dichte in Folge von Fremdstoffen im Medium (z.B. Korrosion, Öl) und ein Fehler des Messgerätes genannt werden. Eine genaue Ursachenanalyse ist erst nach Ausbau des Messgerätes möglich. Ergänzend wird erwähnt, dass sich bei Messung von Gewicht und Volumen einer entnommenen Probe von $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ Werte der Dichte wie bei Libotean et al. (2008) zeigten.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Aufbau

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Versuchsanlage einer hybriden Absorptions-/Kompressions-Wärmepumpe mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Lithiumnitrat aufgebaut. Die vorliegende Arbeit beinhaltet neben der Dokumentation des Aufbaus des Funktionsmusters zur Versuchsdurchführung auch die für erste Messungen erforderliche Einbindung der Infrastruktur für Wärmequelle und Wärmesenke und der Messtechnik sowie der Implementierung der Regelstrategie. Der Aufbau des Versuchsstandes erfolgte in der Zeit von Juli bis Dezember 2013 in den Räumlichkeiten des Instituts für Wärmetechnik.

Für den Aufbau des Versuchsstandes wurden bereits konzipierte Kreisläufe herangezogen, die in vorangegangenen Arbeit (Rabensteiner, 2012) modifiziert, anhand von Simulationen analysiert und verglichen wurden. Weiters erfolgte die Auslegung und Beschaffung von Bauteilen für den Kreislauf und im Rahmen dieser Arbeit wurden letzte konstruktive Details vervollständigt.

Die Entscheidung für die Ausführung des Absorbers als Blasenabsorber wurde aufgrund einer Vorfeldrecherche getroffen und die Absorbereinlasskonstruktion nach vorgegangener Patentrecherche, in Anlehnung an die Lanzenkonstruktion von Bourouis et al. (2012), konzipiert und nach der Fertigung einem Funktionstest (mit Luft/Wasser) unterzogen. Dabei zeigte sich, dass durch die an der Lanze angeordneten Bohrungen, ein gleichmäßiges Einströmen des Kältemittels in die flüssige Lösung möglich ist.

Die Einbindung des Ölmanagements in den Kältemittelkreislauf und der Verlauf des Ammoniakbypasses, über den eine erweiterte Einstellung der NH_3 -Konzentrationen im System erfolgen kann, wurden ausdetailliert und in das System eingebunden. Außerdem erfolgte die Einbindung der Sicherheitstechnik, vor allem der Ammoniaküberströmstellen der Überdrucksicherheitsventile und die Absaugvorrichtung für den gesamten Versuchsstand unter Einbindung eines am Institut vorhandenen Lüfters.

Die Anbindung des Lösungs- und Kältemittelkreislaufes sowie die erforderlichen Anschlussmöglichkeiten für Mess- und Steuerungstechnik erfolgte ebenso wie die hydraulische Anbindung der Wärmequelle und Wärmesenke an die Infrastruktur des IWTs.

Im Zuge der Bereitstellung eines füllfertigen Gemisches wurde ein Druck-Mischbehälter, unter Berücksichtigung der dabei auftretenden Temperaturen und Drücke, entworfen und gefertigt sowie einer Druckprobe unterzogen und auf Dichtheit geprüft. Der Mischaufbau und die Methodik zur Herstellung eines solchen Gemisches wurden ebenfalls, zusammen mit dem eigentlichen Füllvorgang der Anlage dokumentiert. Es zeigte sich, dass der Zeitbedarf für die Herstellung der Ammoniaklösung durch eine Änderung des ursprünglichen Mischaufbaus stark verkürzt werden konnte. Nach anfänglicher Flächenabsorption des einströmenden Kältemittels und der dadurch entstehenden gelartigen Trennschicht der Sorptionspartner wurde der konstant gekühlte Mischbehälter senkrecht gelagert, wodurch eine beschleunigte Blasenabsorption ermöglicht wurde.

Inbetriebnahme und Betrieb

Bei der Inbetriebnahme wurden unterschiedliche Probleme festgestellt. Ein Leistungseinbruch mit folgendem Abschalten der Lösungsmittelpumpe konnte in anfänglichen Probetrieben festgestellt und behoben werden. Die im Ölreservoir des Hochdruckkompressors auftretende Öltrübung wurde bemerkt, worauf Ölproben entnommen wurden. Als mögliche Gründe für die Verunreinigung wurden eventuelle Schweißrückstände in den Leitungen oder auch ein Mischen

mit, in den Kompressor zurückgeströmter, Lösung genannt. Eine Ausbreitung des verunreinigten Öls in den Niederdruckkompressor konnte bislang nicht festgestellt werden, ist aber weiterhin zu beobachten.

Der Ölzustand soll in weiteren Analysen untersucht werden. Weitere bei der Inbetriebnahme entstandenen Komplikationen, wie bspw. das Abschalten der Lösungsmittelpumpe im Betrieb, konnten gelöst werden bzw. wurden dokumentiert, wie bspw. die aufgetretene Öltrübung. Diese sind im weiteren Betrieb zu beobachten und in folgenden Analysen zu klären.

Bei der Auswertung der ersten Messwerte wurden, im Vergleich zu den recherchierten Stoffdaten nach Libotean (2008), um ca. 20% höher gemessene Dichtewerte der armen Lösung bemerkt, die ein weitere dafür vorgesehene Ermittlung der NH_3 -Konzentration nutzlos machte.

Die ersichtlich zu geringen Wärmesenken-Austrittstemperaturen der ausgegebenen Messwerte beeinflusste die daraus errechnete Absorberleistung. Folglich wurde die Leistung des Absorbers indirekt, über die gesamte an der Wärmesenke übertragenen Wärme berechnet.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme wurden erste Betriebspunkte angefahren und aufgezeichnet. Im Zuge der anfänglichen Analyse der Messpunkte stellte sich heraus, dass die gemessenen COP-Werte der Messpunkte wesentlich geringer sind als die im Vorfeld simulierten Werte. Als möglicher Grund wurde der real nicht erreichte Wirkungsgrad der Kompressoren genannt. Die Anlage zeigte in den Versuchen ein zufriedenstellendes Betriebs- und Regelverhalten.

Im Rahmen erster Messungen im Betrieb wurden lösungsseitig unrealistische Dichtewerte aufgenommen, die als Berechnungsgrundlage für weitere Leistungen in den Wärmetauschern verwendet wurden. Durch die Umstellung auf eine wärmequellen- bzw. wärmesenkenseitige Leistungsermittlung konnte der Einfluss des, durch das Massenstrommessgerät ausgegebene, Dichtewertes umgangen werden.

Ausblick

Basierend auf den ersten aufgezeichneten Messpunkten sollen weitere Messungen bei Betriebsbedingungen mit gesteigerten Temperaturniveaus und unterschiedlichen Betriebsdrücken vorgenommen werden. Weiterführende Untersuchungen sollen Klarheit über die festgestellten Probleme mit dem Kompressoröl (Trübung durch Verunreinigung) sowie die abweichenden Messungen der Lösungsmittel-Dichte bringen.

Für die zukünftige kommerzielle Hochtemperaturanwendungen einer Absorptions/Kompression-Wärmepumpe unter Verwendung des Arbeitsstoffgemisches $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ müssen weiterführende Betriebserfahrungen gesammelt werden. Außerdem muss für den möglichen, industriellen Einsatz die Leistungszahl der Anlage verbessert werden.

LITERATUR

- ABB** (2014), **ABB Asea Brown Boveri Ltd**, [http://www05.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/dd6fd951485b2cb7c1257b59004fd352/\\$file/D184S069U01-04-12_2010.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/dd6fd951485b2cb7c1257b59004fd352/$file/D184S069U01-04-12_2010.pdf), [26.02.2014]
- AlfaLaval** (2014), **ALFA LAVAL Corporate AB**, http://local.alfalaval.com/de-de/produkte-loesungen/waermeuebertragung/plattenwaermeuebertrager/alfanova/Documents/AlfaNova14_27_52_76.pdf, [18.01.2014]
- Ayala R., Heard C. L., Holland F. A.** (1997), "Ammonia/Lithium nitrate absorption/ compression refrigeration cycle. Part2. Experimental", *Journal of Applied Thermal Engineering*, Volume 18, Issue 8, Pages 661-670
- Bourouis M., Coronassalcedo A., Valles M. Raquera R., Zamora Garcia M.** (2012), **Compañía Industrial De Aplicaciones Termicas**, "Air/water or water/water absorption water cool using ammonia and lithium nitrate"; Europäische Patentnr.: EP 2484992A1, 08.08.2012
- Bücker** (2014), **Christian Bürkert GmbH & Co. KG**, http://www.buerkert.de/media/DE_Bestaendigkeit.pdf, [09.02.2014]
- Busch R.** (2006), „Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker“, 4. Auflage, Springer Verlag, Essen , Deutschland
- Cube von H., Stettner H., Steimle F., Lotz H.** (1997), „Lehrbuch der Kältetechnik – Band 1“, 4. Auflage, Müller Verlag, Heidelberg, Deutschland
- Danfoss** (2014, a), **Danfoss A/S**, http://www.ra.danfoss.com/TechnicalInfo/Literature/Manuals/01/PDVA1B303_AKVA.pdf, [05.03.2014]
- Danfoss** (2014, b), **Danfoss A/S**, <http://www.ra.danfoss.com/TechnicalInfo/Literature/Manuals/01/DKRCC.PD.CD0.A5.03.pdf>, [05.03.2014]
- Davis R. O. E., Olmstead L. B., Lundstrum F. O.** (1921), "Vapor Pressure of Ammonia-Salt Solutions", *Journal of the American Chemical Society*, Volume 43, Issue 7, Pages 1580–1583
- Endress und Hauser** (2014), **Endress+Hauser GmbH**, https://portal.endress.com/wa001/dla/5000275/1920/000/00/TI101DDE_1009.pdf, [08.03.2014]
- ESK Schultze** (2014), **ESK Schultze GmbH & Co KG**, http://www.esk-schultze.de/2012/Katalog/ESK_Katalog.pdf, [25.01.2014]
- Exxon Mobil** (2014), **Exxon Mobil Corporation**, http://www.mobil.com/Austria-German/Lubes/PDS/GLXXDEINDMOMobil_Gargoyle_Arctic_SHC_200.aspx, [06.02.2014]
- Frigopol** (2014), **Frigopol-Kälteanlagen GmbH**, http://www.frigopol.com/_pdf/4ae839bcd8bd.pdf, [12.01.2014]

Literatur

- Fuchs** (2014), Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH, http://www.fuchs-europe.de/fileadmin/fuchs_upload/downloads/Industrieschmierstoffe_Prospekte/2012/RENISO_Kaeltemaschinenoele_D_2012-2013.pdf, [06.02.2014]
- Heard C. L., Ayala R.** (2003), "Carbon and stainless steel in solutions of lithium nitrate in ammonia at moderate temperatures", *Journal of Materials and Corrosion*, Volume 54, Issue 8, Pages 609–611,
- Hybrid Energy Europe** (2014), http://www.heatpumpcentre.org/en/hppactivities/hppworkshops/Oslo2013/Documents/04_Hybrid%20_Energy%20-%20ExCo.pdf, [25.02.2014]
- IFT Hannover** (2014), Leibniz Universität Hannover, <http://www.ift.uni-hannover.de/5.html>, [März 2014]
- Infante Ferreira C. A.** (1984), "Thermodynamic and physical property data equations for ammonia-lithium nitrate and ammonia-sodium thiocyanate solutions", *Journal of Solar Energy*, Volume 32, Issue 2, Pages 231–236
- Kim J., Baik Y. J., Park S. R., Chang K. C., Ra H. S.** (2010), „Design of a high temperature production heat pump system using geothermal water at moderate temperature“, *Journal of Current Applied Physics*, Volume 10, Issue 2; Pages 117-122
- Kim J., Park S. R., Baik Y. J., Chang K. C., Ra H. S., Kim M., Kim Y.** (2013), "Experimental study of operating characteristics of compression/absorption high-temperature hybrid heat pump using waste heat", *Journal of Renewable Energy*, Volume 54, Pages 13–19
- Kim M., Baik Y. J., Park S. R., Chang K. C., Ra H. S.** (2010), "Design of a high temperature production heat pump system using geothermal water at moderate temperature", *Current Applied Physics*, Volume 10, Issue 2, Pages 117–122
- Krug N., Hainbach C.** (2010), „Pohlmann- Taschenbuch der Kältetechnik“, 20.Auflage, VDE Verlag, Berlin, Deutschland
- Kübler** (2014), Heinrich Kübler AG, http://www.ksr-kubler.com/tl_files/kfg/PDF/KSR_DE_1001_150.pdf, [01.03.2014]
- Lee K. B., Chun B. H., Lee J. C., Hyun J. C., Kim S. H.** (2002), "Comparison of heat and mass transfer in falling film and bubble absorbers of ammonia± water", *Experimental Heat Transfer: A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion*, Volume 15, Issue 3, Pages 191–205
- Libotean S., Martín A., Salavera D., Valles M., Esteve X., Coronas A.** (2008), "Densities, Viscosities, and Heat Capacities of Ammonia + Lithium Nitrate and Ammonia + Lithium Nitrate + Water Solutions between (293.15 and 353.15) K"; *Journal of Chemical & Engineering*, Volume 53, Issue 10, Pages 2383-2388
- Libotean S., Salavera D., Valles M., Esteve X., Coronas A.** (2007), "Vapor-Liquid Equilibrium of Ammonia + Lithium Nitrate + Water and Ammonia + Lithium Nitrate Solutions from (293.15 to 353.15) K", *Journal of Chemical & Engineering*, Volume 52, Issue 3, Pages 665-1150
- Merck** (2014), Merck KGaA, www.merckmillipore.com/chemicals/de_DE/Merck-DE-Site/EUR/ViewProductDocuments-File?ProductSKU=MDA_CHEM-105653&DocumentType=MSD&DocumentId=%2Fmda%2Fchemicals%2Fmsds%2Fde

Literatur

AT%2F105653_SDS_AT_DE.PDF&DocumentSource=GDS&Country=DE&Channel=M
erck-DE-Site, [09.02.2014]

- Moreno-Quintanar G., Rivera W., Best R.** (2011), "Development of a solar intermittent refrigeration system for ice production", World Renewable Energy Congress 2011, 8-13 May, Linköping, Schweden
- Nau M.** (2004), „Elektrische Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern“, JUMO GmbH & Co KG; Fulda, Deutschland, ISBN 978-3-935742-06-1
- Nordvedt, S.R.** (2005), "Experimental and theoretical study of a compression/absorption heat pump with ammonia/water as working fluid", Dissertation, Faculty of Mechanical Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Oslo, Norway
- Osenbrück A.** (1895), „Verfahren zur Kälteerzeugung bei Absorptionsmaschinen“, Kaiserliches Patentamt, Deutschland, Patentnr. DRP84084
- Peter T., Sander H., Steck A., Treffinger P., Guo Z.** (1999), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, „Wärmetauscherverfahren und Wärmetauscher“, Europäische Patentnr.: EP0927326B1, 07.07.1999
- Rabensteiner M.** (2012), „Alternative Arbeitsstoffgemische für Kompressions/Absorptions-Wärmepumpen für die Anwendung im Hochtemperaturbereich“, Masterarbeit, Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, Graz, Österreich
- Risberg T., Nordvedt S. R., Grandum S., Horntvevt B.** (2005), Institut For Energiteknikk, "Inlet arrangement for a plate heat exchanger", Intenational Publication Number WO2005121685A1, 22.12.2005
- Rivera W., Moreno-Quintanar G., Rivera C. O., Best R., Martínez F.** (2001), "Evaluation of a solar intermittent refrigeration system for ice production operating with ammonia/lithium nitrate", Journal of Solar Energy, Volume 85, Issue 1, Pages 38–45
- Roth** (2014), Carl Roth GmbH + Co. KG, http://www.carlroth.com/media/_de-de/sdpdf/5281.PDF, [03.03.2014]
- Siemens** (2014, a), Siemens Aktiengesellschaft, https://eb.automation.siemens.com/collaterals/files/01/pdf/DEU_349255.PDF, [03.03.2014]
- Siemens** (2014, b), Siemens Aktiengesellschaft, https://eb.automation.siemens.com/collaterals/files/01/pdf/DEU_348848.PDF, [03.03.2014]
- Unbehauen H.** (2008), „Regelungstechnik I - Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme“, 15. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, Deutschland
- Ventas R., Vereda C., Lecuona A., Venegas M.** (2012), "Experimental study of a thermochemical compressor for an absorption/compression hybrid cycle", Journal of Applied Energy, Volume 97, Pages 297–304
- Zamora M., Bourouis M., Vallés R., Coronas A.** (2011), "Development of a small capacity air-cooled ammonia/lithium nitrate absorption chiller – first cooling capacity and cop

Literatur

measurements”, International Sorption Heat Pump Conference 2011 (ISHPC11), 5-7 April, Padua, Italy

ANHANG

Messwerteliste

Tabelle 0-1: Messeingänge und Messausgänge Hypump

Nr	Kurzbezeichnung	Modul	Mess-einheit	Mess-bereich	Ausgabe-einheit	Ausgabe-mess-bereich		Modul-Kanal	Name Lab-view
0	Zeitstempel						Systemzeit		
1	t_NH3_PSAC_out	TC Input			°C	30-80	TC Typ K, Anlegefühler	7.0	TC0
2	t_NH3_AUX_1_out	TC Input			°C	20-80	TC Typ K, Anlegefühler	7.1	TC1
3	t_NH3_LPC_out	TC Input			°C	100-180	TC Typ K, Anlegefühler	7.2	TC2
4	t_NH3_SHX_2_out	TC Input			°C	50-120	TC Typ K, Anlegefühler	7.3	TC3
5	t_NH3_AUX_2_out	TC Input			°C	20-80	TC Typ K, Anlegefühler	7.4	TC4
6	t_NH3_HPC_out	TC Input			°C	100-180	TC Typ K, Anlegefühler	7.5	TC5
7	t_NH3_SUP_out	TC Input			°C	80-120	TC Typ K, Anlegefühler	7.6	TC6
8	t_NH3_OS_out	TC Input			°C	80-120	TC Typ K, Anlegefühler	7.7	TC7
9	t_PSO_PSAC_out	TC Input			°C	40-80	TC Typ K, Anlegefühler	7.8	TC8
10	t_PSO_PMP_out	TC Input			°C	40-80	TC Typ K, Anlegefühler	7.9	TC9
11	-----	TC Input					frei	7.10	TC10
12	-----	TC Input					frei	7.11	TC11
13	-----	TC Input					frei	7.12	TC12
14	-----	TC Input					frei	7.13	TC13
15	-----	TC Input					frei	7.14	TC14
16	-----	TC Input					frei	7.15	TC15
17	t_PSO_SHX_1_out	TC Input			°C	50-100	TC Typ K, Anlegefühler	8.0	TC0
18	t_PSO_SHX_2_out	TC Input			°C	60-120	TC Typ K, Anlegefühler	8.1	TC1
19	t_RSO_ABS_out	TC Input			°C	60-100	TC Typ K, Anlegefühler	8.2	TC2
20	t_RSO_RSAC_out	TC Input			°C	60-100	TC Typ K, Anlegefühler	8.3	TC3
21	t_RSO_SHX_1_out	TC Input			°C	50-90	TC Typ K, Anlegefühler	8.4	TC4
22	t_VAP_STH_out	TC Input			°C	0-60	TC Typ K, Anlegefühler	8.5	TC5
23	t_RSO_STH_out	TC Input			°C	0-60	TC Typ K, Anlegefühler	8.6	TC6
24	t_RSO_DES_out	TC Input			°C	40-80	TC Typ K, Anlegefühler	8.7	TC7
25	-----	TC Input					frei, TC Typ K angeschlossen	8.8	TC8
26	-----	TC Input					frei, TC Typ K angeschlossen	8.9	TC9
27	-----	TC Input					frei	8.10	TC10
28	-----	TC Input					frei	8.11	TC11
29	-----	TC Input					frei	8.12	TC12
30	-----	TC Input					frei	8.13	TC13
31	-----	TC Input					frei	8.14	TC14
32	-----	TC Input					frei	8.15	TC15
33	t_snk_ABS_in	RTD Input			°C	20-90	Pt100, im Rohr verschraubt	5.0	RTD0
34	t_snk_ABS_out	RTD Input			°C	40-120	Pt100, im Rohr verschraubt	5.1	RTD1
35	t_snk_SUP_out	RTD Input			°C	40-120	Pt100, im Rohr verschraubt	5.2	RTD2
36	t_src_DES_in	RTD Input			°C	20-90	Pt100, im Rohr verschraubt	5.3	RTD3
37	t_src_DES_out	RTD Input			°C	0-70	Pt100, im Rohr verschraubt	6.0	RTD0
38	t_src_AUX_1_out	RTD Input			°C	0-70	Pt100, im Rohr verschraubt	6.1	RTD1
39	t_src_AUX_2_out	RTD Input			°C	0-70	Pt100, im Rohr verschraubt	6.2	RTD2
40	-----	RTD Input					frei	6.3	RTD3
41	p_high	Analog Input	mA	4-20	bar g	0-25	Drucktransmitter, GEMS	3.0	AI0
42	p_mid	Analog Input	mA	4-20	bar g	0-25	Drucktransmitter, GEMS	3.1	AI1
43	p_low	Analog Input	mA	4-20	bar g	0-10	Drucktransmitter, GEMS	3.2	AI2
44	V_src	Analog Input	mA	4-20	l/h	0-2000	Volumenstrommessger ät, AAB Miniflow	3.3	AI3
45	V_snk	Analog	mA	4-20	l/h	0-2000	Volumenstrommessger	3.4	AI4

Literatur

Nr	Kurzbezeichnung	Modul	Mess-einheit	Mess-bereich	Ausgabe-einheit	Ausgabe-mess-bereich		Modul. Kanal	Name Lab-view
		Input					ät, AAB Miniflow		
46	m_dot_nh3	Analog Input	mA	4-20	kg/h	0-100	Coriolis-Massenstrommessgerät, Endress+Hauser	3.5	AI5
47	rho_nh3	Analog Input	mA	4-20	kg/m³	0-10	Coriolis-Massenstrommessgerät, Endress+Hauser	3.6	AI6
48	m_dot_pso	Analog Input	mA	4-20	kg/h	0-600	Coriolis-Massenstrommessgerät, Endress+Hauser	3.7	AI7
49	rho_pso	Analog Input	mA	4-20	kg/m³	800-1400	Coriolis-Massenstrommessgerät, Endress+Hauser	3.8	AI8
50	L_RSAC	Analog Input	mA	4-20	%	0-100	Reedkontaktkette	3.9	AI9
51	L_MSAC	Analog Input	mA	4-20	%	0-100	Reedkontaktkette	3.10	AI10
52	L_PSAC	Analog Input	mA	4-20	%	0-100	Reedkontaktkette	3.11	AI11
53	dp_oil_sep	Analog Input	mA	4-20	bar	0-1	Differenzdrucktransmitter, Rosemount	3.12	AI12
54	dp_snk_AUX_1	Analog Input	mA	4-20	bar	0-1	Differenzdrucktransmitter, HUBA	3.13	AI13
55	dp_snk_AUX_2	Analog Input	mA	4-20	bar	0-1	Differenzdrucktransmitter, Rosemount	3.14	AI14
56	-----	Analog Input	mA	4-20			frei	3.15	AI15
57	io_hp_LSP	Digital Input	I/O		I/O		Druckschalter, Danfoss Typ KP	4.0	DI0
58	io_hp_HPC	Digital Input	I/O		I/O		Druckschalter, Danfoss Typ KP	4.1	DI1
59	io_hp_LPC	Digital Input	I/O		I/O		Druckschalter, Danfoss Typ KP	4.2	DI2
60	io_lp_LSP	Digital Input	I/O		I/O		Druckschalter, Danfoss Typ KP	4.3	DI3
61	io_lp_HPC	Digital Input	I/O		I/O		Druckschalter, Danfoss Typ KP	4.4	DI4
62	io_lp_HPC	Digital Input	I/O		I/O		Druckschalter, Danfoss Typ KP	4.5	DI5
63	err_LSP_motor	Digital Input	I/O		I/O		Fehlersignal Lösungspumpe (Thermistorsignal)	4.6	DI6
64	err_LPC_motor	Digital Input	I/O		I/O		Fehlersignal Niederdruckkompressor	4.7	DI7
65	err_HPC_motor	Digital Input	I/O		I/O		Fehlersignal Hochdruckkompressor	4.8	DI8
66	err_LPC_oil	Digital Input	I/O		I/O		Ölspiegelregulator, falls Signal vorhanden	4.9	DI9
67	err_HPC_oil	Digital Input	I/O		I/O		Ölspiegelregulator, falls Signal vorhanden	4.10	DI10
68	P_el_LPC (Signal)	Digital Input	I/O		Impuls-zähler	1000 Imp/kWh	Impulsgeber, Eltako	4.11	DI11
69	P_el_HPC (Signal)	Digital Input	I/O		Impuls-zähler	1000 Imp/kWh	Impulsgeber, Eltako	4.12	DI12
70	P_el_LSP (Signal)	Digital Input	I/O		Impuls-zähler	1000 Imp/kWh	Impulsgeber, Saia Burgess	4.13	DI13
71	-----	Digital Input	I/O				frei	4.14	DI14
72	-----	Digital Input	I/O				frei	4.15	DI15
73	io_ALL	Digital Output			I/O		Schalter, Hauptschalter (ev. Labview-intern)	4.16	DO0
74	io_LSP	Digital Output			I/O		Schalter, Lösungspumpe	4.17	DO1
75	io_LPC_init	Digital Output			I/O		Schalter, Niederdruckkompressor	4.18	DO2
76	io_HPC_init	Digital Output			I/O		Schalter, Hochdruckkompressor	4.19	DO3
77	io_snk_pmp	Digital Output			I/O		Schalter, snk_pmp_1 (WILO), snk_pmp_2 (Grundfos)	4.20	DO4
78	io_src_pmp	Digital			I/O		Schalter, src_pmp_1	4.21	DO5

Literatur

Nr	Kurzbezeichnung	Modul	Mess- einheit	Mess- bereich	Ausgabe -einheit	Ausgabe -mess- bereich		Modul. Kanal	Name Lab- view
		Output					(WILO)		
79	io_LPC_release	Digital Output			I/O		Freigabe FU LPC	4.22	DO6
80	io_HPC_release	Digital Output			I/O		Freigabe FU HPC	4.23	DO7
81	io_FU_main_power	Digital Output			I/O		Hauptschalter für Versorgung Frequenzumrichter	4.24	DO8
82	io_ventilator	Digital Output			I/O		Ventilator Gebläse EIN/AUS	4.25	DO9
83	io_heizband	Digital Output			I/O		Heizband Ölsumpf EIN/AUS	4.26	DO10
84	-----	Digital Output					frei	4.27	DO11
85	-----	Digital Output					frei	4.28	DO12
86	-----	Digital Output					frei	4.29	DO13
87	-----	Digital Output					frei	4.30	DO14
88	io_PWM_STH	Digital Output			I/O		Pulsweitenmodulation Lösungsdrossel	4.31	DO15
89	sig_src_valve	Analog Output	V	0-10	%	0-100	Stellsignal Mischventil Kaltwasser/Wärmequell- enkreislauf	1.0	AO0
90	sig_snk_valve	Analog Output	V	0-10	%	0-100	Stellsignal Mischventil Heisswasser/Wärmesen- kenkreislauf	1.1	AO1
91	-----	Analog Output	V	0-10			frei	1.2	AO2
92	-----	Analog Output	V	0-10			frei	1.3	AO3
93	sig_f_LSP	Analog Output	mA	4-20	Hz	10-87,5	Signal Frequenzumrichter Lösungspumpe	2.0	AO0
94	sig_f_HPC	Analog Output	mA	4-20	Hz	15-75	Signal Frequenzumrichter Hochdruckkompressor	2.1	AO1
95	sig_f_LPC	Analog Output	mA	4-20	Hz	35-75	Signal Frequenzumrichter Niederdruckkompressor	2.2	AO2
96	-----	Analog Output	mA	4-20			frei	2.3	AO3

Kalibrierdaten Drucktransmitter

Messwerte Kontrolle HP

Uhrzeit	p_HP	Referenz	Standardabweichung
	bar	bar	
15:31	11,301	11,31	0,0163248
15:36	16,121	16,13	
15:36	18,574	18,6	

Messwerte Kontrolle MID

Uhrzeit	p_MID	Referenz	Standardabweichung
	bar	bar	
15:09	6,159	6,19	0,017319
15:16	9,781	9,79	
15:20	13,405	13,42	

Messwerte Kontrolle LP

Uhrzeit	p_LP	Referenz	Standardabweichung
	bar	bar	
15:42	2,665	2,675	0,010928571
15:46	6,201	6,217	
15:50	8,151	8,14	

Formel der Stoffwertkorrelation zur Berechnung der Wärmesenkenleistung Q_{hot} :

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{hot}} = & -((0,000003694341503963 \cdot B4^3 - 0,000464997442183515 \cdot B4^2 + \\
 & 4,19861846186111 \cdot B4 + 0,494300728878052) - (0,000003694341503963 \cdot C4^3 - \\
 & 0,000464997442183515 \cdot C4^2 + 4,19861846186111 \cdot C4 + 0,494300728878052)) \\
 & (0,00000569161684 \cdot C4^3 - 0,00423317618982 \cdot C4^2 - 0,05131255128225 \cdot C4 + \\
 & 1000,85333187443) \cdot D4 / (3600 \cdot 1000)
 \end{aligned}$$

Wobei $B4 = t_{\text{snk_ABS_in}}$ & $C4 = t_{\text{snk_SUP_out}}$ & $D4 = V_{\text{snk}}$

Literatur

Standardabweichung Temperaturmessung

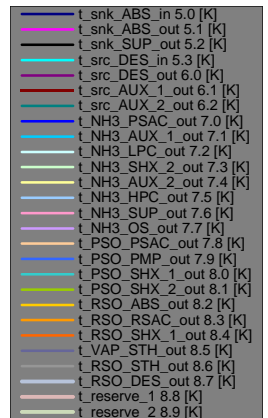
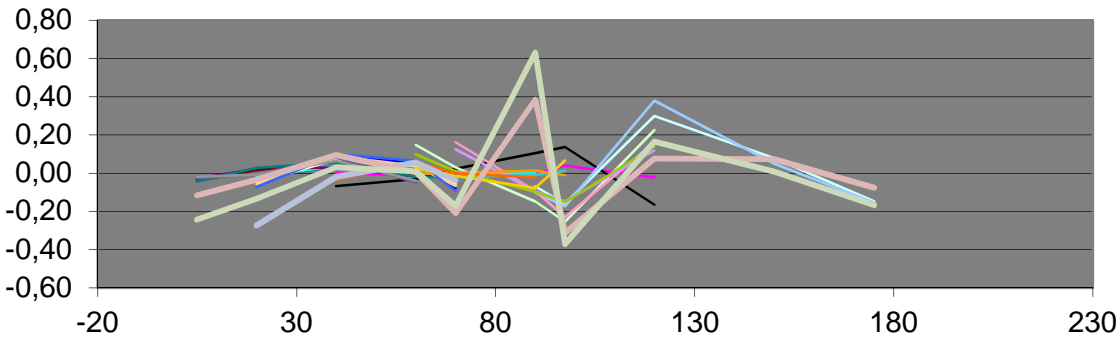
0	Sensor	Kelvimat	t_snk_AB S_in	t_snk_AB S_out	t_snk_S UP_out	t_src_D ES_in	t_src_DE S_out	t_src_AU X_1_out	t_src_AU X_2_out
0	Channel	ablesen	5.0	5.1	5.2	5.3	6.0	6.1	6.2
0	0	[°C]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]
			0,01942	0,02663	0,09130	0,02027	0,03762	0,03899	0,03829

t_NH3_P SAC_out	t_NH3_A UX_1_out	t_NH3_L PC_out	t_NH3_S HX_2_out	t_NH3_A UX_2_out	t_NH3_ HPC_out	t_NH3_S UP_out	t_NH3_ OS_out	t_PSO_P SAC_out	t_PSO_P MP_out
7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9
[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]
0,06824	0,05989	0,20417	0,22672	0,05590	0,24795	0,21849	0,13046	0,06866	0,08405

t_PSO_S HX_1_out	t_PSO_S HX_2_out	t_RSO_ ABS_out	t_RSO_R SAC_out	t_RSO_S HX_1_out	t_VAP_ STH_out	t_RSO_ STH_out	t_RSO_ DES_out	t_reserve _1	t_reserve _2
8.0	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9
[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]
0,03010	0,13533	0,42197	0,04646	0,08167	0,05151	0,04987	0,12446	0,22154	0,24832

Abweichung nach Kalibrierung

Abweichung gegenüber
Referenz



Referenz