

Umwelttechnik in Baden-Württemberg



Entwicklung und Demonstration einer Technologie zur nachhaltigen Trinkwassergewinnung aus Luftfeuchtigkeit

Abschlussbericht zum Förderprogramm
"EFRE Umwelttechnik"
des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg



Europäische Union
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

investition in
Ihre Zukunft!



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Umwelttechnik in Baden-Württemberg

Autoren:

Artjom Kniss
Universität Stuttgart
Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie
Dietmar Warnke
Maschinenbau Lohse GmbH
Markus Michelberger
Michelberger Energietechnik GmbH
Michael Eisele
Melotec Kunststoffverarbeitungs GmbH
Mike Blicher
Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB

Förderkennzeichen: UT
Laufzeit: 20.12.2010 - 15.10.2013

Das Projekt wurde je zur Hälfte mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) im Rahmen des Operationellen Programms für das Ziel „Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung“ und mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

April 2014



Europäische Union
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

investition in
Ihre Zukunft!



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzbeschreibung.....	4
1 Problemstellung	5
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	6
2.1 Kältekondensation	6
2.2 Kapillarkondensation / Feststoffsorption	8
2.3 Sorptionsverfahren mit flüssigen Sorbentien (Absorption).....	10
3 Aufgabenstellung	12
4 Ablauf des Gesamtvorhabens	14
4.1 Phase 1: Grundlagen, Vorarbeiten, Vorversuche.....	14
4.1.1 Systematische Auswahl und Bewertung Grundkonzepte	14
4.1.1.1 Absorption	14
4.1.1.2 Desorption	15
4.1.2 Durchführung von Vorversuchen	17
4.1.2.1 Dampfdruckmessungen mit verschiedenen Salzlösungen	17
4.1.2.2 Vorversuche zur Absorption.....	20
4.1.2.3 Vorversuche zur Desorption.....	24
4.1.2.4 Materialbeständigkeit / Korrosion	34
4.2 Phase 2: Planung und Detailkonstruktion der Gesamtanlage.....	39
4.2.1 Grundplanung Containeranlage	39
4.2.1.1 40'- Container	39
4.2.1.2 Solecontainer.....	39
4.2.1.3 Technik-/Betriebscontainer.....	40
4.2.1.4 Planung Gesamtaufbau Container	41
4.2.2 Absorptionsanlage.....	41
4.2.3 Desorptionsanlage.....	42
4.2.3.1 Auslegung Desorptionsanlage	42
4.2.3.2 Kühlsystem der Desorption	43
4.2.4 Auslegung der Energieversorgung.....	45
4.2.4.1 Elektrische Energieversorgung	45
4.2.4.2 Thermische Energieversorgung.....	45
4.2.5 Steuerung	46
4.3 Phase 3: Bau, Inbetriebnahme und Test	46
4.3.1 Aufbau der Gesamtanlage.....	46
4.3.2 Inbetriebnahme und Vorversuche mit Wasser	53

4.3.2.1	Inbetriebnahme Absorption	53
4.3.2.2	Inbetriebnahme Desorption	53
4.3.3	Versuche mit Lithiumchlorid	54
4.3.4	Versuche Desorption	54
4.3.5	Versuche Absorption	54
4.4	Zusammenfassung der wissenschaftlich technischen Arbeiten.....	56

Kurzbeschreibung

Die Sicherung der Trinkwasserversorgung der Weltbevölkerung ist eine der wichtigsten Aufgaben der heutigen und zukünftigen Generationen. In vielen Gegenden der Welt ist heute keine Versorgungssicherheit gegeben und der Klimawandel verschlimmert die Situation besonders in ariden und semi-ariden Gebieten zunehmend. Vor allem in Regionen, wo kein Zugang zu nachhaltigen Oberflächen- oder Grundwässern besteht, kann das in der Umgebungsluft als Luftfeuchtigkeit gebundene Wasser grundsätzlich als nahezu unerschöpfliche Wasserquelle dienen. Der heutige Stand der Technik liefert allerdings bisher nur wenige Systeme, welche den Nachteil eines sehr hohen spezifischen Energieverbrauchs sowie hohen Betriebs- und Anlagenkosten aufweisen und wie die Kältekondensation nur unter bestimmten klimatischen Bedingungen funktionieren.

Die hier durchgeführte Entwicklung hatte zum Ziel, ein neuartiges Verfahren zu realisieren, dass mittelfristig eine wirtschaftliche Erzeugung von Trinkwasser aus Luftfeuchtigkeit ermöglichen soll. Der Ansatz des Projektes, der sich grundlegend von den bisher praktizierten Techniken unterscheidet, ist die Wassergewinnung aus Luftfeuchte durch ein kombiniertes Absorptions-/Desorptionsverfahren. Dazu wurde die Absorption von Luftfeuchte an einem flüssigen Absorbens mit der Desorption durch eine spezielle Vakuumverdampfertechnik kombiniert. Das Konzept des Entwicklungsvorhabens zielte darauf ab eine energieautarke, mobile Anlage zur dezentralen Wassergewinnung aus Luft zu fertigen, testen und zu demonstrieren.

Das Gesamtkonzept ist durch die Nutzung von regenerativen Energien nachhaltig und CO₂ neutral. Es werden keine Abfallstoffe produziert und alle Arbeitsmittel werden im Kreislauf geführt.

Der Markt, der von den momentan vorhandenen Verfahren nicht zufriedenstellend bedient werden kann, ist groß. Besonders im mittleren Osten, Teilen Ostasiens, der erweiterten Mittelmeerregion und Afrika wäre die Wassergewinnung aus Luft in vielen Gebieten möglich und für die dort lebende Bevölkerung zum Teil existenziell wichtig. Ähnlich starke Wachstumsraten wie im Bereich der Meerwasserentsalzung sind zu erwarten, falls es gelingt die Technologie wirtschaftlich umzusetzen.

Das Projekt gliederte sich in mehrere Phasen. Aufbauend auf den wissenschaftlich-technisch Grundlagen, der Charakterisierung des Systems und einer Reihe von Vorversuchen wurden im nächsten Schritt die Teilkomponenten ausgelegt und konstruiert. Dem Bau der Aggregate folgte eine Testphase der Einzelsysteme. Nach Zusammenführung und Integration der Gesamtanlage in einen Container folgten eine Reihe von intensiven Versuchen zur Evaluierung der Leistungsfähigkeit und die Demonstration der Gesamttechnologie.

Zur Verwirklichung des Projektes hat sich ein Konsortium aus drei baden-württembergischen KMUs und zwei Forschungsinstitution zusammengefunden, die sich aufgrund Ihrer Arbeitsfelder und Spezialisierungen im Hinblick auf die Aufgabenstellung sehr gut ergänzten. Gemeinsam war das Konsortium in der Lage die Entwicklungsziele zu erreichen.

1 Problemstellung

In den letzten Jahren haben der intensive Verbrauch von Wasser und der Klimawandel in vielen Regionen der Erde zu einer Verknappung der natürlichen Trinkwasserressourcen geführt. Durch den steigenden Druck der Bevölkerungsentwicklung und den Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen wird sich diese Lage in den kommenden Jahren noch weiter verschlechtern.

Besonders in ariden und semi-ariden Gebieten ist die Trinkwassergewinnung ein existentielles Problem. Da die potentielle Verdunstung hier höher ist als der Niederschlag, ist das Wasserbudget negativ, was bedeutet, dass oftmals keine sich erneuernden Trinkwasserquellen vorhanden sind. Das Grundwasser ist, wenn überhaupt vorhanden, meist schon versalzen und die Grundwasserspiegel sinken immer weiter ab, so dass die Nutzung nicht mehr möglich ist. Eine nachhaltige Wassergewinnung aus Oberflächengewässern oder Grundwasserquellen ist dadurch nicht möglich.

Gerade in ärmeren und abgeschiedenen Regionen, in denen keine wasserführende Infrastruktur vorhanden ist bzw. instandgesetzt werden kann, bietet eine dezentrale und energetisch autarke Wassergewinnung die optimale Möglichkeit für eine qualitative hochwertige Trinkwasserversorgung.

Wassergewinnung aus der Luft ist eine technologische Möglichkeit dieser Problemstellung gerecht zu werden. Aktuell sind dazu allerdings nur wenige technische Ansätze am Markt vorhanden, die aus wirtschaftlichen und oft auch technischen Gründen keine zufriedenstellenden Lösungen darstellen.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Aktuell sind eine Reihe von Mechanismen bzw. Technologien zur Wassergewinnung aus Luftfeuchtigkeit bekannt:

2.1 Kältekondensation

Bei der Kältekondensation wird die Umgebungsluft bis unterhalb des Taupunkts des enthaltenen Wassers abgekühlt, der abhängig von der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit ist. Die produzierbare Kondensatmenge wird bei diesem Prozess maßgeblich von der Unterschreitung des Taupunktes bestimmt. Für eine effektive Kondensation der nun übersättigten Luft wird eine Oberfläche zur Keimbildung benötigt, welche von der kalten Oberfläche des Wärmetauschers bereitgestellt wird, an der das Wasser kondensiert und abgeführt wird. Die gängigste Technik zur Kälteerzeugung ist die Kompressionskältemaschine, wie sie in Kühlschränken und Klimaanlage Verwendung findet. Alternativ kann die benötigte Kälte auch über Sorptionswärmepumpen bereitgestellt werden. Wie die in Kapitel 2.2 beschriebenen Ausführungen zur Kapillar- und Feststoffsorption belegen, lässt sich Wasser mittels eines Sorptionsprozesses aber auch direkt aus der feuchten Luft erzeugen, wodurch eine Kältekondensation mit Sorptionswärmepumpen kaum wirtschaftlich sein kann.¹

Aufgrund der Kontaminierung der Luft mit Schmutzpartikeln und der Lösefähigkeit des Wassers von gasförmigen Giftstoffen ist eine Vorbehandlung der Luft und weitere Aufbereitung des produzierten Kondensats nötig. Anhand eines Fließschemas der Firma EcoloBlue soll der aufwendige Prozess verdeutlicht werden.

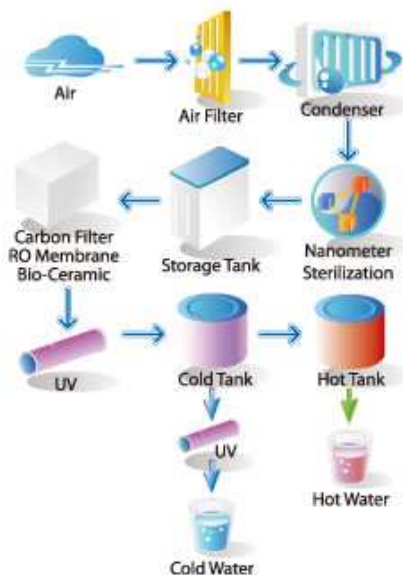


Abbildung 2.1 - Fließschema XZIEX²

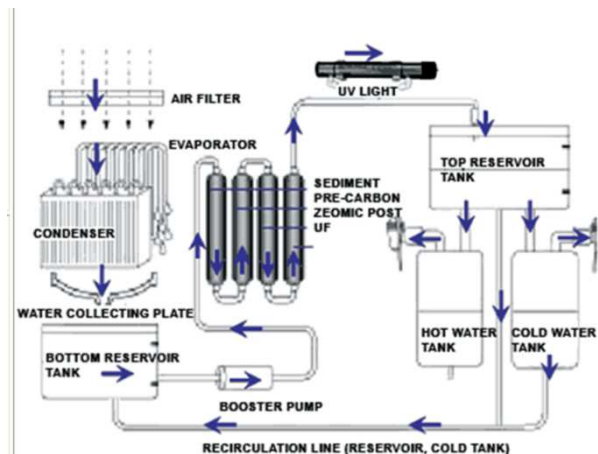


Abbildung 2.2 - Fließschema EcoloBlue³

Zusätzlich werden in der Regel große Ventilatoren benötigt, um die feuchte Luft den Kondensationsflächen zuführen zu können. Der große Energiebedarf zur Deckung der benötigten Kühlleistung ist ein weiterer Nachteil, möchte man große Mengen Wasser

¹ Wassergewinnung aus atmosphärischer Luft; Fachhochschule Stuttgart; Diplomarbeit; Stefan Haag; 2004

² <http://www.air2water.biz> (Abbildung 2013 nicht mehr online)

³ <http://www.ecoloblue.com/>

nachhaltig mit den sogenannten „atmosphärischen Wassergeneratoren“ (AWG) produzieren zu können. Dieser Punkt wird bei den momentan stetig ansteigenden Kosten für Primärenergie weiterhin an Bedeutung gewinnen und zu Lasten eines wirtschaftlichen Betriebes dieser Technik fallen. Mittlerweile finden sich einige kommerzielle Anlagen auf dem Markt, meist von US-amerikanischen Anbietern, mit Produktionskapazitäten von wenigen Litern bis hin zu großtechnischen Anwendungen mit mehreren 1.000 Litern pro Tag.

Tabelle 2.1 - Überblick über kommerziell erhältliche Kältekondensationsanlagen

Firma / Produkt	Tagesproduktion in Litern (abhängig vom Typ)	Spezifischer <u>elektrischer</u> Energiebedarf
Air Water Corporation	120 – 5000 (20-40°C; 60 – 100% r.F.)	0,1 – 0,4 kWh/l
EcoloBlue Inc.	200 – 5000 (27-30°C; 65-80% r.F.)	0,48 – 0,64 kWh/l
Medimar / Athmosphera aqua	50 – 5000 (40°C; 80% r.F.)	0,3 – 0,4 kWh/l
Excel Water Technology / Aquasphere	1000 – 5000 (k.A.)	0,6 kWh/l
Aqua Society / AquaMission AM-15	500 (35°C; 90% r.F.)	0,24 – 0,43 kWh/l
XZIEX / HCU	300 – 13000 (29°C; 70% r.F.)	0,35 – 0,5 kWh/l

Die starke Abhängigkeit der Produktionsleistung solcher Verfahren von den Umgebungsbedingungen soll am Beispiel der von Aqua Society veröffentlichten Daten aufgezeigt werden. Deutlich zu sehen ist die lineare Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte.

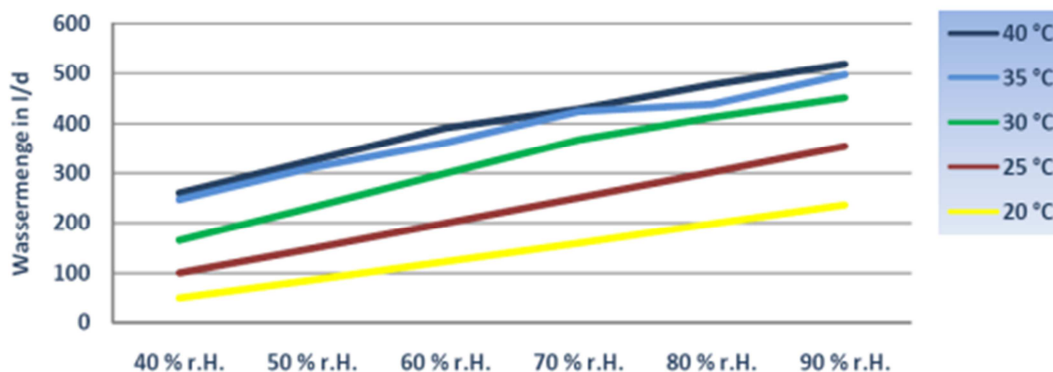


Abbildung 2.3 - Abhängigkeit der Produktionsleistung von Kältekondensationsanlagen

Neben den oben beschriebenen Verfahren zur direkten Kältekondensation, sind auch einige andere Verfahrensvarianten möglich.

Die Firma Skywell Water Systems bietet ein Verfahren an, welches auf die energieaufwändige Kühlung mit einer Kältemaschine verzichtet, indem die Kondensationsenergie der feuchten Luft mittels eines Abstrahlbleches gegen den Nachthimmel abgeführt wird. Das benötigte Temperaturgefälle wird durch die Nutzung der warmen Gebäudeabluft gewährleistet. Abhängig von der Umgebungstemperatur muss daher der Gebäudeluft zusätzlich Wärme zugeführt werden. Weiterhin wird für eine ausreichende

Produktionsleistung ein hoher Volumenstrom warmer und ausreichend feuchter Gebäudeabluft vorausgesetzt. Es sind keine detaillierten Informationen zum aktuellen Stand der Technologie bekannt.¹

Ein ähnliches Verfahren wurde innerhalb eines BMBF geförderten Kooperationsprojektes der Fachhochschule Südwestfalen entwickelt. Dabei wird nachts mit speziellen Kollektoren die benötigte Kälteenergie durch Strahlungsaustausch mit der oberen Atmosphäre gewonnen, zwischengespeichert und ab Sonnenaufgang für die Wassergewinnung genutzt. Auch hier konnten keine genaueren Daten in Erfahrung gebracht werden.⁴

Des Weiteren befinden sich weltweit mehrere sogenannte Nebelkollektoren im Einsatz, bei denen die extrem hohe Luftfeuchte der Nacht mit Netzen aufgefangen wird. Durch das Fehlen aufwendiger Peripherie und die einfache Wartung der Netze ist diese Technik prädestiniert für ärmere Regionen. Jedoch machen der extrem hohe Flächenbedarf und die starke Abhängigkeit an meteorologischen Randbedingungen eine universelle Einsetzbarkeit dieser Technologie unmöglich.⁵

Etwas futuristischer wirkt das Konzept „WatAir“ bei dem 98m² große Kollektorsegel maximal 48 Liter Tau pro Tag auffangen können. Die problematischen Randbedingungen bleiben jedoch erhalten.⁶

2.2 Kapillarkondensation / Feststoffsorption

Unter Kapillarkondensation versteht man die Kondensation von Wasser durch Absenkung des Dampfdrucks in den Poren aufgrund der Krümmung der Oberfläche.

Dabei wird Luft durch ein stark poröses Material geleitet. In den Poren entsteht ein Kapillardruck und das Wasser aus der Luft kann schon vor Erreichen der Taupunkttemperatur kondensieren. Dadurch sind die Materialien hygroskopisch und adsorbieren Wasser. Der Dampfdruck in den Poren lässt sich über die Porengröße des Materials einstellen. Auf diese Weise kann das zu verwendete Material bei der Herstellung an die klimatischen Bedingungen am Einsatzort angepasst werden. Die Porengröße wird so eingestellt, dass eine ausreichende Entfeuchtung der Luft erzielt wird, ohne dass beim Regenerationsprozess unnötiger Aufwand betrieben werden muss.

Die eigentliche Wassergewinnung erfordert zusätzliche Prozessschritte. Durch Erhitzen des Adsorbens wird das Wasser wieder desorbiert und in den gasförmigen Zustand überführt. Im Anschluss muss der Wasserdampf wieder kondensiert werden. Als Adsorbentmaterial eignen sich beispielsweise Keramiken, Aktivkohle, Aktivtonerde, synthetische Zeolithe, Adsorberpolymere, Adsorberharze, Molekularsiebe, Silica-Gel, etc.

Der Grenzbereich zwischen Adsorption bei der Feststoffsorption und Kapillarkondensation ist fließend. Abhängig von der Porengröße des Adsorbens findet auch Kapillarkondensation bei der Feststoffsorption statt.¹

Eine Internetrecherche ergab zwar einige Patentkonzepte (US Patent 6436172 - Method for separating condensable substances from gases or gas mixtures, 2002; US Patent 6960243 - Production of drinking water from air, 2005;) jedoch wurden keine Anwendungen in der kommerziellen Trinkwassergewinnung mit einem reinen Prozess der Kapillarkondensation gefunden.

Die Kapillarkondensation neigt im Laufe der Zeit zu starken Wirkungsgradverlusten aufgrund von Partikelanlagerungen an den Kapillaröffnungen. Angelagerte Partikel verstopfen die

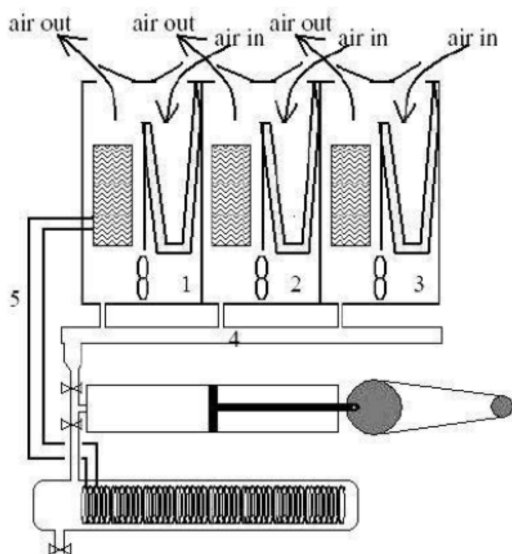
⁴ Fachhochschule Südwestfalen; http://www3.fh-swf.de/fbin/pressemitteilung_20060113_PM_477.php

⁵ http://www.wdr.de/tv/quarks/sendungsbeitraege/2005/0712/09_mangelware_wasser.jsp

⁶ Technion - Israel Institute of Technology; <http://support.ats.org/site/News2?page=NewsArticle&id=5687>

poröse Oberfläche was zu einer kurzen Lebensdauer des Materials führt. Die Anlagentechnik ist relativ aufwendig und die Adsorption und Desorption muss immer alternierend erfolgen.

Ein Verfahren auf Basis der Feststoffsorption wurde von der Firma EWA Technologies Group entwickelt, welches mit Hilfe eines Gel-Granulates auf Siliziumbasis das Wasser adsorbiert. Die feuchte Luft wird mit Ventilatoren dem Adsorbens zugeführt. Laut Herstellerangaben erlaubt das Anlagenkonzept nur die Adsorption des Wassers aus der Luft. Jegliche Schwebstoffe, Gase und Mikroorganismen werden mit der entfeuchteten Luft aus dem System getragen. Dadurch benötigt dieses Verfahren keine weiteren Stufen zur Wasseraufbereitung. Das Adsorbens ermöglicht einen effizienten Betrieb auch bei einer relativen Luftfeuchte unter 20% und einem Temperaturintervall zwischen 4°C und 45°C.



Die beim Adsorptionsprozess entstehende Wärme wird zur Rückgewinnung des Wassers zwischengespeichert. Der erzeugte Unterdruck ermöglicht eine Desorption bei rund 85°C. Der Dampf wird mittels eines Kompressors auf ein höheres Temperaturniveau gebracht und kondensiert. Die Kondensationswärme wird dem Desorptionsprozess zugeführt wodurch eine Wärmerückgewinnung zwischen 80 und 85% erreicht werden kann. (Prinzip Brüdenkompression)

Verschiedene Quellen geben einen spezifischen Energiebedarf von 0,17 bis 1 kWh_{elektrisch}/l an. Energierückgewinnung und Nutzung von Abwärme sind angedeutet.

Abbildung 2.4 - Prozessschema EWA Technology⁷

Somit ist auch dieses Verfahren aufgrund der komplexen Anlagentechnik und dem spezifischen Energiebedarf mit den momentan erhältlichen Kältekondensationsverfahren vergleichbar. Aufgrund der fehlenden Peripherie zur Aufbereitung des produzierten Wassers kann davon ausgegangen werden, dass das EWA-Konzept der Feststoffsorption im Vergleich zur Kältekondensation günstiger bei den Instandhaltungskosten sein wird. Jedoch finden sich keine Angaben zur Lebensdauer des verwendeten Adsorbentmaterials, was eine Einschätzung der Wirtschaftlichkeit erschwert.^{7 8 9}

Ein von der Firma Nanopore entwickeltes Konzept zur Wassergewinnung mittels Feststoffsorption sieht eine manipulierbare, reversible Benetzungsfähigkeit des Adsorbentmaterials vor (US Patent: US 6,960,243 B1). Mit Hilfe eines angelegten elektrischen Feldes kann die Oberfläche des Adsorbentmaterials von einem hydrophilen Zustand (Adsorption) in einen hydrophoben Zustand (Desorption) überführt werden. Dieser Effekt der Oberflächenmodifikation wird als Electrowetting-Effekt bezeichnet.

Mit Hilfe eines Ventilators wird die feuchte Luft in den Konzentrator geleitet, indem sich das Adsorbentmaterial aus Aktivkohle, Silizium und oberflächenbehandeltes Silizium befindet. Nach Adsorption des Wassers aus der feuchten Luft wird eine elektrische Spannung

⁷ Etan Bar: Extraction of water from air - an alternative solution for water supply; Elsevier, Desalination 165 (2004) 335

⁸ Geo Magazin Nr. 02/09: <http://www.geo.de/GEO/technik/59498.html>

⁹ EWA Water Technology Group: http://www.wt-ewa.com/upload_pictures/File/summary%2006-01-09.pdf

angelegt und die Oberflächenstruktur des Adsorbens in den hydrophoben Zustand überführt. Die beim Adsorptionsprozess entstehende Wärme wird teilweise wieder zur Verdampfung des Wassers genutzt. Eine elektrische Heizung unterstützt dabei den Prozess. Diese Verfahrensweise ist nötig, um ein beständiges Aufheizen des Adsorberbettes zu verhindern, welche zu einer Verminderung der Adsorptionsfähigkeit führen würde. Mit Hilfe eines luftgekühlten Kondensators wird der Dampf anschließend wieder kondensiert und aufgefangen. Neben der Patentschrift finden sich keine genaueren Angaben. Ein Artikel von Heise (Wasser-Ernte in der Wüste; 2004) gibt eine Produktionsleistung von 1,5 l/h und einen spezifischen Energiebedarf von 0,075 kWh/l an. Jedoch finden sich in beiden Quellen unterschiedliche Angaben zur prinzipiellen Verfahrensweise.^{10 11}

Von Vorteil ist bei allen Sorptionsverfahren das größere Einsatzspektrum im Vergleich zu Kältekondensationsverfahren, da diese auch bei niedrigen Luftfeuchten und Umgebungstemperaturen noch effektiv Wasser erzeugen können.

Jedoch weisen Feststoffsorbentien auch einige Nachteile auf. Auch hier verstopfen angelagerte Partikel mit der Zeit die poröse Oberfläche. Feststoffsorbentien haben zusätzlich eine kurze Lebensdauer, womit ein kontinuierlicher Betrieb nur mit erheblichem Aufwand realisiert werden kann.

2.3 Sorptionsverfahren mit flüssigen Sorbentien (Absorption)

Eine weitere Möglichkeit zur Wassergewinnung aus Luft stellt die Absorption mittels eines flüssigen Sorbens dar. Im Gegensatz zur Adsorption an Feststoffen, bei der das Wasser lediglich an der Oberfläche des Materials gebunden wird, geht das Wasser bei der Absorption eine chemische Bindung ein. Meist werden als Sorptionsmittel hochkonzentrierte Salzlösungen eingesetzt, die aufgrund ihrer Affinität mit Wasser in Lösung zu gehen stark hygroskopisch wirken.

Flüssige Sorbentien haben mehrere Vorteile gegenüber Feststoffen als Adsorbermaterialien. Sie haben eine signifikant geringere Hysterese bei jedem Absorption-Desorption Zyklus. Dadurch sind die Energieverluste bei jedem Zyklus geringer und die Energieeffizienz dieser Systeme wird erhöht.

Die bessere Handhabung einer Flüssigkeit, wie z.B. Pumpfähigkeit, ermöglicht ein wesentlich einfacheres Verfahrenskonzept für einen kontinuierlichen Prozess.

Zum anderen besitzen flüssige Sorptionsmittel eine höhere Wasseraufnahmekapazität als Feststoffadsorbentien. Bei Feststoffen ist eine Wasseraufnahme durch die bereitgestellte Oberfläche beschränkt. Durch die chemische Verbindung bei der Absorption bei flüssigen Sorbentien setzt die Struktur der gebildeten Hydrathüllen den beschränkenden Faktor. Dadurch weisen flüssige Sorbentien eine 15-100 fache Wasseraufnahmekapazität auf als herkömmliche Feststoffsorbentien. Zusätzlich zeigen, wie in folgender Abbildung 7 ersichtlich, flüssige Sorbentien eine steigende Wasseraufnahmekapazität bei steigender relativer Luftfeuchte.

¹⁰ Patent US 6,960,243 B1: Production of drinking water from air; 2005

¹¹ Heise Artikel: <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/18/18425/1.html>

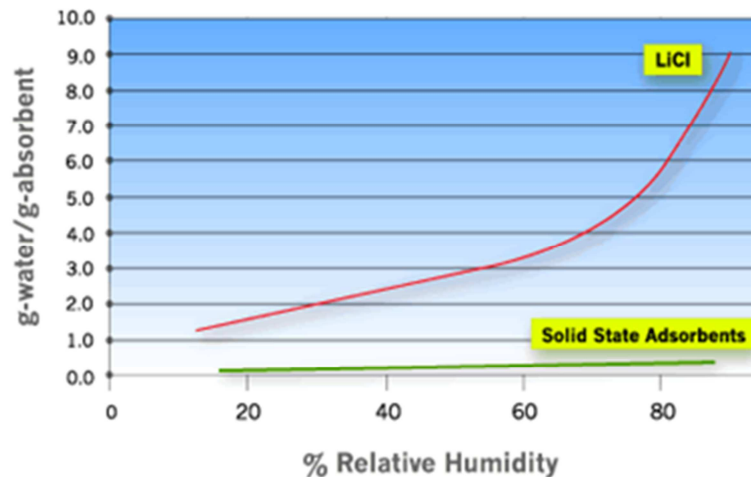


Abbildung 2.5 - Vergleich Wasseraufnahmekapazität von flüssigen und festen Sorbentien¹⁰

Zusätzlich wird bei der Verdünnung der Sorptionslösung die dabei entstehende Absorptionswärme in dieser gespeichert. Bei der anschließenden Desorption, welche meist durch thermische Verdampfung erfolgt, reduziert die gespeicherte, sensible Wärme in der Lösung den Energiebedarf, welche zum Aufheizen auf die entsprechende druck- und konzentrationsabhängige Verdampfungstemperatur benötigt wird.

Das von DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) geförderte Verfahren der Firma „Sciperio“ nutzt als hygroskopisches Sorptionsmittel eine LiCl / LiBr-Lösung. Eine genaue Anlagenbeschreibung des eigentlichen Sorptionsprozesses findet sich nicht. Die beteiligte Firma Sciperio schlägt einem Verdampfungs-Kondensations-Zyklus zur Wasserrückgewinnung vor, wobei keine Details bekannt sind. Auch hier finden sich keine detaillierten Informationen über das Verfahrenskonzept und Energiebedarf. Nach Sichtung aller öffentlich verfügbaren Informationen scheint es keine aktuellen Entwicklungen in dem Bereich zu geben.

Eine weitere Verfahrensvariante ist im US Patent: US 7,306,654 B2 - Method and apparatus for recovering water from atmospheric air, 2007 beschrieben. Dazu wird mittels eines Gebläses ein aktiver Luftstrom in der Absorptionskammer erzeugt. Die übersättigte LiCl-Lösung wird entweder im Gegenstrom oder Kreuzstrom zum erzeugten Luftstrom verrieselt. Dabei wird das Wasser der feuchten Luft in der LiCl-Lösung absorbiert und diese verdünnt. Die Trennung des Wassers erfolgt in einem thermischen Verdampfungsverfahren unter Vakuum. Eine kommerzielle Anwendung dieser Technologie konnte innerhalb der Recherche nicht ermittelt werden.

3 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Demonstration einer Technologie zur nachhaltigen, autarken Wassergewinnung aus Luftfeuchtigkeit für einen vorrangigen Einsatz in ariden und semiariden Gebieten. Es sollte gezeigt werden dass eine reine regenerative Energieversorgung realisiert werden kann. Zudem sollte die Technologie so konzipiert und ausgeführt werden, dass diese transportabel ist und innerhalb von einem kurzen Zeitraum (mehrere Tage) ab- und wieder aufgebaut werden kann. Dazu sollte die Technologie in (Standard-)Containern integriert werden, die einen einfachen Transport per LKW erlauben.

Das Grundprinzip der Technik beinhaltet zwei Teilprozesse: Die Absorption mittels eines flüssigen Sorbens und die Desorption durch Vakuumverdampfung. Das Grundprinzip ist in Abbildung 3.1 gezeigt und wird im Folgenden erklärt.

Im ersten Teilschritt, der *Absorption*, wird in der Luft befindliches Wasser von einem flüssigen, stark hygroskopischen Absorber (z.B. eine hoch konzentrierte Salzlösung) aufgenommen und somit in der Flüssigphase gebunden. Dabei ist es wichtig, dass die Absorberflüssigkeit eine große Grenzfläche zur Luft besitzt um viel Luftfeuchtigkeit schnell aufnehmen zu können. Dazu fließt es durch Gravitation getrieben langsam in z.B. turmförmigen Anlagenmodulen an einer Sorptionsstrecke mit großer benetzter Oberfläche herunter. Auf dem Weg nach unten nimmt das flüssige Absorbens Wasser auf und verdünnt sich so. Durch eine ideale Ausgestaltung der Sorptionsstrecke ist die Fließgeschwindigkeit relativ gering und somit die Kontaktzeit zwischen Luft und Absorber lang. Somit wird der Aufwand zum Pumpen des Absorbers minimiert.

Nach der Absorption muss das Wasser durch Abtrennung vom Absorbens, also durch *Desorption*, verfügbar gemacht werden. Dies erfolgt vorzugsweise in einer Verdampfungsanlage, für die verschiedene Ausführungen denkbar sind. Die einzusetzende Vakuumverdampfertechnologie basiert auf dem Prinzip der mehrstufigen Vakuumverdampfung und soll für die Projektzwecke angepasst werden. Dabei soll die Anzahl Pumpen minimiert werden indem die Prozessströme rein gravitativ zwischen den Stufen und zum Speicherbehälter fließen. D.h. es wird die Schwerkraft der am Verdampfer anfallenden Flüssigkeiten (Destillat, Konzentrat und Kühlwasserkreislauf) genutzt. Somit wird nur eine Pumpe zur Beschickung der Anlage nötig. Um diese Technologie effektiv einsetzen zu können, muss die Anlage erhöht aufgestellt sein, was durch eine Turmbauweise erreicht werden soll. Durch das Vakuum in der Anlage ist es möglich mit niedrigen Verdampfungstemperaturen zu arbeiten, was die einfachere Nutzung von Solarwärme oder Abwärme ermöglicht. Außerdem lässt sich die Wärme intern durch mehrere Druckstufen wiederverwerten, um so einen niedrigen spezifischen Energieverbrauch zu erreichen. Somit ist es möglich die Gesamtenergiebilanz der Anlage signifikant zu verringern.

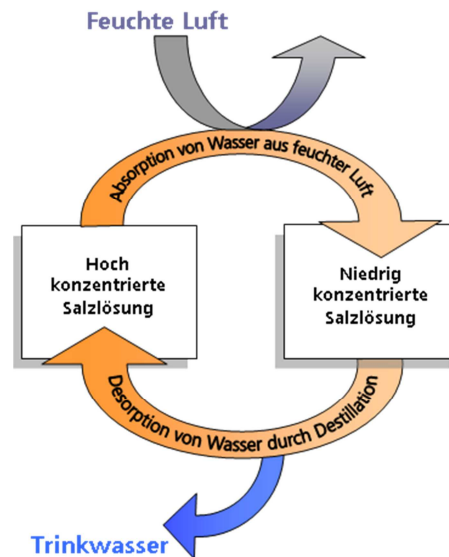


Abbildung 3.1 - Prinzip der Wassergewinnung aus Luft

Bei der Kombination der beiden Teilprozesse ergeben sich starke Synergien. Als elementares Grundprinzip werden beide Module in vertikaler Richtung, also beispielsweise als Turm, aufgebaut. Beide Prozesse zielen darauf ab eine hohe Energieeffizienz zu erreichen und die Nutzung von regenerativen Energien zu ermöglichen. Somit ist es möglich eine dezentrale, effiziente Stand-alone Technologie zur Wassererzeugung aus Luft zu entwickeln.

Die klare Aufgabenstellung des Projektes war es dieses bis zum Projektstart theoretisch beschriebene und in Teilaspekten im Labor-/Technikumsmaßstab erprobte, neuartige Konzept praktisch umzusetzen und zu testen. Dabei galt es eine Reihe von wissenschaftlichen und technischen Problemstellungen zu lösen um die gesteckten Ziele zu erreichen.

4 Ablauf des Gesamtvorhabens

Das Gesamtprojekt gliederte sich insgesamt in die folgenden drei Phasen:

- (1) Grundlagen, Vorarbeiten, Vorversuche
- (2) Planung und Detailkonstruktion der Gesamtanlage
- (3) Bau, Inbetriebnahme und Test

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten in diesen 3 Phasen beschrieben und das Vorgehen sowie die jeweiligen Ergebnisse und Erkenntnisse zusammengefasst.

4.1 Phase 1: Grundlagen, Vorarbeiten, Vorversuche

4.1.1 Systematische Auswahl und Bewertung Grundkonzepte

4.1.1.1 Absorption

Im Vorfeld der praktischen Arbeiten wurden gängige Möglichkeiten der Absorption auf ihre Vor- und Nachteile im Zusammenhang mit der geplanten Anwendung hin untersucht, um die geeignetsten unter ihnen zu identifizieren. Hierbei spielten die Anforderungen an die geplante Anlage eine große Rolle. Die folgende Tabelle 4.1 zeigt die betrachteten Möglichkeiten mit ihren relevanten Charakteristika.

Tabelle 4.1 - Auswahlmatrix für das Absorptionskonzept

			Energiebedarf	Entwicklungsaufwand	Kosten	Lösungsaustrag	Aufenthaltszeit	Austauschfläche	Druckverlust
seitlich offen	mit Einbauten	statisch	gering	gering	niedrig	offenes System	lang	groß	mittel
		beweglich	Stromerzeugung möglich	sehr hoch	mittel	offenes System	mittel	mittel	niedrig
seitlich geschlossen	mit Einbauten	statisch	Zwangsbelüftung erforderlich	gering	niedrig	unwahrscheinlich	lang	groß	mittel
		beweglich	Stromerzeugung evtl. möglich	sehr hoch	hoch	unwahrscheinlich	mittel	klein	mittel
	ohne Einbauten	Versprühen	Wasserdruck erf.	gering	niedrig	evtl. Demister erforderlich	kurz	sehr groß	niedrig
		Eindüsen	Hoher Luftdruck erf.	gering	mittel	nicht möglich	kurz	groß	sehr hoch
	sehr gut								
	gut								
	neutral								
	schlecht								
	sehr schlecht (K.O.)								

Es kristallisierten sich drei Ansätze heraus, die nachfolgend in Laboraufbauten getestet und bewertet wurden. Für die Vorversuche wurden nur Verfahrensoptionen ausgewählt, die bei allen Charakteristika keine „sehr schlechte“ Bewertung bekommen haben, was als K.O.-Kriterium definiert war (Tabelle → rote Felder). Die verbliebenen Varianten waren:

- seitlich offene Absorption mit unbewegten Einbauten
- seitlich geschlossene Absorption mit unbewegten Einbauten
- seitlich geschlossene Absorption ohne Einbauten und mit druckloser Verrieselung /Versprühung.

Die darauf folgenden Versuche (Kapitel 4.1.2) wurden bei unterschiedlichen, praxisorientierten Betriebszuständen durchgeführt. Die Verfahren konnten unter Berücksichtigung verfahrenstechnischer Aspekte miteinander verglichen und das geeignetste Verfahren identifiziert werden. Es ließ sich auch der Einfluss der Prozessgrößen auf die Absorptionsrate darstellen. Daraufhin erfolgte eine Abschätzung bezüglich der Dimensionierung der geplanten Versuchsanlage, um die gewünschte Menge Wasser zu absorbieren.

4.1.1.2 Desorption

Während der Anfangsphase des Projektes wurden anhand einer intensiven Recherche und zahlreichen Gesprächen mit Herstellern verschiedene Desorptionsverfahren auf ihre prinzipielle Eignung zur Eindickung hochkonzentrierter Absorberlösungen theoretisch untersucht. Anhand der Vorbetrachtungen, wurde Lithiumchlorid als Absorberlösung aufgrund der sehr hohen Hygroskopizität in den Mittelpunkt der Untersuchungen gestellt. Bei der Verfahrensauswahl für die Desorption wurden neben der Betrachtung verfahrenstechnischer Bedingungen auch Berechnungen hinsichtlich des zu erwartenden spezifischen, thermischen Energiebedarfs aufgestellt. Zusätzlich wurden mit Hilfe von unterschiedlichen Laboraufbauten die Eignung und Leistungsfähigkeit der in den theoretischen Untersuchungen als potentielle Verfahren eingestuft Technologien evaluiert (Kapitel 4.1.2.3).

Tabelle 4.2 – Auswahlmatrix für das Desorptionskonzept

	Energiebedarf		Anwendbar bei höheren Konzentrationen	Entwicklungsstand	Destillatqualität	Investitionskosten
	thermisch	elektrisch				
Umkehrosmose	-	gering (mittel@ hohe Konzentration)	nein - eingeschränkt	ausgereift	hoch	700-1500 €/m³/d
Membrandestillation	mittel - hoch	sehr gering	eingeschränkt	mittel	sehr hoch	~65.000 für 3m³/d
Elektrodialyse	-	gering – mittel (hoch@ hohe Konzentration)	nein	ausgereift	mittel - hoch	k.A. (hoch, weil technisch aufwendig)
Brüdenkompression	gering (TVC)	mittel (MVC)	eingeschränkt	ausgereift	sehr hoch	110.000 - 150.000 (V4A) 165.000 – 250.000 (Hastelloy) für 3m³/d
Vakuum-Wärmepumpen-Verdampfer	-	hoch - sehr hoch	eingeschränkt	ausgereift - mittel	sehr hoch	~100.000 (V4A) für 3m³/d
MED	mittel-hoch	sehr gering	eingeschränkt	ausgereift	sehr hoch	900-1250 €/m³/d
MSF	gering - mittel	sehr gering	eingeschränkt	ausgereift	sehr hoch	1000-1600 €/m³/d
Mehrstufige Verdampfung	hoch	kein -sehr gering	nein	Forschung - mittel	sehr hoch	k.A.
Mehrstufige Vakuumverdampfung	mittel- hoch	sehr gering	eingeschränkt	Forschung - mittel	sehr hoch	k.A.
Infrarotverdampfer	-	sehr hoch	ja	ausgereift	sehr hoch	k.A.

sehr gut	sehr gut
gut	gut
neutral	neutral
schlecht	schlecht
sehr schlecht	sehr schlecht

In einer Bewertungsmatrix wurden die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren gegenübergestellt und mittels Ausschlusskriterien (rot markierte Bereiche) eine erste Vorauswahl getroffen. Bei allen thermischen Verfahren ergeben sich zusätzlich, aufgrund der für eine Absorption innerhalb eines breiten klimatischen Spektrums benötigten hohen Massenfraktionen der Absorberlösung, grundlegende Einschränkungen in der Verfahrensgestaltung und damit thermischen Energieeffizienz. Grund hierfür ist die konzentrationsabhängige Differenz zwischen Siedetemperatur der Absorberlösung und Kondensationstemperatur des Wasserdampfes.

Nicht geeignete, nicht weiter betrachtete Verfahren:

Umkehrosmose (RO) / Elektrodialyse (ED): Für beide Verfahren sind die Konzentrationsbereiche zu hoch. Die RO würde Drücke von mehreren hundert bar benötigen, für die es keine Membranen gibt. Der extrem hohe elektrische Energiebedarf zur Bereitstellung des benötigten Transmembrandruckes bzw. der Feldstärke, schließt eine Wirtschaftlichkeit der beiden Verfahren aus.

Wärmepumpen-Verdampfer: Der elektrische Energiebedarf von Kompressionswärmepumpen liegt im Meerwasserbereich zwischen 0,12 und 0,2 kWh/l, bei höherer Aufkonzentrierung signifikant höher. Häufige Wartungsintervalle (Kältemittel) und hohe Kosten. Adsorptions-Wärmepumpen befinden sich noch in Entwicklung und kommen für die Anwendung nicht in Frage.

Mehrstufige Verdampfung (kein Vakuum): Die Siedetemperaturerhöhung der Absorberlösung kann ohne verschiedene Druckniveaus in den Stufen nicht kompensiert werden (hohe Temperaturen / hoher Energieverbrauch). Eine direkte Wärmerückgewinnung kann somit nur mittels Verdunstung stattfinden. Die geringe Kinetik im Vergleich zu einem Siedeprozess muss mit sehr großen Wärmetauscherflächen ausgeglichen werden (große Anlagendimensionen → hohe Investitionskosten). Aufgrund der Hygroskopizität der Lösung ist eine Sättigung und Auskondensierung der Luft in der Verdampferanlage sehr schwierig.

Brüdenkompression: Die Siedetemperaturerhöhung der Absorberlösung erfordert einen großen Arbeitsbereich der Kompressoren (hohe Investitionskosten). Ein stabiler Betrieb ist i.d.R. erst nach einer langen Einfahrphase mit niedrigeren Konzentrationsbereichen möglich. Schwankende LiCl-Konzentrationen aufgrund wechselnder Umgebungsbedingungen (Luftfeuchte und -temperatur) führen zu instabilem Betrieb. Der elektrische E-Bedarf wird aufgrund der hohen Differenztemperaturen am Kompressor weit über den für Meerwasser angegebenen 0,1 kWh/l liegen und ist maßgeblich von einem 24h-Betrieb abhängig.

Mehrstufige Entspannungsverdampfung (MSF): Bei der MSF, bei der die Kondensationsenthalpie des Dampfes vom Kühlwasserstrom aufgenommen wird, muss in Abhängigkeit der konzentrationsabhängigen Wärmekapazität des Rohwassers eine 11-13 fache Rohwassermenge (bezogen auf die Destillatproduktion) zur Kühlung zur Verfügung gestellt werden. Daraus ergibt sich eine unzureichende Aufkonzentrierung zwischen Zu- und Ablauf der Absorberlösung. Jedoch entfällt aufgrund dieser Prozessführung eine zusätzliche Kühleinrichtung. Der spezifische thermische Energiebedarf liegt bei einer theoretischen Betrachtung zwischen 0,15 und 0,45 kWh/l.

Prinzipiell geeignete, weiter verfolgte Verfahren:

Membrandestillation (insb. Multi Effekt Membran Destillation): Vorteile Kompaktheit, modularer Aufbau (Anzahl der Druckstufen und Produktionsleistung) und die vollständige Verwendung von Kunststoff (hohe chemische Beständigkeit, Kostengünstig, niedriges Gewicht). Die Prozesstemperaturen sind allerdings momentan auf maximal 80 – 100°C beschränkt und somit auch die Druckstufenzahl auf maximal 3 Stufen begrenzt. Laborversuche mit einer dreistufigen Membrandestillation der Firma MemSys sollten erste Erkenntnisse zur Anwendbarkeit liefern. Die durchgeführten Versuche sind in Kapitel 4.1.2.3.1 beschrieben.

Vielfacheffekt Destillation (MED) bzw. mehrstufige Vakuum-Verdampfung: Bei den thermischen Verfahren mit direkter Wärmerückgewinnung, d.h. die Kondensationsenthalpie des Wasserdampfes der Stufe n auf der einen Seite eines Wärmetauschers wird zur Verdampfung der Sole innerhalb der Stufe n+1 auf der anderen Wärmetauscherseite genutzt. Die maximal mögliche Stufenanzahl ist direkt von der Siedetemperatur der ersten und der Kondensationstemperatur in der letzten Stufe sowie dem Konzentrationsbereich der Absorberlösung abhängig. Soll der Prozess nur mit Unterdruck und gleichzeitig mit Kühltemperaturen nahe der Umgebungstemperatur betrieben werden, können wahrscheinlich 3-4 Prozessstufen realisiert werden.

Eine mathematische Modellierung einer dreistufigen Vakuum-Verdampfung ist in Kapitel 4.1.2.3.2 beschrieben.

4.1.2 Durchführung von Vorversuchen

4.1.2.1 Dampfdruckmessungen mit verschiedenen Salzlösungen

Um eine erste Vorauswahl an möglichen Absorptionsmitteln treffen zu können, wurde nach Stoffen mit hygroskopischer Wirkung gesucht. Außerdem wurde darauf geachtet, dass die Stoffe nicht gesundheitsschädlich oder umweltgefährdend sind und bei Kontakt mit Wasser und/oder Zufuhr von Wärme keine gefährlichen Nebenprodukte bilden. Insgesamt wurden 12 Stoffe untersucht, unter anderem Kaliumjodid, Eisen-III-Chlorid und Lithium Chlorid.

Für die Stoffe wurde in einem Versuch im Kleinmaßstab die Dampfdruckkurve mittels statischer Dampfdruckmessung bestimmt. Abbildung 4.1 zeigt den dafür verwendeten schematischen Versuchsaufbau.

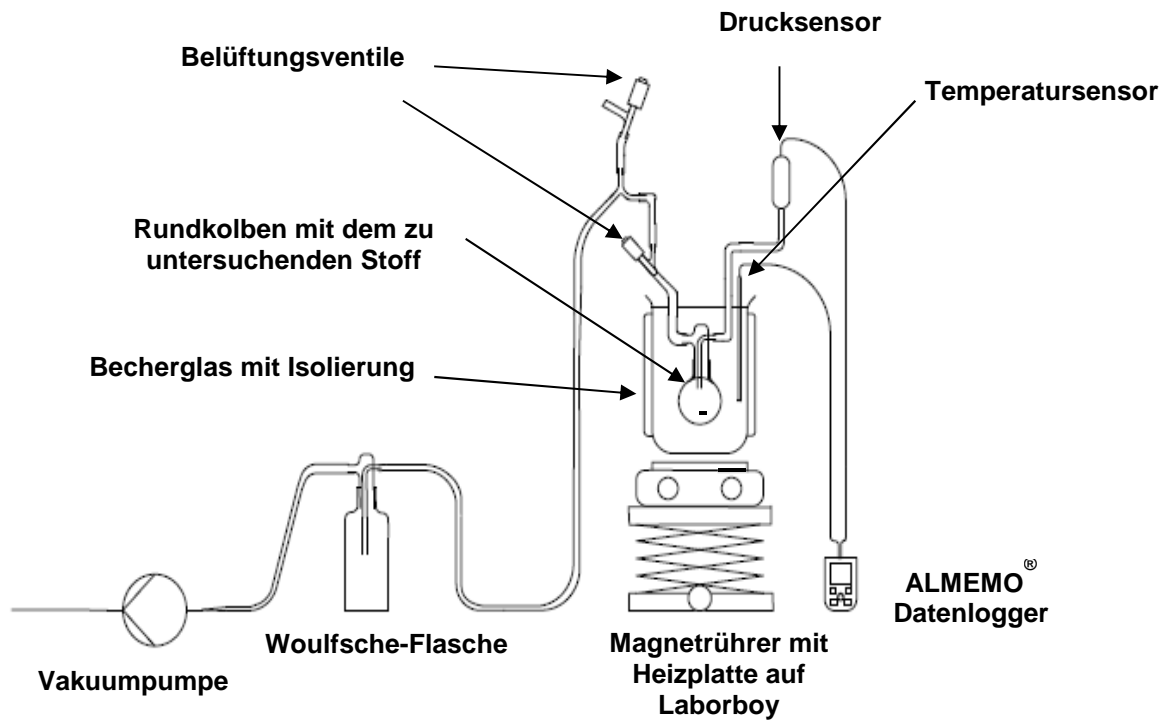


Abbildung 4.1 - Schematischer Versuchsaufbau der Dampfdruckmessung

Im Rundkolben befindet sich eine gesättigte Lösung des zu untersuchenden Stoffes unter Vakuum. Das Becherglas ist mit Leitungswasser gefüllt, welches zu Beginn des Versuchs eine möglichst niedrige Temperatur haben sollte. Nun wird das Wasser und somit auch die gesättigte Lösung langsam unter Rühren erwärmt und der Dampfdruck der gesättigten Lösung in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen. Dabei wird die Temperatur ungefähr in 10°C-Schritten erhöht und dann so lange konstant gehalten, bis auch der Dampfdruck einen konstanten Wert angenommen hat. Die Messung und Datenaufzeichnung erfolgt mit dem ALMEMO® 2590-S4 Datenlogger. Der Drucksensor ist ein Drucktransmitter von Huba-Control.

In Abbildung 4.2 ist der realisierte Versuchsaufbau zu sehen.



Abbildung 4.2 - Versuchsaufbau der Dampfdruckmessung

Um die Druckerniedrigung bzw. Druckdifferenz zwischen Salzlösung und reinem Wasser zu bewerten, wird folgende Berechnung verwendet:

$$\text{relativer Dampfdruck} = \frac{\text{Dampfdruck über der Salzlösung}}{\text{Dampfdruck von reinem Wasser}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Der relative Dampfdruck p_{rel} wird in Prozent angegeben. Vergleicht man die Werte des relativen Dampfdrucks von den untersuchten Salzlösungen untereinander, so kann man feststellen, welche Salze als Absorptionsmittel in Frage kommen.

Die Dampfdruckkurve von Wasser wurde mit Daten aus dem VDI-Wärmeatlas ermittelt, die Dampfdruckkurven der Salzlösungen sind die experimentell ermittelten Daten.

Abbildung 4.3 zeigt beispielhaft die ermittelte Dampfdruckkurve von LiCl im Vergleich zu reinem Wasser.

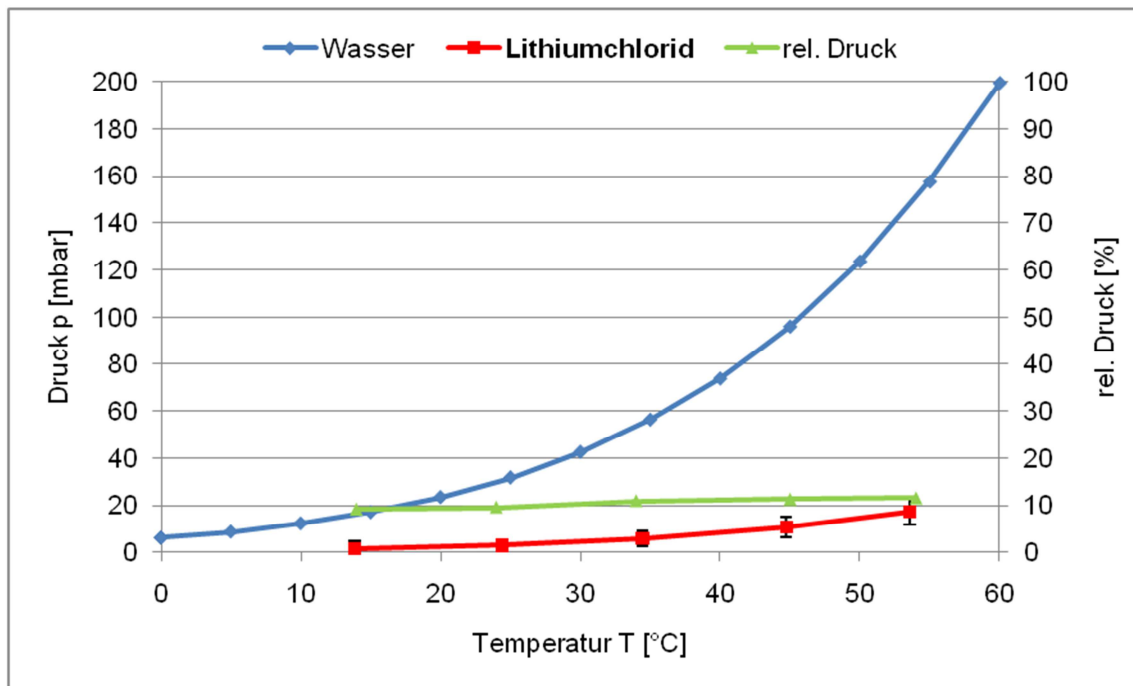


Abbildung 4.3 - Messergebnisse von Lithiumchlorid (gesättigt)

Basierend auf den Vorversuchen wurde Lithiumchlorid als geeignetes Sorptionsmittel identifiziert. Aufgrund des niedrigeren Dampfdrucks und der höheren Löslichkeit von Lithiumchlorid im Vergleich zu den anderen getesteten Stoffen wurde dieses als geeignetes Absorptionsmittel angesehen.

4.1.2.2 *Vorversuche zur Absorption*

Versuchsbeschreibung

Ziel war die Ermittlung der Absorptionsleistung in verschiedenen konfigurierten Absorptionskolonnen und unter veränderlichen Bedingungen. Bei den Versuchen werden die Ein- und Austrittsfeuchte (relativ) sowie Ein- und Austrittstemperaturen der Luft, die durch die Absorptionsanlage strömt gemessen, woraus sich die absolute Feuchte berechnen lässt. Durch die Differenz an Ein- und Ausgang der Anlagen kann die Masse an absorbiertem Wasser bestimmt werden.

Um die Versuche zu vergleichen, wird die akkumulierte absorbierte Masse Wasser nach 5 Minuten bestimmt, woraus sich der Absolutwert ergibt. Zusätzlich wird dieser auf den eingestellten Durchfluss der LiCl-Lösung bezogen um einen Relativwert zu erhalten.

Die bei den Versuchen veränderlichen Betriebsparameter und ihre Wertebereiche sind Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Tabelle 4.3 - Versuchsparameter Absorption

	min	max
Temperatur Luft & Absorberlösung in °C	25	40
Absolute Luftfeuchte in g/m ³	7,0	12,0
Massenfraktion LiCl-Lösung	0,28	0,42
Volumenstrom Luft m ³ /h	390	
Volumenstrom Lösung l/h	15 - 46 (Düse) bzw. 50 (Füllkörper)	

Für jede Temperatur wurden 4-5 Versuche durchgeführt, wobei die Temperatur in 5°C-Schritten erhöht wurde. Die Sole wird temperiert, da davon ausgegangen wird, dass diese in einer realen Anwendung gleiche bzw. ähnliche Temperaturen wie die Luft aufweisen würde.

Anlagenbeschreibung (ausgewählte Verfahrensoptionen)

Aufbau 1 – Gegenstrom mit unbewegten Einbauten

Der Reaktor der Gegenstromanlage besteht aus einer Kolonne aus Plexiglas, mit der Höhe von 1,5 m und einem Durchmesser von 0,5 m und ist mit oberflächenvergrößernden Einbauten gefüllt. Die Luft wird mithilfe eines Radialgebläses von unten in den Reaktor eingeleitet. An der Saugseite des Gebläses befinden sich der Luftbefeuchter und der Luftherhitzer, welche die Luft vorkonditionieren. Am Lufteintritt der Kolonne ist ein Spritzdeckel angebracht, welcher dafür sorgt, dass die Lösung aus dem Reaktor nicht in den Luftschlauch gelangen kann. Die Volumenstrommessung der Luft erfolgt über eine Venturidüse, die vor dem Lufteintritt in die Kolonne positioniert ist. Am Austritt des Reaktors ist ein Demister installiert, um zu gewährleisten, dass keine Tropfen der Salzlösung aus dem Reaktor in die Umgebung ausgetragen werden. Abbildung 4.4 zeigt den Laboraufbau.

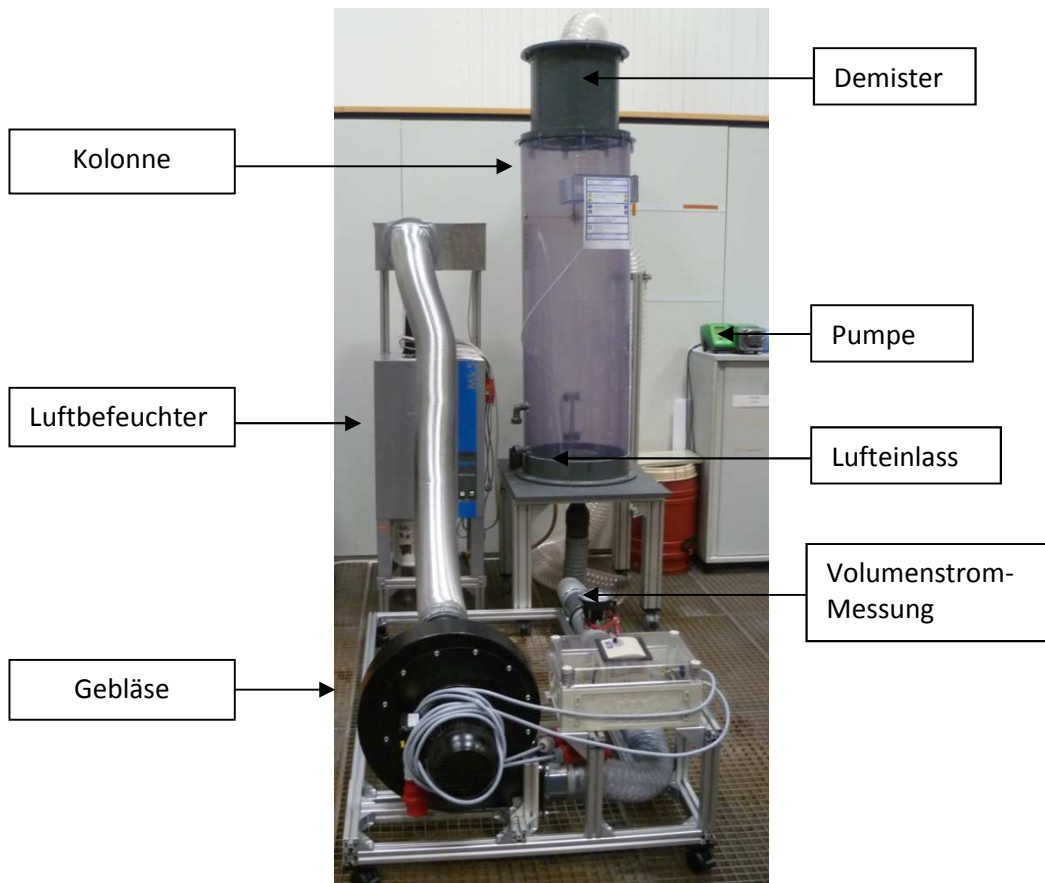


Abbildung 4.4 - Versuchsaufbau Absorptionskolonne

Die konzentrierte Salzlösung wird von oben über Verteilersysteme gleichmäßig auf den Sorptionsoberflächen verteilt. Am Lufteintritt sowie dem Luftaustritt sind Feuchtesensoren angebracht über welche die Luftfeuchtigkeit gemessen werden kann.

Aufbau 2 – Kreuzstrom mit Absorptionsstrecken

Die Anlage wird mit einem Verrieselungskörper versehen, die das gleiche Volumen und die gleiche Querschnittsfläche aufweist, wie die Einbauten in Anlage 1, um bestmögliche Vergleichbarkeit der Systeme zu erreichen. Die feuchte Luft wird vorkonditioniert und über ein Verteilersystem gleichmäßig von vorne auf den Verrieselungskörper geleitet. Um eine möglichst gleichmäßige Anströmung zu gewährleisten ist der Luftstrom zweimal mit einem Y-Verteiler aufgespalten worden. Zusätzlich soll der Abstand zwischen den 4 Anströmöffnungen und der eigentlichen Absorptionsstrecke eine bestmögliche Luftverteilung ermöglichen. Die konzentrierte Salzlösung wird durch den Schlauchverteiler möglichst gleichmäßig von oben auf den Verrieselungsstrecke verteilt. Hierzu wurde im Deckel der Anlage ein sich selbstüberlagerndes, sechseckiges Lochbild erstellt, welches einen konstanten Abstand zwischen allen Schlauchenden ermöglicht, Hinter dem Verrieselungskörper verhindert ein Tropfenabscheider einen Austrag des Absorptionsmediums zu verhindern. Seitlich ist der Aufbau mit durchsichtigen Polycarbonatscheiben verschlossen, um eine Prozessbeobachtung zu gewährleisten.

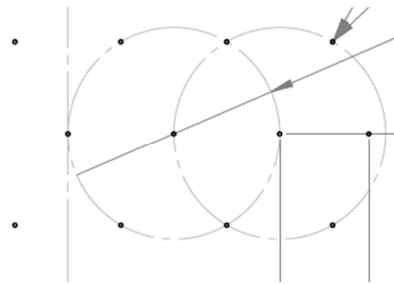


Abbildung 4.5 - Versuchsaufbau Kreuzstromabsorption

Aufbau 3 – Versprühen durch Düse im Gegenstrom

Die Basis der Versuche bildet der Laboraufbau aus Anlage 1. Die Einbauten und der Schlauchverteiler wurden entnommen. In das leere Reaktorrohr wird mittig eine Düse nahe unterhalb des Tropfenabscheiders platziert. Weitere, mit Stopfen verschlossene Bohrungen ermöglichen eine Änderung der Düsenposition. Die vorkonditionierte Luft gelangt von unten in den Reaktor, die konzentrierte Lösung wird von oben eingesprüht. Die Durchflussmenge musste entgegen der ersten beiden Versuchsaufbauten reduziert werden, da Düsen mit gleichem Volumenstrom einen zu großen Sprühkegel und eine ungünstige Tropfengrößenverteilung aufwiesen. Abbildung 4.6 zeigt die eingebaute Düse.

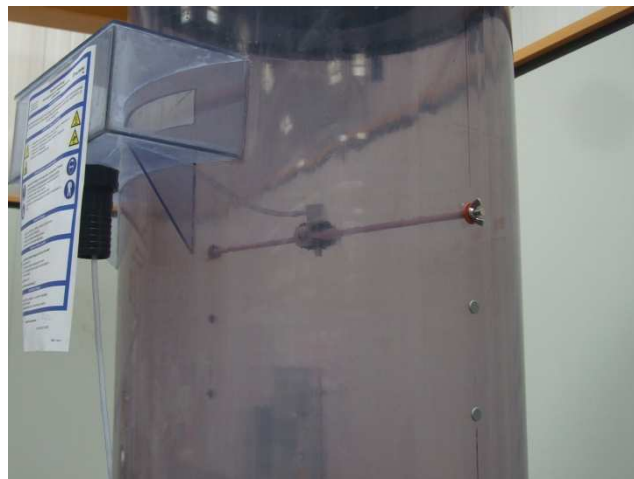


Abbildung 4.6 - Düsenposition bei Gegenstromabsorption

Ergebnisse

In den Versuchen konnte gezeigt werden, dass eine Wasserabsorption am besten bei den beiden Gegenstromverfahren funktioniert, wobei das Versprühen die besten relativen Ergebnisse erzielte. Das Kreuzstromverfahren zeigte geringere Absorptionsraten.

Sensibilität bezüglich der Betriebsparameter

Hinsichtlich steigender Temperaturen lässt sich eine stetige Abnahme der Absorptionsrate feststellen. Dies lässt sich durch den exponentiellen Zusammenhang zwischen Temperatur und Dampfdruck der Lösungen erklären. Bei niedrigeren Temperaturen (ca. 15°C) kann somit eine erhöhte Sorptionsrate angenommen werden.

Bei einigen Versuchen waren die Eingangskonzentrationen zu niedrig um Wasser zu absorbieren. Hier findet effektiv eine Desorption statt. Dies tritt hauptsächlich bei Massenfraktionen unter 0,3 auf.

Bezüglich der absoluten Feuchte der Luft lässt sich nachweisen, dass selbst bei den untersuchten Minimalwerten der absoluten Feuchte eine praktikable Entfeuchtung möglich ist. Die Untergrenze der Konzentration wird hierbei angehoben.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Aufenthaltszeit der LiCl-Lösung im Reaktor in den Versuchen der limitierende Faktor war. Aus den Konzentrationsmessungen der Austrittslösungen lässt sich zeigen, dass die Lösungen noch nicht vollständig mit Wasser gesättigt sind. Es besteht also noch Potential Wasser aufzunehmen.

Fazit

Aus den Versuchen lässt sich abschließend folgern, dass eine Anlage mit Einbauten im Gegenstrombetrieb am aussichtsreichsten erscheint. Gemäß der getroffenen Auslegung, ist die Aufenthaltszeit der Luft im Reaktor der Testanlage identisch mit der der Versuchsanlage. Allerdings ist eine fünffach höhere Absorptionsstrecke geplant. Dies bedeutet, dass die LiCl-Lösung eine deutlich längere Aufenthaltszeit haben wird. Da die Austrittslösungen bei den Versuchen wie erwähnt nicht gesättigt sind, kann mit einer deutlich größeren absorbierten Masse Wasser gerechnet werden.

Die Ergebnisse bezüglich des Temperatureinflusses sprechen für einen Tag/Nacht-Betrieb. Unter der Annahme, dass die absolute Feuchtigkeit im Tagesverlauf in etwa konstant bleibt, wirkt sich ein niedriger Dampfdruck der Lösung positiv auf die Sorptionsrate aus. Dies erfordert allerdings Kapazitäten zur Speicherung der verdünnten Lösung, um sie unter Tags der Desorption zuzuführen.

Es wurde gezeigt, dass selbst bei einer absoluten Feuchte von 7 g/m³ konzentrierte LiCl-Lösung zur Entfeuchtung eingesetzt werden kann.

4.1.2.3 Vorversuche zur Desorption

4.1.2.3.1 Vorversuche zur Membrandestillation

Aufbau des Moduls

Für die Vorversuche wurden Membrandestillationsmodule der Firma memsys GmbH verwendet. Der mehrstufig gestaltete Prozess ermöglicht eine interne Rückgewinnung der Wärme zwischen den einzelnen Stufen, indem beim Auskondensieren des produzierten

Dampfes die latente Wärme zur Verdampfung des Zulaufs in der nächsten Stufe genutzt wird.

Die zu Testzwecken verwendete dreistufige Anlage besteht aus einem Heizmodul, den eigentlichen drei Verdampfer-/Kondensatorstufen und einem Kühlmodul. Jedes der fünf Module ist gleich aufgebaut und besteht aus einem Verbund von Rahmen. Die Rahmen werden beidseitig entweder mit Folien zur Wärmeübertragung oder mit Membrane zur Stoffübertragung (Dampf) bespannt. Die Anzahl der Rahmen je Modulstufe wird abhängig der geforderten Leistungsfähigkeit bzw. Produktionsrate zusammengestellt. Konstruktiv bedingt wird dabei immer eine ungerade Anzahl von Rahmen verwendet, wobei immer ein Folienrahmen mehr verbaut wird. Zwischen den bespannten Rahmen wird ein Leerahmen eingebaut, um den benötigten Raum für die Stoffströme zu erhalten.

Jeder bespannte Rahmen hat eine Folien- bzw. Membranfläche von 0,32 m². Die Rahmenanzahl bestimmt dabei die absolute Fläche für den Wärmeaustausch (Folienfläche) und Stofftransport (Membranfläche). Die verwendete Rahmenanzahl pro Modul hat keinen Einfluss auf den Energieverbrauch. Dieser wird allein durch die Anzahl der Module (Druckstufen) bestimmt.

Die Membran ist eine handelsübliche PTFE - Membran mit einem Porendurchmesser von 0,2 µm und einem Kontaktwinkel von 130°.

Die Beschränkung der maximalen Betriebstemperatur von ≈80°C begründet sich mit der Verwendung von PP bei den Modulrahmen, Deckplatten und Wärmetauscherfolien.

Aufbau der Gesamtanlage

Bei den Vorversuchen wurden 4 Folienrahmen und 3 Membranrahmen verwendet. Hierdurch ergibt sich pro Modul eine aktive Membranfläche von 0,96 m², und in den Stufen zusammen eine Fläche von 2,88 m². Auch im Verdampfer wurden 3 Membranrahmen verwendet.

Die MD-Module sind integriert in eine Gesamtanlage die zusätzlich noch alle nötigen Module wie Speicherbehälter, Leitungen, Ventile, Heizaggregat, Vakuumpumpe, etc. enthält (Abbildung 4.7).

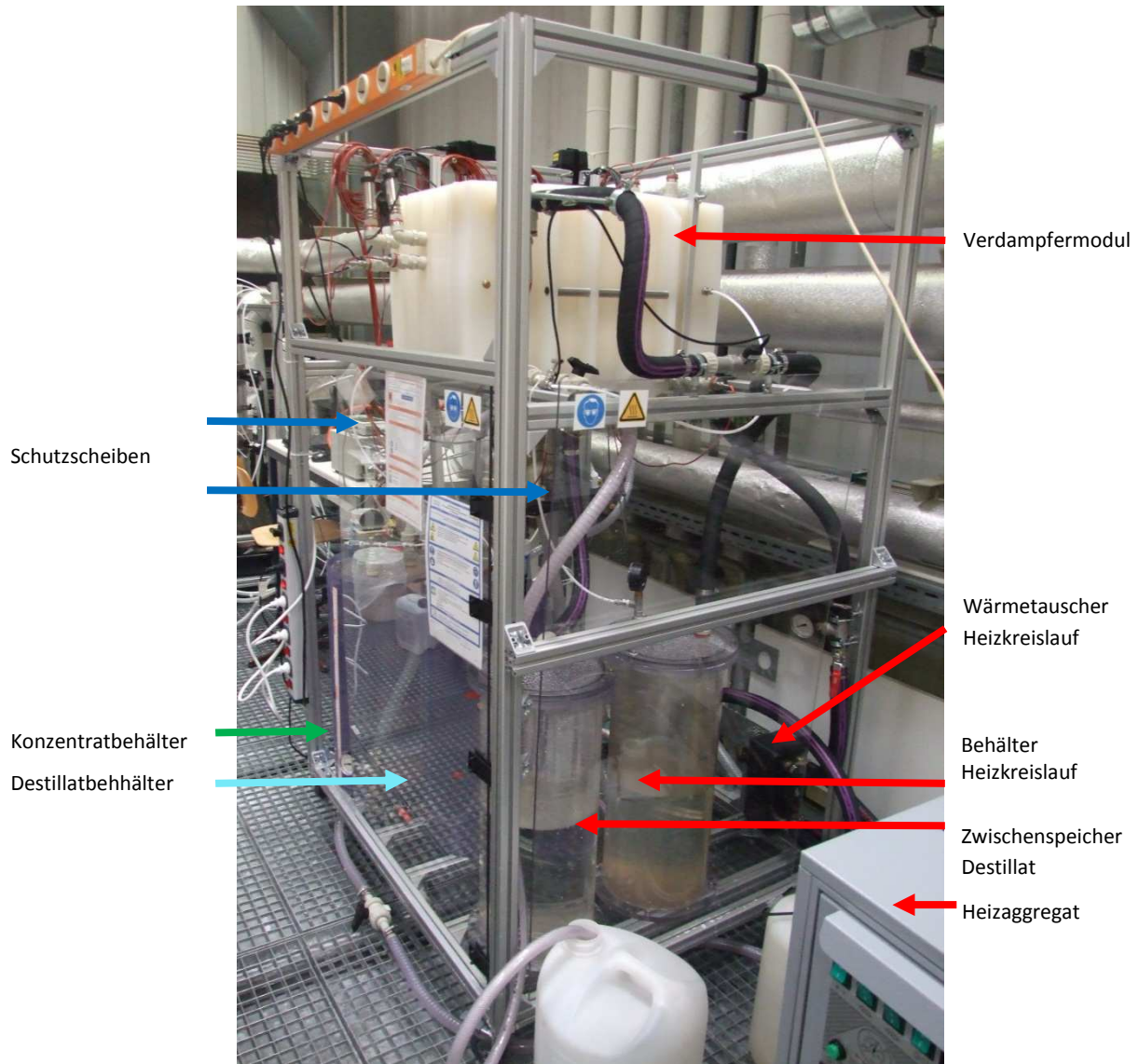


Abbildung 4.7 - Seitenansicht Aufbau der Gesamtanlage

Das Wasser des Heiz- und Kühlkreislauf wird jeweils mit einer Kreiselpumpe umgewälzt. Der Wärmetauscher des Heizkreislaufs ist verbunden mit einem externen Kreislauf, welcher von einem Heizaggregat erwärmt wird. Das Heizaggregat ist manuell auf eine Soll-Temperatur einstellbar.

An den Wärmetauscher des Kühlkreislaufes ist der hausinterne Kühlkreislauf angeschlossen, aus diesem Grund ist die Temperatur hier nur begrenzt regelbar. Die Evakuierung des Systems erfolgt mit einer Vakuumpumpe. Die Sole wird im Betrieb aufgrund des Unterdrucks in die Anlage gesaugt und durch den von Stufe zu Stufe kleiner werdenden Druck gelangt die Sole bis in den Konzentratspeicherbehälter.

Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die ersten Versuche erfolgten mit Wasser und unterschiedlichen Konzentrationen einer Natriumchloridlösung. Im Anschluss sollen Versuche mit Lithiumchlorid durchgeführt werden, für die bereits eine statistische Versuchsplanung erstellt wurde, welche allerdings wie

nachfolgend beschrieben nicht durchgeführt werden konnte. Der Sinn der Versuchsplanung war die numerisch basierte Optimierung der Betriebsparameter unter den variierbaren Versuchsparametern Salzgehalt der Lösung, Temperatur der Sole sowie Temperatur des Kühlkreislaufs.

Der Betrieb der Versuchsanlage erfolgte folgendermaßen: Der Heiz- und der Kühlkreislauf werden gestartet sowie das Heizaggregat und der Kühlkreislauf eingeschaltet. Die Anlage wird evakuiert, und das Soleventil bei einem geringen Volumenstrom geöffnet. Es stellen sich auf Grund der unterschiedlichen Temperaturen automatisch unterschiedliche Drücke in den Stufen ein. Sobald die gewünschte Heiztemperatur erreicht ist, kann der eigentliche Versuch beginnen. Hierfür wird der Solevolumenstrom erhöht.

Erste Versuche wurden erfolgreich mit Wasser durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Anlage erwartungsgemäß funktioniert. Als nächstes wurden Versuche mit unterschiedlich konzentrierten Natriumchloridlösungen (0,03 – 0,26 m%) durchgeführt. Diese Versuche sollen zeigen, wie die Dampfdruckerniedrigung den Prozess beeinflusst (bei NaCl relativ gering, aber vorhanden) und die Reinheit des Destillats verifizieren. Die Messung des Salzgehaltes erfolgte gravimetrisch sowie durch Messung der Leitfähigkeit.

Die folgende Abbildung 4.8 zeigt exemplarisch einen kurzen Versuchsverlauf mit einer NaCl Lösung. Es ist deutlich zu sehen, dass sich die unterschiedlichen Drücke und Temperaturen in den einzelnen Stufen schnell ausbilden. Diese sind nötig um den Verdampfungsprozess mit prozessinterner Energierückgewinnung zu ermöglichen und die Prozessflüssigkeiten durch die Anlage fließen zu lassen. Grundsätzlich zeigte sich bei den Vorversuchen, dass der Betrieb sehr gut funktionierte.

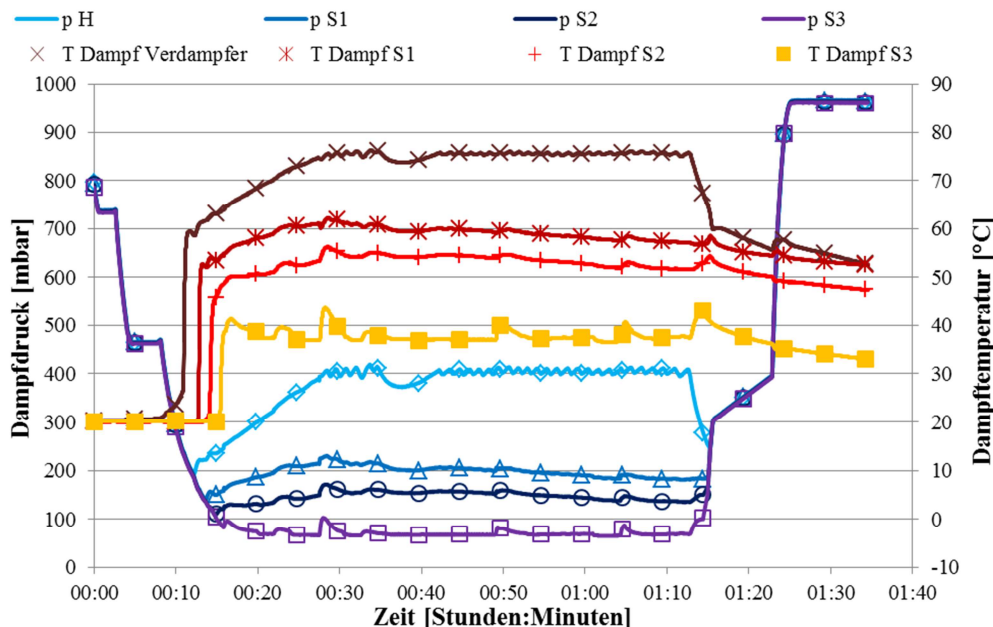


Abbildung 4.8 - Temperatur- und Druckverläufe bei NaCl-Kurzversuch

Im Laufe der Versuche mit NaCl wurde allerdings festgestellt, dass die Module anfangs sehr kleine Leckagen zwischen Sole- und Destillatkammer aufwiesen, die im Laufe der Zeit größer wurden. Da die Module komplett verschweißt sind und die Leckagen sehr klein waren war eine Lokalisierung nicht möglich. Letztendlich erbrachte die die Prüfung des Herstellers

Fertigungsfehler, die zu den Leckagen führten (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Daraufhin wurden die Module ausgetauscht. Auch die neuen Module wiesen nach einigen Versuchstagen wieder Defekte auf. Da der ganze Prozess sich über mehrere Monate hinzog mussten die Versuche im Projektkontext schließlich abgebrochen werden, da es nicht absehbar war, dass die technischen Probleme seitens des Herstellers schnell lösbar sind.

Die durchgeführten Versuche wurden dennoch ausgewertet und anhand der errechneten Leckagerate soweit möglich berichtet. Der spezifische Energieverbrauch bei der Verwendung von NaCl lag bei 0,3 bis 0,6 kWh/l. Das Anfahrverhalten sowie der Membranflux zeigten gute Eigenschaften, wobei wie bereits erwähnt keine Versuche mit LiCl gemacht werden konnten. Die Temperaturspreizung zwischen den Stufen ist zwar relativ gering, es musste aber festgestellt werden, dass der 3-stufige Betrieb mit LiCl nur in relativ niedrigen Konzentrationsbereichen möglich wäre. Der Grund dafür ist die Limitierung der Temperatur in der ersten Stufe durch das verwendete Polypropylen, wodurch der Einsatzbereich auf maximal 80°C beschränkt ist. Nach Angaben des Herstellers ist zukünftig auch die Verwendung anderer Rahmenkunststoffe für höhere Temperaturen möglich. Daher wird die Technologie nach wie vor als interessant für die Anwendung der Aufkonzentrierung von Salzsolen angesehen, auch wenn sie nicht mehr im Projektkontext zum Einsatz kam.

4.1.2.3.2 Vorversuche zur mehrstufigen Vakuumverdampfung

Als eine der Optionen für die Trennung des Wassers von der Salzlösung in der WaLu Technologie (Desorption) wurde in der vorherigen systematischen Technologiebewertung die mehrstufige Vakuumverdampfung identifiziert (siehe Kapitel 4.1.1.2). Dazu wurden im Rahmen des Projektes Vorversuche durchgeführt.

Prinzipieller Aufbau der Vakuumverdampfungsanlage

Abbildung 4.9 zeigt den prinzipiellen Aufbau der mehrstufigen Vakuumverdampfungsanlage. Die Anlage besteht aus drei übereinanderliegenden Stufen, welche jeweils durch einen Wärmetauscher (orange) räumlich voneinander getrennt sind. Jede Stufe besitzt einen Kondensatsammler (blau), auf dem sich ein Deckel befindet, welcher das Zurücktropfen des entstehenden Kondensats in den Verdampferraum verhindert. Unterhalb des Kondensatsammlers ist ein Demister (Tröpfchenabscheider) eingebaut, um vorzubeugen, dass eventuell hochsitzende Salzlösung in den Kondensatsammler gelangt. In der ersten Stufe befindet sich ein Wärmetauscher der von einer Flüssigkeit, welche in einem Heizthermostat geheizt wird, durchströmt wird. In der dritten Stufe befindet sich ebenfalls ein Wärmetauscher durch den eine Flüssigkeit strömt, welche jedoch in einem Kühlthermostat gekühlt wird. Die Stoffströme sind in Abbildung 4.9 zu sehen. Hierbei stellen die orangen Linien die Salzlösung und die blauen Linien das gewonnene Kondensat dar. Jede Stufe kann unabhängig voneinander evakuiert oder belüftet werden.

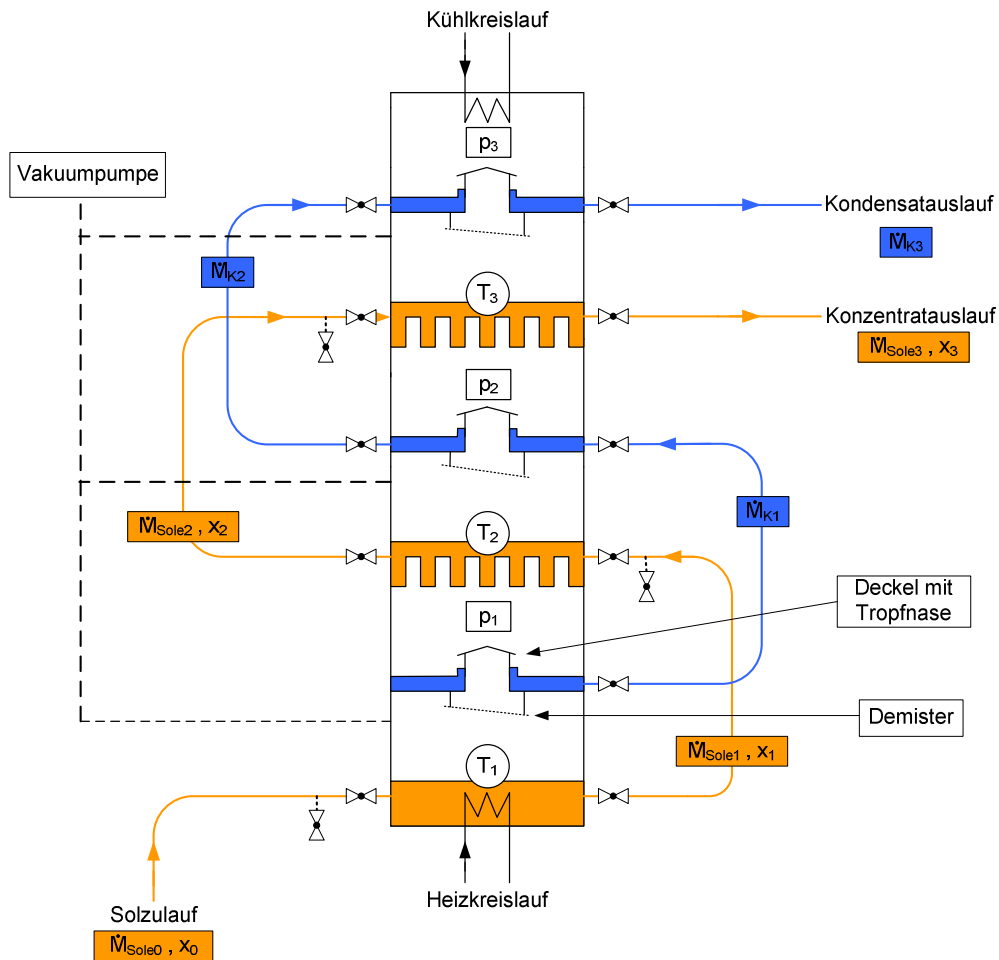


Abbildung 4.9 - Prinzipieller Aufbau der dreistufigen Vakuumverdampfungsanlage

(p:Druck / T:Temperatur der Salzlösung / M: Massenstrom / x Massenanteil gelöstes Salz)

Betrieb der Vakuumverdampfungsanlage

Die in diesem Kapitel beschriebenen Prinzipien gelten sowohl für den Versuchsaufbau als auch für die spätere Versuchsanlage, die im Demonstrator integriert wurde.

Verdünnte Salzlösung $\dot{M}_{\text{Sole}0}$ mit dem Massenanteil x_0 des gelösten Salzes wird der Anlage in Stufe 1 zugeführt. Durch den in der ersten Stufe befindlichen Heizkreislauf wird diese Salzlösung erwärmt und zum Sieden gebracht. Sobald die Siedetemperatur T_s der Salzlösung erreicht ist, beginnt der Verdampfungsvorgang. Hierbei verdampft nur das Wasser, da der Siedepunkt der Salzlösung bei gleichbleibendem Druck wesentlich höher ist als der Siedepunkt des reinen Wassers. Wasserdampf steigt auf, kondensiert am und in den Rohren des Wärmetauschers und tropft als flüssiges Wasser in den Kondensatsammler der Stufe 1.

Die Salzlösung der Stufe 1 wird so durch die Desorption des Wassers aufkonzentriert. Die nach der ersten Stufe aufkonzentrierte Salzlösung $\dot{M}_{\text{Sole}1}$ mit x_1 und das entstandene Kondensat \dot{M}_{k1} fließen aufgrund des Druckunterschiedes (siehe Abbildung 5.2) in die

darüber liegende Stufe 2. Bei der Kondensation des Wasserdampfes am Wärmetauscher gibt der Wasserdampf seine bei der Kondensation freiwerdende Wärme an den Wärmetauscher ab. Diese Wärme genügt um die in Stufe 2 befindliche Salzlösung bei Druck p_2 zum Sieden zu bringen. Analog zur ersten Stufe kommt es zur Verdampfung und Kondensation des Wassers und somit zur Aufkonzentrierung der Salzlösung in Stufe 2 und Stufe 3, so dass gilt: $x_0 < x_1 < x_2 < x_3$. In Stufe 3 kondensiert der Wasserdampf an einem Kühlwellrohr. Das in jeder Stufe gebildete Kondensat \dot{M}_{K1} , \dot{M}_{K2} und \dot{M}_{K3} wird nach der dritten Stufe aus der Anlage geführt und in einem Speicherbehälter gesammelt. Die in jeder Stufe aufkonzentrierte Salzlösung \dot{M}_{Sole1} mit x_1 , \dot{M}_{Sole2} mit x_2 und \dot{M}_{Sole3} mit x_3 wird nach der dritten Stufe aus der Anlage geführt, in einem Speicherbehälter gesammelt und kann dem Absorptionsprozess als hochkonzentrierte Salzlösung wieder zugeführt werden, wodurch der Kreislauf geschlossen wird.

Dieser Prozess ist nur möglich, wenn die von Stufe zu Stufe aufkonzentrierte Salzlösung sowie das in jeder Stufe gebildete Kondensat in die darüber liegende Stufe fließen.

Dies kann grundsätzlich nur dann der Fall sein, wenn die Betriebsdrücke, dem Grobvakuum zuzuordnen sind, in der Anlage von Stufe 1 nach Stufe 3 hin abnehmen und somit gilt:

$$p_{\text{atm}} > p_1 > p_2 > p_3$$

Prozessbedingungen der Vakuumverdampfungsanlage

Damit es zur Kondensation des Wasserdampfes an den Wärmetauschern kommt, muss die Siedetemperatur der Salzlösung T_{Sn+1} der Stufe n+1 bei Druck p_{n+1} geringer sein, als die Kondensationstemperatur von reinem Wasser $T_{H_2O,n}^K$ in Stufe n beim Druck p_n (T_{Sn+1} bei $p_{n+1} < T_{H_2O,n}^K$ bei p_n). Ist dies nicht der Fall, so kommt zu keiner Abkühlung des Wasserdampfes und dementsprechend auch zu keiner Kondensation des Wasserdampfes an den Wärmetauschern. Somit erfolgt auch kein Energieübertrag durch die Wärmetauscher an die Stufe n+1. Es kann kein Kondensat gewonnen werden und der Prozess würde zum Erliegen kommen. In Tabelle 4.4 ist diese Bedingung veranschaulicht.

Tabelle 4.4 - Voraussetzung zur Kondensation des Wasserdampfes am Wärmetauscher

p_1	T_1	$T_{H_2O,1}^K > T_2$
p_2	T_2	$T_{H_2O,2}^K > T_3$
p_3	T_3	$T_{H_2O,3}^K > T_{\text{Kühltemp.}}$

Unter Einhaltung dieser Bedingung und der Bedingung, dass die Drücke von Stufe 1 nach Stufe 3 hin abnehmen, sind die Drücke p_1 bis p_3 theoretisch frei wählbar. Der Druck in den Stufen 2 und 3 hängt jedoch mit dem Druck von Stufe 1 zusammen. Die Drücke die sich in der Anlage einstellen sind wiederum von den Anlagenspezifischen Bedingungen im Betrieb abhängig (Heiztemperatur, Wärmetauscheroberflächen, Salzkonzentrationen, Kühlleistung, Durchflussmengen, etc.).

Abhängig vom eingestellten Druck der ersten Stufe mit der dazugehörigen Siede- bzw. Verdampfungstemperatur T_{S1} der Salzlösung ergibt sich für die Stufe 2 ein maximal

möglicher Druck p_2 , so dass die Siede- bzw. Verdampfungstemperatur T_{S2} der Salzlösung der Stufe 2 geringer ist als die Kondensationstemperatur $T_{H_2O,1}^K$ von reinem Wasser in Stufe 1. Damit es bei realen Anlagen auch tatsächlich zur Kondensation kommt, sollte noch ein minimaler Temperaturunterschied von ca. 5 bis 10 °C zwischen der Siedetemperatur T_{Sn+1} der Stufe n+1 und der Kondensationstemperatur $T_{H_2O,n}^K$ der Stufe n vorhanden sein. Analog ergibt sich ein maximal möglicher Druck in Stufe 3. Evakuiert man beim Anfahren der Anlage also die erste Stufe und stellt einen gewünschten Druck p_1 in Stufe 1 ein, so stellen sich die Drücke in Stufe 2 und 3 weitestgehend selbst ein. Im Betrieb wiederum stellt sich der Druck in der 1.Stufe anhand der zur Verfügung gestellten Heizleitung, Temperatur und Wärmeabfuhr über den Wärmetauscher zur 2ten Stufe ein und kann somit auch beeinflusst werden. Durch die angeschlossene Vakuumpumpe können im Versuch die selbst eingestellten Drücke so reguliert werden, dass auch unterschiedliche Druckverhältnisse erprobt werden können.

Die in der Anlage benötigte Heiz- und Kühlleistung lässt sich mit den Heiz- und Kühleinlauftemperaturen, den Heiz- und Kühlauslauftemperaturen sowie den Massenströmen vom Heiz- und Kühlkreislauf bestimmen. Somit ergeben sich für die Heiz- und Kühlleistung folgende Gleichungen:

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = \dot{M}_{\text{Heiz}} \cdot c_{p, \text{Heizmedium}} \cdot (T_{\text{Heiz, ein}} - T_{\text{Heiz, aus}}) \quad (4.2)$$

$$\dot{Q}_{\text{Kühl}} = \dot{M}_{\text{Kühl}} \cdot c_{p, \text{Kühlmedium}} \cdot (T_{\text{Kühl, aus}} - T_{\text{Kühl, ein}}) \quad (4.3)$$

\dot{Q}_{Heiz} : notwendige Heizleistung	[J/h]
$\dot{Q}_{\text{Kühl}}$: notwendige Kühlleistung	[J/h]
\dot{M}_{Heiz} : Massenstrom des Heizkreislaufs	[kg/h]
$\dot{M}_{\text{Kühl}}$: Massenstrom des Kühlkreislaufs	[kg/h]
$c_{p, \text{Heizmedium}}$: spezifische Wärmekapazität vom Heizmedium	[J/kg·K]
$c_{p, \text{Kühlmedium}}$: spezifische Wärmekapazität vom Kühlmedium	[J/kg·K]
$T_{\text{Kühl, ein}}$: Einlauftemperatur des Kühlkreislaufs	[K]
$T_{\text{Kühl, aus}}$: Auslauftemperatur des Kühlkreislaufs	[K]
$T_{\text{Heiz, ein}}$: Einlauftemperatur des Heizkreislaufs	[K]
$T_{\text{Heiz, aus}}$: Auslauftemperatur des Heizkreislaufs	[K]

Das Ziel des Desorptionsprozesses ist es möglichst viel Wasser zu gewinnen und die verdünnte Salzlösung möglichst stark aufzukonzentrieren um eine möglichst hohe Hygroskopizität für die Absorption zu erreichen. Jedoch muss darauf geachtet werden, dass die Aufkonzentrierung durch die Löslichkeitsgrenze des gelösten Salzes begrenzt ist, damit es beim Abkühlen der Salzlösung nicht zum Ausfällen des gelösten Salzes kommt.

Der gesamte Desorptionsprozess und somit auch der Aufkonzentrierungsgrad der zugeführten Salzlösung $\dot{M}_{\text{Sole}0}$ mit x_0 ist abhängig von der Anzahl der Stufen n , den in der Anlage herrschenden Drücken p_1 bis p_n , der in Stufe 1 benötigten Heizleistung, der in Stufe n zugeführten Kühlleistung und dem Energieübertrag der Wärmetauscher von einer in die nächste Stufe.

Je geringer der Massenanteil des gelösten Salzes zu Beginn der Desorption und je höher der Aufkonzentrierungsgrad nach dem Prozess, umso mehr flüssiges Wasser kann gewonnen werden.

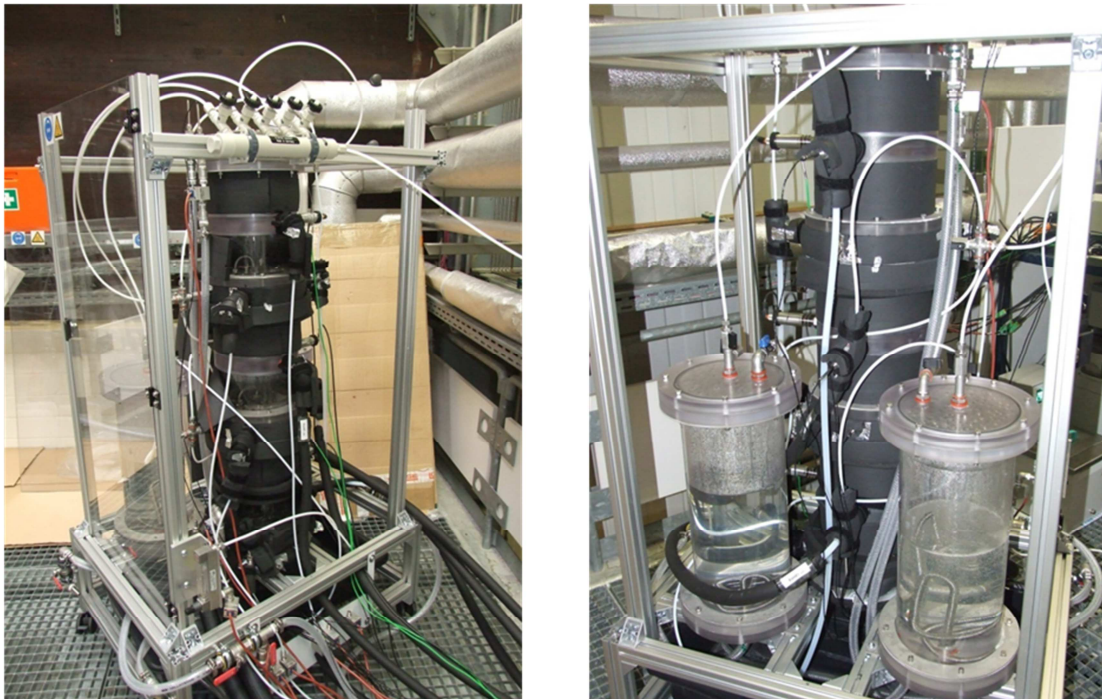


Abbildung 4.10 - Gesamte Laboranlage mit Isolierung

Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Zur Versuchsdurchführung wurde immer ein vorgegebener Versuchsablauf eingehalten, der hier nur verkürzt wiedergegeben ist. Die Anlage wurde jeweils zu Anfang evakuiert und in allen Stufen mit Flüssigkeit gefüllt. Dann erfolgt die Aufheizphase bei der sukzessive Stufe 1, 2 und 3 beginnen zu sieden. Erst dann wurde der Zufluss frischer Flüssigkeit eingeschaltet.

Die einstellbaren Versuchsparameter der Desorption an der Vakuumverdampfungsanlage sind:

- Der Volumenstrom des Zulaufs in die erste Stufe $\dot{V}_{\text{Sole}0}$
- Der Massenanteil x_i des gelösten Salzes
- Die Heiz- und Kühleinlauftemperaturen der Thermostate $T_{\text{Heiz,ein}}$ und $T_{\text{Kühl,ein}}$ sowie deren Volumenströme \dot{V}_{Heiz} und $\dot{V}_{\text{Kühl}}$
- Die Drücke in den Stufen p_1 , p_2 und p_3
- Die Dauer der Versuche

Mit der Versuchsanlage wurden zahlreiche Versuche mit Wasser, sehr hoch konzentrierter Natriumchlorid- und Lithiumchloridlösung unter veränderlichen Versuchsbedingungen durchgeführt.

Die grundsätzliche Eignung der Technologie für die vorgesehene Anwendung konnte gezeigt werden. Anhand der Versuche konnten wichtige Schlussfolgerungen für das weitere Vorgehen getroffen werden.

Die Versuche ergaben, dass eine Aufkonzentrierung der LiCl-Lösung mit dem getesteten verfahren prinzipiell möglich ist. In der Versuchsanlage sind jedoch aufgrund der Miniaturisierung des Aufbaus verfahrenstechnische Schwierigkeiten und damit hohe Wärmeverluste aufgetreten (große Leitungsquerschnitte für stabile Prozessströme → lange Aufenthaltszeiten der Medien, große Mantelfläche bei gleichzeitig kleinem Anlagenvolumen). Ein verlustfreies System mit drei Stufen erreicht mit Wasser als Prozesslösung theoretisch einen minimalen spezifischen Energiebedarf von 0,216 kWh/l. Der während der Testreihe geringste erreichte spezifische Energiebedarf lag bei 0,42 kWh/l. Der gemessene spezifische Energiebedarf mit einer LiCl-Lösung (Massenfraktion≈0,23) lag bei rund 1 kWh/l. Aufgrund des geringen Gesamtwirkungsgrades der Anlage und der höheren Betriebstemperaturen aufgrund der Siedepunktverschiebung kann in einer größeren Anlage ein erheblich geringerer Energiebedarf erwartet werden, was auch durch die späteren Versuche mit der Demonstrationsanlage gezeigt werden konnte. Während der Versuche konnte gezeigt werden, dass die Aufkonzentrierungsrate und damit der benötigte Zulaufvolumenstrom einen sehr großen Einfluss auf die energetische Effizienz aufweist (hohe Zulaufvolumenströme → geringe Aufkonzentrierung → höherer spezifischer E-Beauf).

Mathematische Modellierung

Parallel zu den Versuchen erfolgte eine tieferegehende mathematische Modellierung um die Leistungsfähigkeit der Technologie und die Einflussfaktoren abschätzen zu können.

Im Modell wurden insgesamt 4 Parameter variiert:

- Temperatur der Rohlösung in °C [20; 40]
- Maximal erreichbare Temperatur in Stufe 1 in °C [70; 100]
- Grädigkeit am Wärmetauscher zwischen den Stufen in °C [3; 10]
- Massenfraktion Salz im Feed [0,3; 0,38]

Die Ergebnisse zeigten eine starke Variation des spezifischen Energiebedarfs bei der Aufkonzentrierung von LiCl im Bereich von 0,29 – 1,1 kWh pro Liter Kondensat. Zusammenhänge bzw. allgemein gültige Tendenzen ergaben sich bei folgenden Parametern:

Temperatur Solezulauf $T(\text{feed})$ steigt → spezifischer Energieverbrauch sinkt

Heiztemperatur in Stufe 1 $T(\text{max})$ steigt → spezifischer Energieverbrauch steigt

(Temperaturdifferenz zwischen Stufen $T(\text{grad-Stufen})$ steigt → spezifischer E sinkt)

Es gab zudem sehr deutliche Abhängigkeiten von der Eingangskonzentration der Absorberlösung was zu der Erkenntnis führt, dass es auch für die Desorption wichtig ist, dass

Absorption gut funktioniert und die Sole sich stark verdünnt. Tabelle 4.5 zeigt einige Ergebnisse der Modellierung.

Tabelle 4.5 - Modellierungsergebnisse

Massenfraktion Feed	0,3	0,316	0,332	0,348	0,364	0,38
Min. spez. E-Bedarf [kWh/l]	0,289	0,299	0,313	0,334	0,369	0,436
Max. spez. E-Bedarf [kWh/l]	0,400	0,440	0,496	0,578	0,724	1,096

4.1.2.4 *Materialbeständigkeit / Korrosion*

Während der Vorversuche traten häufig Korrosionsprobleme mit den konzentrierten LiCl-Lösungen und hochlegierten Edelstählen auf. Dies legt das Vorgehen nahe, möglichst viele Komponenten aus beständigen Kunststoffen wie Polypropylen (PP) oder Polyethylen (PE) zu bauen.

Alternativ muss für die Zukunft nach Salzlösungen gesucht werden, die weniger korrosiv aber genauso geeignet sind, Wasser aus der Luft sorptiv zu binden. Es ist geplant weitere Salzlösungen auf ihre Eignung hin Wasser zu absorbieren zu untersuchen.

4.1.2.4.1 Kunststoffe

Im Bereich Kunststoffe hat sich die Firma Melotec Kunststoffverarbeitungs GmbH zu Beginn des Projektes intensiv mit der Identifizierung von geeigneten Kunststoffen für den Behälter- bzw. Anlagenbau sowie für die Verrohrung der einzelnen Teilprozesse Absorption und Desorption beschäftigt. Die wichtigste technische Eigenschaft der zu verwendenden Materialien ist primär die chemische Beständigkeit gegenüber der hygroskopischen Salzlösung zur sorptiven Wasseraufnahme während des Absorptionsprozesses. Des Weiteren müssen die Materialien vielfachen mechanischen und/oder thermischen Beanspruchungen gerecht werden. Mechanische Beanspruchungen werden vor allem während des Transportes des Demonstrationscontainers und im Betrieb an den Anlagenkomponenten der Desorption auftreten, aufgrund des niedrigen Betriebsdruckes von bis zu ~50mbar absolut.

Zur Vorauswahl geeigneter Kunststoffe wurde eine intensive Internetrecherche und Rücksprache mit verschiedenen Kunststoffherstellern durchgeführt, um die chemische Beständigkeit gegenüber des Absorbiersalzes Lithiumchlorid zu gewährleisten.

Wie in Tabelle 4.6 und Tabelle 4.7 ersichtlich sind viele der für den Anlagenbau bzw. für Dichtungen geeigneten Kunststoffe gegen eine gesättigte Lithiumchloridlösung beständig, auch wenn sich die Angaben bezüglich PVC bei der FA. Masterflex widersprechen oder teilweise Angaben zu der Beständigkeit gegen LiCl nicht vollständig sind.

Tabelle 4.6 - Beständigkeitstabelle Behälter und Anlage

Quelle		Behälter- und Anlagenbau							
gesättigte Lsg.	Medien-temp.	PVC-U	PVC-C	PE	PP-H	PA	PVDF	PTFE	PPS
<i>GF Fischer; ASV Stübbe; Flux</i>	20	++; +	+	++; +	++; ++; +		++; -; +	-; ++; +	-; -; +
	40	+	+	++; +	++; ++; +		++; -; +	-; ++; +	-; -; +
	60	+	+	++; +	++; ++; +		++; -; +	-; ++; +	-; -; +
	80		+		+		+	-; +	
	100						+	-; +	
wässrige Lsg.									
masterflex		-	-	+				+	
Bürkert		+		+		o	+	+	+

+: beständig; o: bedingt beständig; -: nicht beständig

Tabelle 4.7 – Beständigkeitstabelle Dichtungen

Quelle		Elastomere für Dichtungen						
gesättigte Lsg.	Medien-temp.	EPDM	FPM	NBR	CR	CSM	FFKM	FKM
<i>GF Fischer; ASV Stübbe; Flux</i>	20	++; -; +	+	-; -; +	+	+	-; -; +	-; -; +
	40	++; -; +	+	-; -; +			-; -; +	-; -; +
	60	++; -; +	+	-; -; +			-; -; +	-; -; +
	80		+					
	100							
wässrige Lsg.								
masterflex						+		
Bürkert		+	+	+	o		+	

+: beständig; o: bedingt beständig; -: nicht beständig

Es steht somit eine ganze Reihe von geeigneten Kunststoffen zur Verfügung, die je nach Bauteil und mechanischer Beanspruchung gewählt werden sollen. Eine Auswahl erfolgte während der Anlagenauslegung.

Bei hohen Temperaturen stehen PVDF und PTFA zur Verfügung. Abhängig von den benötigten Prozesstemperaturen können bei bis zu 80°C die wesentlich kostengünstigeren Kunststoffe PVC-C und PP bevorzugt eingesetzt werden. Beide Materialien werden sowohl

bei der Herstellung von flexiblen Schlauchleitungen als auch für feststehende Rohrsysteme eingesetzt. Bei Schläuchen muss jedoch auf einen verstärkten Schlauch zurückgegriffen werden, damit bei anliegendem Unterdruck eine Einschnürung des Leitungsquerschnittes effektiv verhindert werden kann.

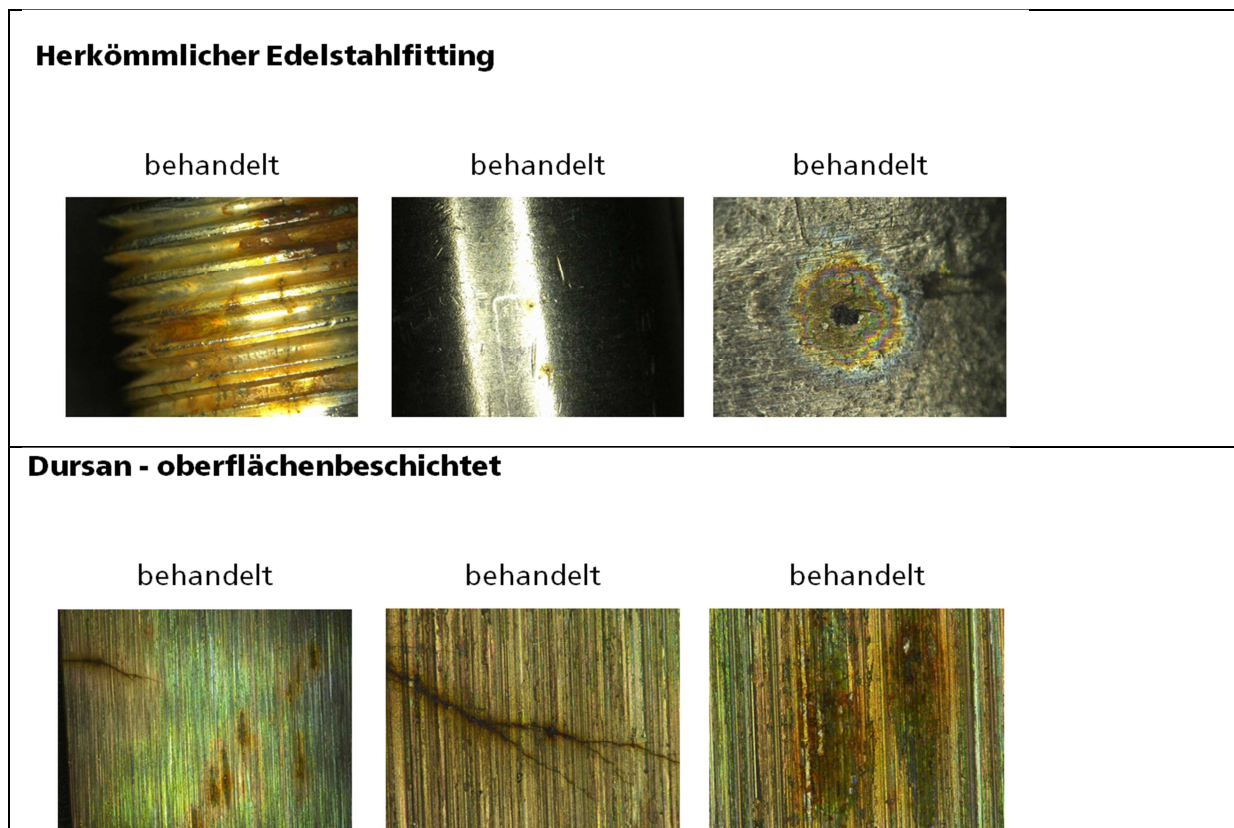
4.1.2.4.2 Metallische Werkstoffe

Im Bereich der metallischen Werkstoffe wurden neben Tabellenwerken und Beständigkeitslisten zudem einfache Vorversuche gemacht. Dazu wurden Materialproben in LiCl-Lösung getaucht und unter Zufuhr von langsam einperlender Druckluft für 8 Wochen aufbewahrt. Zeitweise wurden die Proben dann tageweise jeweils über ca. 10 Stunden auf 120°C erhitzt.

Die getesteten Materialien waren:

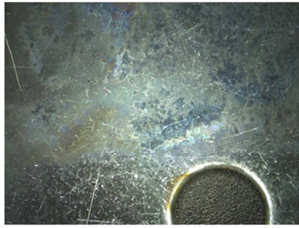
- Edelstahl „V4A“
- Edelstahl beschichtet mit Dursan
- Edelstahl beschichtet mit Sillcoloy
- Nicrofer 3127 hMO – 1.4562
- Nicrofer 5621 hMO – 2.4602
- Nicrofer 5923 hMO – 2.4605

Im Folgenden sind die Ergebnisse anhand von Fotos aufgeführt.

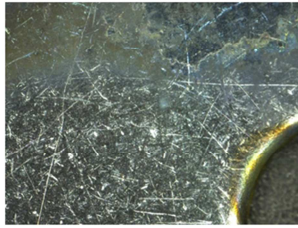


Silcolloy - oberflächenbeschichtet

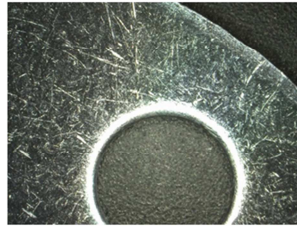
behandelt



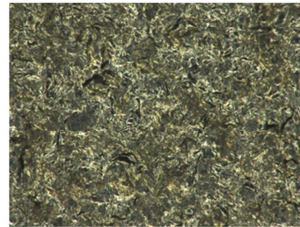
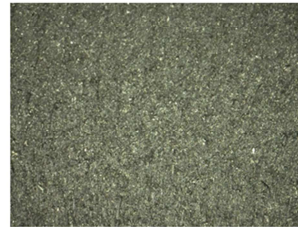
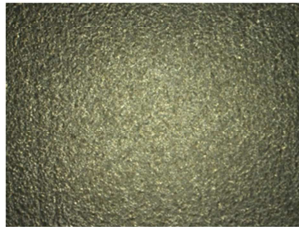
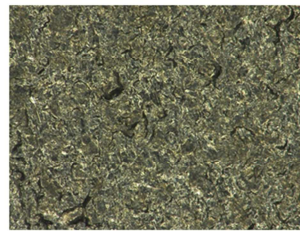
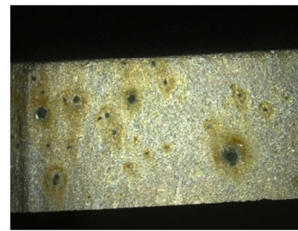
behandelt



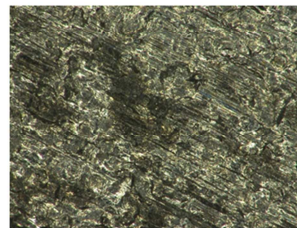
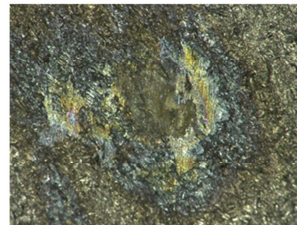
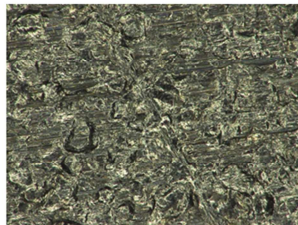
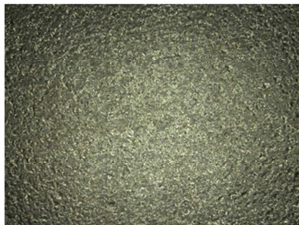
unbehandelt



Nicrofer 3127 hMO - 1.4562



Nicrofer 5923 hMO - 2.4605



Nicrofer 5621 hMO – 2.4602

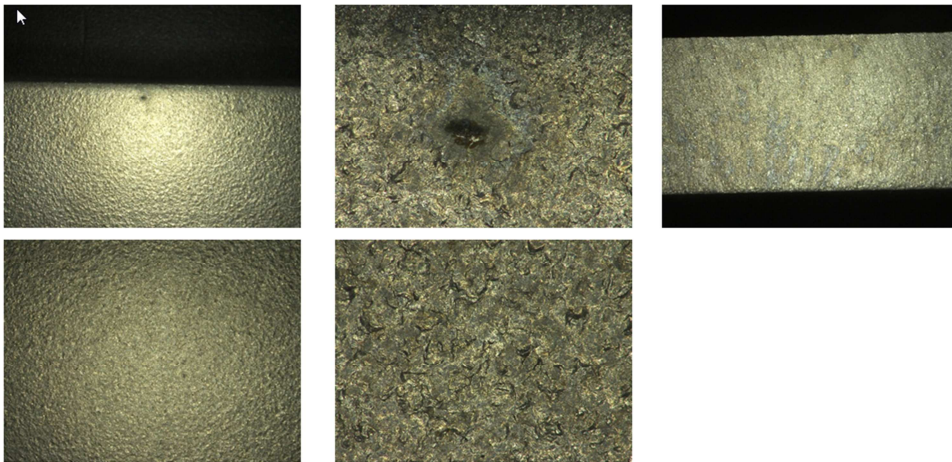


Abbildung 4.11 - Oberflächenkorrosion verschiedener metallischer Werkstoffe

Es konnten eine Reihe von generellen Erkenntnissen gewonnen werden:

- Bearbeitungsstellen sind Rostherde
- Oberflächengüte sehr wichtig
- Herkömmlicher Edelstahl ungeeignet
- Beschichtete Materialproben ungeeignet
- Deutliche Unterschiede bei Nicrofer-Stählen, Sprung 1.xx – 2.xx
- Nicrofer 5621 (2.4602) scheint geeignet zu sein (wurde in der Anlage verbaut (Kapitel 4.2.3))

4.2 Phase 2: Planung und Detailkonstruktion der Gesamtanlage

4.2.1 Grundplanung Containeranlage

Nach umfangreicher Planung und Untersuchung verschiedener Konzepte durch die beteiligten Partner wurde beschlossen, die gesamte Demonstrationsanlage in drei Containern unterzubringen, und zwar in einem aufrecht stehender 40' Container und zwei daneben stehenden 20' Container. Im ersten 20' Container wurden sämtliche Soletanks sowie die Pumpen und Armaturen zur Versorgung des Demonstrators mit der Sorptionslösung untergebracht. Im zweiten 20' Container wurden die elektrischen Komponenten wie der Schaltschrank sowie die Energiespeicher platziert. Der aufrecht stehende 40' Container beinhaltet die Absorptionsmodule, die Desorptionsanlage sowie die Soletanks zum Beschicken der Absorption.

4.2.1.1 40'- Container

Die Komplexität der statischen Auslegung des 40'-Containers aufgrund der Anforderung der senkrechten Aufstellung erforderte die Vergabe des Baus an einen spezialisierten Containerhersteller. Dazu wurden zahlreiche Anforderungen gemeinsam mit den Projektpartnern Lohse und Fraunhofer definiert. Die Vorgaben beinhalteten die Containerwahl, Raumaufteilung, Gewichtsverteilung und die Ausgestaltung verschiedener Ausstattungsmerkmale wie Betriebsebenen, Kabelkanäle, Steigleiter, Durchstieglücken etc. Im Anschluss an die durchgeführte Auslegung und ersten Variantenkonstruktionen der einzelnen Teilkomponenten, wurde eine für die Planung und den Bau der Container bindende Gewichtsabschätzung durchgeführt.

Die ganze Planung des Peripherieraums erfolgte um die beiden Speicherbehälter für Vor- und Rücklauf. Diese wurden an der Rückwand des Raums platziert, damit im Transportfall die Speicher am Boden des Containers aufliegen können. Die Behälter wurden speziell konstruiert und somit passgenau auf die Anforderungen des geringen Platzangebots, die Anschlussmöglichkeiten und die Leitungsdurchführungen des Peripherieraumes angepasst. Zur Befestigung der Behälter wurde ein speziell entworfenes Gestell aus GFK in Auftrag gegeben. Anschließend wurden verschiedene Konstruktionsvarianten erstellt um Pumpen, Filter, Sensorik und Rohrleitungen platzsparend und sicherheitskonform im Raum zu positionieren.

Außerdem wurden die Rohrleitungen für die Beschickung der Absorptionsmodule geplant und konstruiert. Die Rohrführung wurde so gestaltet, dass ein gemeinsamer und ein unabhängiger Betrieb beider Absorptionsmodule möglich ist. Beim seriellen Betrieb werden die Module nacheinander durchströmt, beim parallelen Betrieb gleichzeitig.

4.2.1.2 Solecontainer

Um die Anzahl und das Volumen für die Solespeichertanks für einen Tag-Nachtbetrieb zu identifizieren wurde die Speicherbewirtschaftung dynamisch modelliert und optimiert.

Das Ergebnis war ein Speichersystem mit fünf unabhängig voneinander zu befüllenden und entleerenden Speichern mit einem Gesamtvolumen von rund 12 m³. Jeder Speicher verfügt über eine Füllstandsmessung, eine Überfüll- und Leerlaufsicherung, sowie ein Be- und Entlüftungsventil. Zudem müssen aus jedem Speicher über eine Pumpe die Absorption sowie die Desorption beschickt werden können und ein Rücklauf aus beiden Teilprozessen möglich sein. Als Behälter wurden Standardkunststoffblasen verwendet. Dazu wurden verschiedenste industriell produzierte Speichersysteme recherchiert und auf Ihre Eignung

zur Materialbeständigkeit, Umgebungsbedingungen und für den Einbau- und Befestigung in einen 20'-Container hin überprüft.

Das beengte Platzangebot erforderte die Entwicklung von insgesamt zahlreichen Positionierungsvarianten, wobei letztendlich nur mit einem realisierbaren Konzept alle Komponenten in den beengten Raum integriert werden konnten. Die Lösung bestand dabei in der Verwendung von fünf einzelnen, jeweils 2 m³ fassenden Industriebehältern mit Bandagen der Fa. Werit, die aufgrund deren passenden Abmaße leicht in das ausgearbeitete Konzept eingebettet werden konnten.

Die Aufständigung der Speicherbehälter wurde mittels standardisierten Gitterrosten und Standfüßen aus GFK bzw. PP realisiert, welche direkt am Boden der Auffangwanne montiert wurden. Über ein an den Containerwänden verschraubtes, verstellbares Gitter aus Montageschienen erfolgte die Befestigung der einzelnen Behälter und der Kabelkanäle. Die Integration und Verschaltung von 20 Kugelhähnen mit el. Stellantrieb ermöglicht die Bewirtschaftung der fünf Speicher. Insgesamt 4 Pumpen dienen der Entnahme des Arbeitsmediums aus den Behältern, eine Haupt- und eine Redundanzpumpe für die Beschickung jedes Teilprozesses. Für die Begehungsmöglichkeit wurde ein Laufsteg oberhalb der Auffangwanne vorgesehen, welcher an den Längsseiten auf der Aufständigung der Behälter aufliegt.

4.2.1.3 **Technik-/Betriebscontainer**

Hauptaufgabe dieses Containers ist die Bereitstellung eines Raumes für die Bedienung und Überwachung des Gesamtprozesses. Der Container ist in der Mitte durch eine Wand geteilt wodurch ein Betriebsraum und ein Technik- bzw. Transportraum entstehen.

Die Planung und Ausgestaltung des Betriebsraumes erfolgte hinsichtlich der Festlegung der Dimensionen des Schaltschranks. Die sicherheitsrelevante Ausstattung wie Erste Hilfe, Feuerlöscher und persönliche Schutzausrüstung wurde ebenfalls hauptsächlich in diesem Container angebracht.

Der Technik- bzw. Transportraum beinhaltet einen großen elektrischen Schrank für den Wechselrichter, die Stromspeicher und die Überwachungs- und Steuerungselektronik.

4.2.1.4 Planung Gesamtaufbau Container

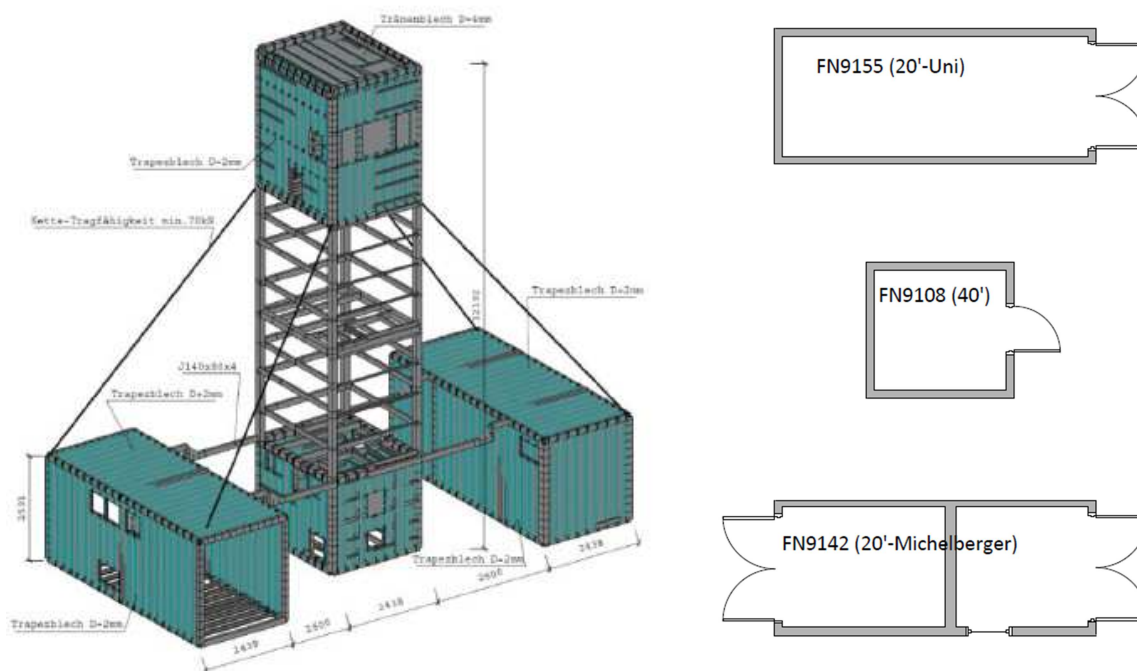


Abbildung 4.12: Anordnungsplan Gesamtanlage

Die Anordnung aller drei Container erfolgte zum Erreichen der nötigen Stabilität wie oben dargestellt. Die beiden kleineren 20'-Container erhöhen die Standfläche der Gesamtanlage und sorgen im Zusammenspiel mit den Verstrebungen für einen sicheren Stand bei den zu erwartenden Umgebungsbedingungen. Zwei, aus jeweils drei Teilen bestehende Verstrebungen aus Hohlprofilen, sind am Dachprofil der beiden 20'-Container und zwischen Ebene 1&2 des 40'-Containers verschraubt; vier Abspannseile sind an den äußeren ISO-Ecken der 20'-Container und zwischen Ebene 3&4 des 40'-Containers angebracht. Der Abstand zwischen den Containerwänden von 2,5 m entstand aus einem Kompromiss zur Minimierung des Platzverbrauchs (geringer Platzbedarf am Betriebsort, kurze Rohrleitungen) und Sicherstellung der Standsicherheit.

4.2.2 Absorptionsanlage

Einer der Hauptansprüche der zu entwickelnden Anlage bestand in der Mobilität des Gesamtaufbaus, weshalb der Teilprozess der Absorption (zusammen mit der Desorption) in einen 40'- High Cube- Container integriert wurden. Da in der ersten Phase des Projektes durch Vorversuche eine zwangsumströmte Absorptionskolonne zur Absorption als geeignet identifiziert wurde (Kapitel 4.1.2.2), sollten in der nächsten Phase die konstruktiven Möglichkeiten der Integration der Absorption und der benötigten Luftführung ausgearbeitet werden.

Aufgrund der besseren grundsätzlichen Energieeffizienz wurden zuerst Konzepte mit einem oder zwei großen Axialventilatoren, sowie ein Konzept mit einem großen Radialventilator untersucht. Es stellte sich dabei heraus, dass die großen Einbaumaße der Axial- u. Radialventilatoren zu einer Reduzierung der möglichen Höhe der Absorptionsstrecke und damit zur Reduktion der Austauschfläche führen würden. Außerdem ergaben sich durch den erforderlichen horizontalen Einbau der Ventilatoren Schwierigkeiten bei der Luftführung.

Daher wurde ein Konzept ausgewählt, bei dem die gesamte erforderliche Lüfterleistung auf mehrere kleinere Ventilatoren aufgeteilt wird, die in den Seitenwänden an der Unterseite der Absorptionskolonne positioniert sind. Diese Lüfter saugen die Luft an und fördern diese nach einer 90° Umlenkung ins Innere der Absorptionskolonne.

In ersten weitergehenden Berechnungen betrug der Druckverlust einer 4-5 m hohen Absorberkolonne 650-780 Pa, was eine elektrische Aufnahmeleistung der Lüfter von >10kW zur Folge gehabt hätte. Um den Luftvolumenstrom sowie die Strömungsgeschwindigkeit zu halbieren und dadurch den Druckverlust theoretisch zu vierteln wurde eine Teilung der Absorberkolonne in zwei getrennt voneinander betreibbare Sorptionsstrecken vorgenommen. Basierend darauf wurden alle Einbauten der Absorptionsanlage für den Anwendungsfall ausgelegt.

Ein weiterer Vorteil der Aufteilung in zwei Module liegt in der Redundanz des Teilbereichs Absorption: sollte ein Modul ausfallen, kann der Betrieb mit halbiertem Produktivität aufrechterhalten werden. Die kleineren Abmaße der einzelnen Absorptionsmodule ermöglichen zudem die Nutzung von Kompaktlüftern. Konstruktiv konnte dadurch der rechteckige Querschnitt des Containers bestmöglich ausgenutzt werden. Auch die kleineren Einbauhöhen von Kompaktlüftern wirkten sich positiv auf die Möglichkeiten der Gestaltung der Absorberkolonne aus.

Nachdem das Konzept der Absorptionsmodule festgelegt wurde, folgte eine Detaillierung und Konstruktion der Absorptionsmodule. Dabei wurden verschiedene Verteilersysteme zur Beschickung sowie verschiedene Arten der Strukturierung der Absorptionsstrecke untersucht um für die geplanten Berieselungsdichten sowie Luftvolumenströme passende Systeme auswählen zu können.

Die Beschickung der Module mit Luft erfolgt mit 16 Ventilatoren pro Modul, wobei die Ventilatoren auf jeder Seite zu einem leicht demontierbaren Lüftermodulrahmen mit je 4 Ventilatoren zusammengefasst sind. Zum Vermeiden von Austragung der LiCl Lösung in die Umgebung wurden im oberen Teil der Module Tropfenabscheider installiert.

4.2.3 Desorptionsanlage

4.2.3.1 Auslegung Desorptionsanlage

Für die Auslegung der Desorptionsanlage waren primär folgende Faktoren ausschlaggebend:

- maximale Produktionsrate des Destillats
- möglichst hoher Eindickungsgrad der Sole
- Größe der Anlage
- Kosten der Anlage

Aufgrund des verwendeten Sorptionsmittels Lithiumchlorid welches besonders starke korrosive Eigenschaft besitzt, wurde beschlossen, die Stufen des Vakuumverdampfers die mit LiCl in Berührung kommen, aus spezieller korrosionsbeständiger Legierung zu fertigen. Dieser Werkstoff ist im Vergleich zu beispielsweise normalen Edelstählen erheblich teurer.

Aufgrund der zuvor beschriebenen Schwierigkeiten mit der Membrandestillation wurde beschlossen, die Desorption mit einem mehrstufigen Vakuumverdampfer zu realisieren. Hierzu hat Fraunhofer IGB zusammen mit Fa. Lohse einen dreistufigen Vakuumverdampfer entwickelt und konstruiert, der von dem Funktionsprinzip her ein Upscaling der zuvor untersuchten Laboranlage zur mehrstufigen Vakuumverdampfung von Fraunhofer IGB und der Firma Lohse darstellt.

Hierzu wurden zunächst thermodynamische Berechnungen durchgeführt um die Eigenschaften einzelner Verdampferstufen und die daraus resultierenden Wärmetauscher – Dimensionen zu bestimmen. Danach wurde in Zusammenarbeit mit Fa. Lohse das Konzept der Anlage unter der Berücksichtigung der erforderlichen Wärmetauscher - Leistung erarbeitet und mit der Konstruktion des Verdampfers begonnen. Dabei waren mehrere iterative thermodynamische Nebenrechnungen und Konstruktionsänderungen nötig, um ein optimales Verhältnis von Anlagenleistung, Anlagengröße und daraus resultierenden Materialkosten zu finden. Daraufhin wurde die Detailkonstruktion durchgeführt und die Anlage schließlich von Fa. Lohse gebaut.

Nach der Fertigstellung durch die Fa. Lohse wurden noch vor der Integration in den Container vom Fraunhofer IGB zusammen mit der Universität Stuttgart IGVT die ersten Funktionstests des Verdampfers durchgeführt. Die Tests fanden in einer Betriebshalle der Firma Lohse statt und sollten gegebenenfalls nötige Optimierungen ermöglichen die nach dem Einbau in den Container schwierig bis unmöglich wären. Die Tests wurden mit Wasser durchgeführt, dabei wurden die Dichtheit, die Funktion und die Destillatqualität des Verdampfers untersucht. Es zeigte sich, dass der Verdampfer dicht, die Funktionalität gegeben und dass die Destillatqualität gut war. Allerdings wurde festgestellt, dass der geplante Soledurchfluss durch die Anlage nicht erreicht wird, weil sich die Luft aus den Siphons schlecht entweicht und dadurch den Durchfluss behindert, dadurch könnten theoretisch einzelne Stufen überlaufen und das Destillat kontaminieren. Daraufhin wurden die Abflüsse optimiert und Sensoren zur Füllstandkontrolle nachgerüstet.

4.2.3.2 *Kühlsystem der Desorption*

Es gibt mehrere Möglichkeiten, mit einem Kühlsystem die Prozesswärme aus dem Vakuumverdampfer abzuführen. Die Entscheidung, welches Kühlsystem in das Gesamtkonzept der Technologie zur Wassergewinnung aus Luftfeuchtigkeit integriert wird, hing von folgenden Kriterien ab:

- Aufstellort: Almeria (Spanien)
- Elektrische Antriebsleistung: Nur begrenzt vorhanden durch Solarstrom
- Anschaffungskosten gering
- Betriebskosten: so gering wie möglich
- Mobilität/Transportierbarkeit
- Umgebungstemperatur: 30 - 35°C

In Tabelle 4.8 sind die möglichen Kühlsysteme aufgeführt und unter Berücksichtigung der gestellten Kriterien zur Entscheidungsfindung miteinander verglichen.

Kühlsystem	Bewertung hinsichtlich der angestrebten Anwendung
Trockenkühler	Ein Trockenkühler ist aufgrund seiner einfachen Bauweise günstig in der Anschaffung, wartungsfreundlich, langlebig, einfach zu installieren und ist nicht standortgebunden. Die elektrische Antriebsleistung eines Trockenkühlers ist auch bei höheren Außentemperaturen niedrig. Allerdings kann der Trockenkühler bei sehr hohen Außentemperaturen die benötigte Kühlleistung nicht gewähren.
Kühlturm	Ein Kühlturm hat eine hohe Leistungsdichte und kann bei hohen Außentemperaturen den Kühlprozess stabil halten. Allerdings verbraucht der Kühlturm zwischen 1,5 und 6 Liter Wasser pro kWh abgeführter Wärme. Da Wasser aus Luftfeuchtigkeit gewonnen werden soll, ist der Kühlturm als Kühlsystem ungeeignet.
Verdunstungskühler	Die Leistungsdichte eines Verdunstungskühlers ist sehr hoch und bei hohen Außentemperaturen ist eine Prozessstabilität gegeben. Der Verdunstungskühler verbraucht jedoch zwischen 2,5 und 4,5 Liter Wasser pro kWh abgeführter Wärme. Somit ist dieses Kühlsystem für die Technologie Wassergewinnung aus Luftfeuchtigkeit ungeeignet.
Hybridkühlturm	Ein Hybridkühler besitzt eine hohe Leistungsdichte. Das Kühlsystem kann bei niedrigen Außentemperaturen als Trockenkühler betrieben werden ohne dabei Wasser zu verbrauchen. Ansonsten verbraucht ein Hybridkühlturm im Verdunstungsbetrieb zwischen 1,6 und 2 Liter Wasser pro kWh abgeführter Wärme. Der Wasserverbrauch ist ein Ausschlusskriterium für die vorgesehene Anwendung.
Geothermie	Das Kühlsystem arbeitet mit einer hohen Leistungsdichte und kann bei hohen Außentemperaturen den Kühlprozess stabil halten. Allerdings ist die Durchführung von senkrechten Bohrungen ins Erdreich zur Bestimmung des Abgabepotenzials mit sehr hohen Investitionskosten verbunden, zudem ist das Kühlsystem standortabhängig und schränkt somit die Mobilität ein. Somit erfüllt das Kühlsystem nicht die gewünschten Kriterien und ist ungeeignet.
Kompressions- Kältemaschine KKM	Die Investitionskosten einer KKM sind im Vergleich zum Kühlturm oder Verdunstungskühler niedrig. Die Technologie verleiht dem Kühlsystem eine hohe Leistungsfähigkeit, wodurch auch bei hohen Außentemperaturen eine Prozessstabilität gegeben ist. Allerdings benötigt das Kühlsystem eine sehr hohe elektrische Antriebsleistung, die von dem Solarstromsystem nicht bereitgestellt werden kann. Daher ist die KKM als Kühlsystem für die Technologie Wassergewinnung aus Luftfeuchtigkeit nicht geeignet.
Absorptions- Kältemaschine AKM Adsorptions- Kältemaschine AdKM	Für den Betrieb einer AKM oder einer AdKM müssen große Mengen thermischer Antriebsenergie bereitgestellt werden. Das geschieht häufig durch Solarthermie oder BHKW's. Wegen der niedrigen Leistungsdichte und der noch nicht ausgereiften Technologie ist das Kühlsystem für die Technologie Wassergewinnung aus Luftfeuchtigkeit nicht geeignet.

Tabelle 4.8: Bewertung der Kühlsysteme im Hinblick auf die Anwendung im Rahmen der geplanten Anlage zur Wassergewinnung aus Luftfeuchtigkeit.

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Kühlsystem-Technologien wurde der Trockenkühler aufgrund seiner guten Eigenschaften im Hinblick auf die Anschaffungskosten, Wartungsfreundlichkeit, Langlebigkeit, einfache Installation und der geringen elektrischen Antriebsleistung als Kühlsystem als am besten geeignet identifiziert.

Ein Trockenkühler zum externen Betrieb wurde mit den nachfolgenden gestellten Kriterien bei unterschiedlichen Herstellern angefragt:

- Kühlmedium: Wasser
- Wassereintrittstemperatur: 40 °C
- Wasseraustrittstemperatur: 35 °C
- Lufteintrittstemperatur: 33 °C

Aufgrund der beschriebenen Kriterien wurde ein V-Trockenkühler von der Firma Thermal Wärmetauscher-Systeme für die Integration als extern betriebenes Kühlsystem gewählt..

4.2.4 Auslegung der Energieversorgung

4.2.4.1 Elektrische Energieversorgung

Die Abschätzung bezüglich der durch die Photovoltaikanlage zur Verfügung zu stellenden elektrischen Energie wurde anhand der ermittelten Stromverbräuche der Einzelaggregate und der geplanten Betriebsmodi durchgeführt. Eine Abdeckung der Lüfterleistung, der Sensorik, der Pumpenenergie der Absorption und der elektrische Energieverbrauch der Desorption wurden angestrebt und entsprechend ausgelegt.

Für den Testbetrieb in Heidenheim wurde eine PV-Anlage installiert, die rund 50% des elektrischen Energiebedarfs abdeckt und somit einen Teilbetrieb ermöglicht. Die Leistung reicht zudem aus um auch einen Inselbetrieb für mehrere Stunden durchzuführen. Dies wurde als guter Kompromiss im Spannungsfeld zwischen Kosten und Testmöglichkeiten angesehen. Die volle Funktionalität der Anlage kann somit in Bezug auf den Strom, netzunabhängig gezeigt werden. Nach Ermittlung der Daten wurde die Anlage so ausgelegt, dass diese über Tag den Pumpenstrom der Desorption deckt und gleichzeitig die Akkus geladen werden. Mit der eingespeicherten Energie kann die Absorptionsanlage ca. 4 Stunden nach Sonnenuntergang weiter betrieben werden. Die Desorption läuft wie in der geplanten realen Anwendung auch im Testbetrieb nur am Tag. Sowohl die PV als auch das Batteriesystem können in Zukunft beliebig erweitert werden.

4.2.4.2 Thermische Energieversorgung

Die Auslegung der thermischen Energieversorgung erfolgte anhand des für die Desorption abgeschätzten thermischen Energieverbrauchs. Da es sich hier nur um einen einzigen Verbraucher im System handelt war die Auslegung einfacher.

Im Laufe des Projektes wurden zwei Hersteller angefragt, die Firma Ritter Solar sowie die Firma Cupasol. Folgende Daten wurden dabei als Grundlage für die Anfragen verwendet:

- Standort: Almeria, Spanien
- Prozessvorlauftemperatur: 130°C-135°C
- Wärmeträgerfluid: Wasser (kein Dampf)

Von beiden Firmen lagen Angebote vor, die allerdings nicht in die tiefergehende technische Klärung weitergeführt wurden. Laut Aussagen der Hersteller sind die geforderten Leistungsdaten erreichbar. Die geforderte Temperatur ist mit einem gewissen Zusatzaufwand bezüglich Sicherheit (hoher Druck) verbunden. Als im weiteren Verlauf des Projekts abzusehen war, dass die Anlage im Projektrahmen nicht mehr nach Almeria gebracht wird sondern in Heidenheim getestet wird, wurde klar, dass die solarthermische Anlage wesentlich größere Dimensionen aufweisen müsste um die erforderliche Leistung auch in Heidenheim zu bringen. Dies hätte zu erheblichen Kostensteigerungen geführt. Daher wurde beschlossen, von einer Installation einer solarthermischen Anlage abzusehen und stattdessen für die Tests ein elektrisches Druckwasser – Heizgerät zu verwenden.

4.2.5 Steuerung

Hard-/Software

Für die Steuerung der Anlage wird seitens der Hardware auf Komponenten des Herstellers Beckhoff Automation GmbH zurückgegriffen. Das System besteht aus einem Feldbus, der die Signale der Sensoren und Aktuatoren empfängt bzw. sendet und an einen übergeordneten Industrie-PC (IPC) weitergibt, der als Master fungiert. Auf diesem IPC ist ein Steuerprogramm installiert das die Signale auswertet, aufzeichnet, steuerungstechnisch aufarbeitet und entsprechende Signale an das Bussystem zurücksendet. Das Programm wurde mit Hilfe der Software LabVIEW von National Instruments speziell für das Projekt erstellt. Als Mensch-Maschine-Schnittstelle kommt ein Touch-Bildschirm zum Einsatz, auf dem die Prozesse grafisch und numerisch dargestellt werden, sowie Bedienelemente für den manuellen Modus vorhanden sind.

Aufbau Steuerprogramm

Die wichtigsten Funktionen des Steuerprogramms sind:

- Vollständig entkoppelter Betrieb von Absorption und Desorption; programmatische Start-Stopp-Bedingungen
- Anlage kann im manuellen oder automatischen Modus betrieben werden; der Wechsel zwischen den Modi ist jederzeit möglich
- Hoher Sicherheitsstandard; ständige Überwachung der Füllstände, Drücke und Temperaturen, Stopp-Bedingungen werden durch auftretende Fehler prioritär ausgeführt
- Übersichtliche grafische Darstellung der Teilprozesse Absorption/Desorption; die Anlage ist schematisch auf der Benutzeroberfläche dargestellt, die ermittelten Daten werden an den entsprechenden Stellen numerisch und/oder grafisch wiedergegeben
- Autorisierter Zugang; das Steuerprogramm ist passwortgeschützt und kann somit nur von befugtem Personal gestartet werden

4.3 Phase 3: Bau, Inbetriebnahme und Test

4.3.1 Aufbau der Gesamtanlage

Nachdem die Absorption und die Desorptionsmodule im Einzelbetrieb erfolgreich getestet wurden startete die Integration aller Komponenten in die Containeranlage.

- Die Absorptionskolonnen wurden in den 40' Container integriert
- Die Desorptionsanlage wurde in die 4. Ebene des 40' Container eingesetzt
- Der Technik - und der Solecontainer wurden einzeln bestückt
- Die Gesamtanlage wurde in Heidenheim zusammengeführt, der 40' Container wurde aufgerichtet und mit Sole- und Technikcontainern verbunden
- Die Peripherie der Absorptionsanlage wurde im 40' Container installiert
- Weitergehende Verkabelung und Verrohrung der gesamten Anlage wurde vorgenommen
- die Photovoltaik – Anlage wurde installiert

Die folgenden Bilder zeigen die Gesamtanlage sowie ihre einzelnen Komponenten nach der Fertigstellung.



Abbildung 4.13 - Gesamtaufbau des Demonstrators

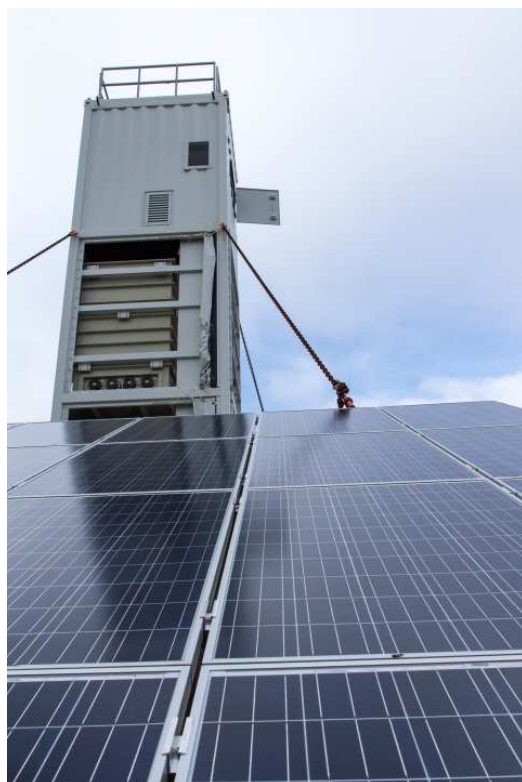


Abbildung 4.14 - Photovoltaik - Anlage des Demonstrators



Abbildung 4.15 - 40' Container, Seitenansicht Absorptionsmodule



Abbildung 4.16 - 40' Container, Durchstiegslucken im Inneren



Abbildung 4.17 - Schaltschrank im Technikcontainer



Abbildung 4.18 - 40' Container, Peripherieraum



Abbildung 4.19 – Vor- und Rücklaufbehälter der Absorption mit Filter und Pumpen



Abbildung 4.20 - Desorptionsanlage im 40' Container



Abbildung 4.21 - Beschickungspumpen im Solecontainer

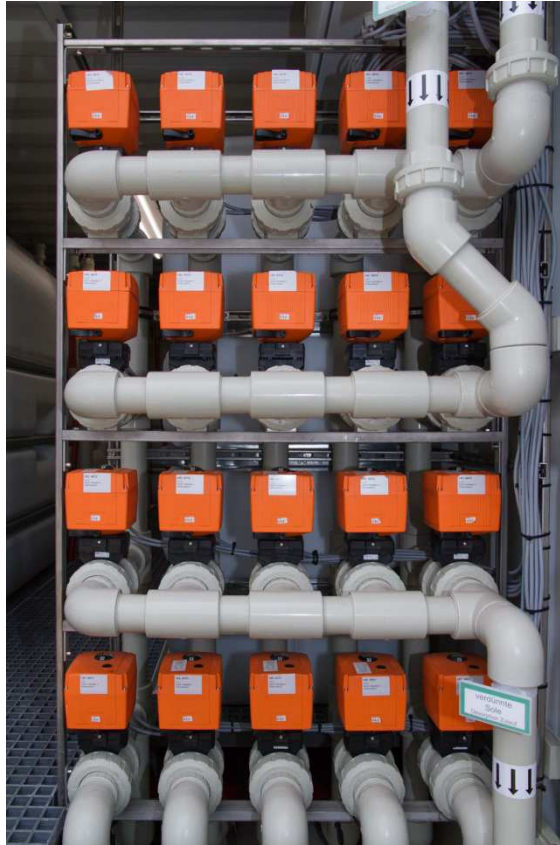


Abbildung 4.22 - Elektrische Ventile im Solecontainer



Abbildung 4.23 - Tanks im Solecontainer

4.3.2 Inbetriebnahme und Vorversuche mit Wasser

Die Inbetriebnahme der einzelnen Teilsysteme der Gesamtanlage erfolgte in der Regel direkt nach Fertigstellung der Integrations- und Montagearbeiten der betreffenden Komponenten und damit parallel zu den Arbeiten an anderen Abschnitten. Als vorläufiges Testmedium wurde Leitungswasser benutzt, um bei eventuellen Leckagen oder verfahrenstechnischen Problemen die einzelnen Anlagenteile nicht mit der Salzlösung zu kontaminieren und die Sicherheit des Betriebspersonals zu gewährleisten. So wurden die Industrietanks im Solecontainer im Anschluss an die Aufstellung der drei Container mit Wasser gefüllt und auf Ihre Dichtheit überprüft. Die an einigen Verbindungen zwischen Schlauchtüllen und Schläuchen auftretenden Leckagen wurden behoben. Um die Dichtheit des Containers zu gewährleisten, wurden regelmäßig weitere Sichtkontrollen an allen Verbindungsstellen vorgenommen und gegebenenfalls nachgebessert. In ähnlicher Weise wurden die Inbetriebnahmen der anderen Teilsysteme vorgenommen.

4.3.2.1 Inbetriebnahme Absorption

Nach Fertigstellung der Integration und Montage aller zur Absorption gehörenden Komponenten, wurde Wasser aus dem Solecontainer in den Vorlauftank im Peripherieraum gepumpt. Für alle Tests wurde ein Lab-View Programm genutzt in dem eine manuelle Steuer- und Regelung aller Pumpen und Ventile vorgenommen werden konnte. Um die Dichtheit aller Ventile im Solecontainer zu überprüfen wurde nacheinander aus jedem der fünf Tanks Wasser entnommen und umgepumpt. Somit konnte auch das Ansprechen aller Füllstandsensoren nochmals überprüft werden. Die Pumpen zur Beschickung der Absorptionsmodule wurden gestartet und Wasser vom Vorlauf- in den Rücklauftank im seriellen Betrieb umgepumpt. Leckagen wurden behoben und mit regelmäßigen Sichtkontrollen überprüft.

4.3.2.2 Inbetriebnahme Desorption

Die Inbetriebnahme der Desorptionsanlage wurde vom Fraunhofer IGB unter Mithilfe des IGVP und der Firma Lohse durchgeführt. Die Inbetriebnahme wurde begonnen nachdem die Arbeiten zum Aufstellen der Container, Integration der Gesamtanlage inklusive Verrohrung und Verkabelung aller Komponenten sowie die Inbetriebnahme der Steuerung abgeschlossen war.

Als Erstes wurde der Heizkreislauf hydraulisch getestet. Nachdem Leckagen beseitigt waren, wurde mit der Aufheizung des Kreislaufs und der Anlage begonnen. Um einen Überdruck in der Leitung zu vermeiden wurden nachträglich ein größeres Ausdehnungsgefäß sowie ein Druckminderer eingebaut.

Danach wurden die Durchflusstests der Anlage mit Wasser durchgeführt. Zur hydraulischen und technischen Optimierung wurde während der Tests eine Reihe von Verbesserungsmaßnahmen durchgeführt:

- Entfernung des Wärmerückgewinnungswärmetauschers (Druckverlust zu hoch)
- Umbau und Optimierung der Soleabflüsse
- Einsatz neuer Füllstandsensoren mit kapazitivem Funktionsprinzip
- Implementierung einer alternativen Füllstandregelung der 1. Stufe
- Neuverlegung der Schläuche im Desorptionsraum

Als nächstes wurden erfolgreich Versuche mit Wasser durchgeführt, bei denen das automatische Steuerungsprogramm getestet und weiter optimiert wurde.

Nach den erfolgreichen Wassertests wurde mit der Inbetriebnahme mit der Sorptionslösung Lithiumchlorid fortgefahren. Nach den ersten Tests, bei denen optimale Einstellungen für den Betrieb ermittelt wurden, war ein stabiler Betrieb der Anlage mit LiCl möglich.

4.3.3 Versuche mit Lithiumchlorid

Abschließend erfolgten in den letzten Wochen des Projektes zahlreiche Versuche mit einer Lithiumchloridlösung. Die durchgeführten Versuche dienten zur Erprobung eines möglichst breiten Parameterbereiches, zum besseren Verständnis der Technologie und zur Gewinnung von möglichst umfangreichen Messdaten. Diese Informationen sollten dabei helfen die Leistungsfähigkeit der Technologie abzuschätzen und für die Zukunft einen optimalen Betriebsbereich zu identifizieren. Nicht alle getesteten Betriebspunkte waren per se als optimale oder gute Betriebsparameter angelegt worden, sondern sollten den Arbeitsbereich und den Einfluss der verschiedenen Betriebsparameter klären.

4.3.4 Versuche Desorption

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme der Desorptionsanlage mit Lithiumchlorid wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt. Die Größen, die im Betrieb variiert wurden, waren die Eingangskonzentration der Sole, sowie der Solevolumenstrom am Zulauf der Desorption.

Nachdem der Wärmetauscher zwischen Soleab- und Zulauf aus hydraulischen Gründen entfernt worden war, konnte im Projektverlauf kein alternativer Wärmetauscher mehr beschafft werden. Die Entfernung des Wärmerückgewinnungswärmetauschers im Laufe der Inbetriebnahme bewirkte eine Temperaturlimitierung am Desorptionsrücklauf, die sich durch die thermische Beständigkeitsgrenze der verwendeten Schläuche ergab. Dadurch war auch die Temperatur in der ersten Stufe limitiert. Ein Betrieb bei niedrigeren Temperaturen in der ersten Stufe war durch geringere Aufkonzentrierung nicht sinnvoll. Daher wurde die Anlage stets bei ähnlichen Temperaturen in der ersten Stufe gefahren.

Es wurde im Demonstrationsbetrieb gezeigt, dass die mehrstufige Vakuumdestillation sich gut zur Aufkonzentrierung von Lithiumchlorid eignet. Der Prozess ist gut beherrschbar und stabil. Durch den Entfall der Wärmerückgewinnung war der spezifische Energiebedarf relativ hoch. Eine rechnerische Abschätzung ergab jedoch, dass die Verwendung eines Wärmetauschers zwischen Sole Zu- und Ablauf die Vorheizung der Sole um mindestens 20-30 °C ermöglichen würde. Dies würde den Energiebedarf wesentlich reduzieren.

Zudem waren die thermischen Verluste aufgrund des Teillastbetriebs spezifisch auf die Menge Destillat gesehen höher. Aufgrund der Beschränkung durch die elektrische Beheizung wurde die Anlage bei ca. einem Drittel der Auslegungsleistung betrieben. Es ist daher damit zu rechnen, dass durch Betrieb mit höherer Leistung die Effizienz der Anlage zusätzlich verbessert werden kann.

4.3.5 Versuche Absorption

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme der Gesamtanlage mit Lithiumchlorid wurde eine Reihe von Absorptionsversuchen durchgeführt. Die Größen, die im Betrieb variiert wurden, waren die Eingangskonzentration der Sole, der Solevolumenstrom am Zulauf der Absorption, sowie der Volumenstrom der Luft. Die Umgebungsbedingungen wie Lufttemperatur und absolute Luftfeuchte, die nicht beeinflusst werden konnten, variierten stark von Versuch zu

Versuch. Die Temperatur bewegte sich im Bereich von 11,6 - 20 °C, die Luftfeuchte schwanke zwischen 5,9 – 10 g Wasser pro m³ Luft.

Auch bei niedrigen Lufttemperaturen und geringen Luftfeuchten konnte die Absorption erfolgreich und stabil betrieben werden. Der elektrische Energiebedarf durch die Lüfter war deutlich geringer, als in den Auslegungsberechnungen angenommen. Auch bei den durch die niedrige absolute Luftfeuchte erschwerten Betriebsbedingungen wurde eine hohe Absorptionsrate von bis zu 5 g/m³ Luft erreicht. Die durchgeführten Versuche dienten zur Erprobung eines möglichst breiten Parameterbereiches zum besseren Verständnis der Technologie und zur Gewinnung von möglichst vielen Messdaten um einen optimalen Betriebsbereich zu identifizieren. Die Betriebsweise der Anlage soll in Zukunft so erfolgen, dass die Sole ab einer bestimmten Konzentration ausgetauscht wird und somit höhere Sorptionsraten erreicht werden. Es bleibt zudem festzustellen, dass die Messtechnik noch weiter optimiert werden muss, um die Zuverlässigkeit der Aussagen zu verbessern. Diesbezüglich wurden bereits Maßnahmen ergriffen, die auch teilweise eine nachträgliche Korrektur der Messwerte möglich machen werden.

Es ist fest damit zu rechnen, dass mit den in Almeria verfügbaren Luftfeuchten von bis zu 18 g/m³ sowie mit maximaler Anlagenleistung und optimierten Betriebsalgorithmen deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden können.

4.4 Zusammenfassung der wissenschaftlich technischen Arbeiten

Das Gesamtprojekt gliederte sich in drei aufeinanderfolgende Projektphasen.

Phase 1: Grundlagen, Vorarbeiten, Vorversuche

Phase 2: Planung und Detailkonstruktion der Gesamtanlage

Phase 3: Bau, Inbetriebnahme und Test

Als erster Schritt (Phase 1: Grundlagen, Vorarbeiten und Vorversuche) wurden die Grundlagen der Technologie umfassend erarbeitet und zusammengefasst. Die Rahmenbedingungen für das Entwicklungsprojekt sowie die Lösungsoptionen wurden erfasst und detailliert ausgearbeitet. Es wurden für die beiden Teilprozesse Absorption und Desorption systematisch und ergebnisoffen zahlreiche Verfahrensoptionen erarbeitet und diese in einem ersten Schritt anhand der Rahmenbedingungen sowie sich ergebender Vor- und Nachteile bewertet. Daraus abgeleitet war es möglich eine technische Fokussierung auf eine geringe Anzahl von Technologievarianten für die weiteren Arbeiten vorzunehmen. Für die Absorption wurden drei Verfahrensoptionen (seitlich geschlossene Absorption ohne Einbauten und mit druckloser Verrieselung bzw. Versprühung, seitlich offene und seitlich geschlossene Absorption mit unbewegten Einbauten) und für die Desorption zwei Technologien (Membrandestillation und mehrstufige Vakuumverdampfung) ausgewählt und im Labormaßstab erprobt. Diese Versuche ermöglichten es wiederum jeweils eine Technologieoption für die Umsetzung einer Demonstrationsanlage in den folgenden Phasen auszuwählen. Zur Desorption wurde aufgrund der einfacheren Handhabbarkeit die mehrstufige Vakuumverdampfung ausgewählt. Die Absorption erfolgt basierend auf den besten Versuchsergebnissen sowie der einfachen Handhabbarkeit mit einer seitlich geschlossenen Absorptionskolonne mit einer Zwangsumströmung, unter anderem um einen sicheren Versuchsbetrieb, auch bei Abwesenheit von Wind zu ermöglichen. In der ersten Projektphase wurden zudem weitere umfangreiche Arbeiten in Bezug auf erste Auslegungsberechnungen, Materialauswahl sowie Material- und Korrosionstests durchgeführt.

In Phase 2 „Planung und Detailkonstruktion der Gesamtanlage“ wurden die Erkenntnisse aus Phase 1 in die Planung einer Gesamtanlage überführt. Die Rahmenbedingungen für die Detailauslegung ergaben sich aus der Zielstellung des Projektes. Als Referenzdaten für die Dimensionierung der Anlagenkomponenten wurden Wetterdaten aus Almeria, Spanien verwendet um ein möglichst realistisches Szenario zu erhalten. Bei der Planung war es nötig eine ganze Reihe von wissenschaftlich-technischen und konstruktiven Fragestellungen zu lösen. Im ersten Schritt wurden die Auslegungsberechnungen präzisiert. Dazu gehörte neben der mathematischen Modellierung der Absorption und Desorption auch die Bewirtschaftung der Sole- sowie Energiespeicher für einen Tag-/Nachtbetrieb. Die einzelnen Container, aus denen die Gesamtanlage besteht, wurden von den Projektpartnern geplant und beschrieben. Die statische Detailauslegung und Fertigung wurde dann von einer Spezialcontainerfirma übernommen. Dadurch dass die Anlage zur Transportierbarkeit an die Abmessungen von Standardcontainer gebunden war, ergab sich in vielen Teilbereichen die Notwendigkeit einer iterativen Optimierung der Teilkomponenten im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit, den Platzbedarf und die Projektmittel. Die umfangreiche Mess-, Steuer- und Regelungstechnik wurde auch im Hinblick darauf geplant, dass die Anlage möglichst

flexibel betrieben werden kann um einen möglichst großen Erkenntnisgewinn aus den Versuchen zu erhalten. Die Steuerungsalgorithmen wurden im Projektverlauf entwickelt und in einer Labview Umgebung implementiert. Die Energieversorgung wurde parallel geplant und in verschiedenen Szenarien beschrieben. Am Ende von Phase 2 standen umfangreiche Auslegungsberechnungen, Konstruktionszeichnungen und detaillierte R&I Schemata die dann die praktische Umsetzung der Gesamtanlage in Phase 3 ermöglichten.

In der letzten Projektphase („Bau, Inbetriebnahme und Test“) wurden alle Komponenten und Teilaggregate praktisch umgesetzt. Zukaufteile und Standardmodule wie Pumpen und Sensoren wurden bei Lieferanten beschafft. Die Hauptkomponenten Absorption und Desorption wurden gebaut und soweit möglich im Einzeltestbetrieb erprobt und dabei optimiert. Nach Fertigstellung der Container wurden alle Anlagenkomponenten in die Container integriert. Die Gesamtanlage, die aus drei Containern besteht, wurde zusammengeführt und in Heidenheim aufgebaut. Dann konnte die komplette Verrohrung für die hydraulischen Komponenten sowie die Verkabelung der elektrischen Komponenten erfolgen. Die MSR Technik wurde eingebaut und verkabelt. Zudem wurde eine PV Anlage zur elektrischen Energieversorgung eingebunden. Für den Testbetrieb in Deutschland wurde die thermische Energieversorgung mit einem elektrisch betriebenen Heizaggregat realisiert, um eine hohe Flexibilität zu haben und auch wetterunabhängig testen zu können. Nach der Integration aller Komponenten erfolgte dann eine umfangreiche Inbetriebnahme, zuerst mit dem Medium Wasser. Dabei war es möglich die Anlage noch hydraulisch und messtechnisch zu optimieren und ohne großen Aufwand Leckagen zu beseitigen. Nachdem die Gesamtanlage stabil über mehrere Tage mit Wasser betrieben werden konnte erfolgte die abschließende Inbetriebnahme mit einer Lithiumchloridlösung. Hierbei wurden über mehrere Wochen zahlreiche Versuche unter veränderten Versuchsparametern und Umgebungsbedingungen durchgeführt. Die Tests und die Optimierung der Betriebsparameter dauern noch über den Projektabschluss hin an.

Bei den bisherigen Versuchen konnte erfolgreich gezeigt werden, dass die Technologie funktioniert und in der Praxis in einem größeren Maßstab umsetzbar ist. Ein automatisierter und stabiler Betrieb ist möglich. Langzeittests sollten noch folgen um weitere Erkenntnisse zum Verhalten der Anlage und des Sorptionsmittels im Dauerbetrieb zu erlangen. Bezüglich des Teilprozesses der Desorption, der mit einer mehrstufigen Vakuumdestillation durchgeführt wird, lässt sich sagen, dass dieser sich gut zur Aufkonzentrierung von Lithiumchlorid eignet. Der Prozess ist gut beherrschbar und kann stabil betrieben werden. Der bisher gemessene, relativ hohe spezifische thermische Energiebedarf ist damit zu erklären, dass momentan noch keine Wärmerückgewinnung zwischen Zu- und Ablauf umgesetzt werden konnte, die Anlage nur im Teilbetrieb lief und sich die Betriebsparameter noch in der Optimierung befinden. Der Teilprozess Absorption mit einer Gegenstromkolonne konnte auch bei niedrigen Lufttemperaturen und geringen Luftfeuchten erfolgreich und stabil betrieben werden. Die durchgeführten Versuche dienen zur Erprobung eines möglichst breiten Parameterbereiches zum besseren Verständnis der Technologie und zur Gewinnung von möglichst vielen Messdaten um einen optimalen Betriebsbereich zu identifizieren. Die anvisierte Tagesabsorptionsrate ist aufgrund der Umgebungsbedingungen (geringe Luftfeuchte) und der noch nicht optimierten Betriebsparameter bisher noch nicht erreicht worden. Es wird aber damit gerechnet, dass mit den in Almeria verfügbaren Luftfeuchten von bis zu 18 g/m^3 sowie optimierten Betriebsparametern die Absorptionsraten von bis zu $3 \text{ m}^3/\text{Tag}$ erreicht werden können. Eine komplette regenerative Energieversorgung ist möglich, nachdem die PV und Solarthermie soweit erweitert werden, dass diese den kompletten

Bedarf abdecken können. Die Transportierbarkeit der Anlage ist ebenfalls gegeben, konnte aber bisher nicht erprobt werden. Schätzungen zufolge könnten ein Abbau in ca. 4 Werktagen und ein Wiederaufbau an einem neuen Standort in 5-6 Werktagen erfolgen.