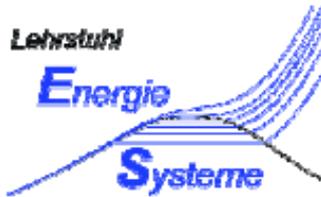


# TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN



Bayerisches Zentrum  
für angewandte  
Energieforschung  
Bayern e.V.

## Diplomarbeit

### **Aufbau und Vermessung eines Regenerators für offene Sorptionssysteme mit flüssigen Sorbentien zur Raumklimatisierung mit Niedertemperaturwärme**

*vorgelegt von*

**cand.-Ing. Grégoire Léonard**  
(2970432)

12. September 2008

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff  
Betreuer: Dipl.-Ing Eberhard Lävemann

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Hilfe Dritter angefertigt zu haben. Gedanken und Zitate, die ich aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommen habe sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen und wurde bisher nicht veröffentlicht.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Arbeit durch den Lehrstuhl für Energiesysteme der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden kann.

München, den .....

---

(Gregoire Leonard)



<b>1 EINFÜHRUNG.....</b>	<b>6</b>
1.1 EINLEITUNG .....	6
1.2 STAND DER TECHNIK .....	7
1.3 DAS KONZEPT DER ZULUFTKLIMATISIERUNG MIT LITHIUM CHLORID AM ZAE BAYERN E.V. ....	8
1.3.1 Absorber .....	8
1.3.2 Indirekte Verdunstungskühler.....	9
1.3.3 Regenerator .....	9
1.3.4 Energiespeicher .....	9
1.4 KONSTRUKTIVE ANFORDERUNGEN AN DEN STOFFAUSTAUSCHER .....	11
1.5 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG.....	12
<b>2 THEORIE .....</b>	<b>15</b>
2.1 GRUNDLAGEN .....	15
2.1.1 Wassergehalt in der Luft .....	15
2.1.2 Wassergehalt in der Sole.....	15
2.2 ABSORPTION UND DESORPTION .....	16
2.2.1 Begriffserklärung .....	16
2.2.2 Stoffaustausch bei der Absorption .....	16
2.2.3 Wärmetransport bei der Absorption .....	18
2.2.4 Thermodynamischer Zyklus.....	19
2.2.5 McCabe-Thiele Diagramm.....	21
2.3 VERSUCHSPARAMETER .....	22
2.3.1 Luft zu Salz Verhältnis .....	22
2.3.2 Massenverhältnis .....	23
2.3.3 Enthalpie der Sole und Energiespeicherdichte.....	23
2.3.4 Anzahl der Übergangseinheiten.....	23
2.3.5 Benetzungsfaktor.....	24
<b>3 SIMULATIONSPROGRAMME .....</b>	<b>25</b>
3.1 MONOKANAL .....	25
3.1.1 Beschreibung des Modells.....	25
3.1.2 Ergebnisse der Simulation.....	26
3.2 STOFFAUSTAUSCHKOLONNE.....	32
3.2.1 Simulationsmodell.....	32
3.2.2 Ergebnisse der Simulation.....	32
<b>4 AUFBAU DES MONOKANALS .....</b>	<b>34</b>
4.1 PRÜFLINGSAUFBAU.....	34
4.1.1 Austauschplatten.....	34
4.1.2 Zusammenbau der Versuchsplatten .....	36
4.1.2 Verteiler.....	37
4.1.3 Tropfenabscheider .....	39
4.2 GEHÄUSE .....	39
4.3 INTEGRATION IN EINE BESTEHENDE VERSUCHSANLAGE .....	41
<b>5 STOFFKREISLÄUFE .....</b>	<b>43</b>
5.1 LUFTKREISLAUF .....	43
5.2 WASSERKREISLAUF .....	44
5.3 SOLEKREISLAUF .....	44

<b>6 MESSTECHNIK .....</b>	<b>47</b>
6.1 ZIEL DER MESSUNGEN .....	47
6.2 MESSSTELLEN .....	47
<b>7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>52</b>
<b>8 VERZEICHNISSE .....</b>	<b>54</b>
8.1 ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	54
8.2 TABELLEVERZEICHNIS .....	55
8.3 SYMBOLVERZEICHNIS .....	55
8.4 LITERATURVERZEICHNIS .....	56
<b>9 DANKSAGUNG .....</b>	<b>58</b>
<b>10 ANHANG .....</b>	<b>59</b>
10.1 VERTEILER .....	59
10.2 PLATTE .....	60
10.3 HOLZPLATTE .....	61
10.4 PRÜFLING .....	62
10.5 GEHÄUSE UND ZUBEHÖR .....	63
10.5.1 Gehäuse .....	63
10.5.2 Abdichtungsflansch .....	63
10.5.3 Plattenrahmen.....	64
10.5.4 Deckel.....	64

# 1 Einführung

## 1.1 Einleitung

Weltweit stellt die Klimatisierung der Gebäude eine der wichtigsten energetischen Herausforderungen dar. In den Vereinigten Staaten besitzen 80% der neuen Gebäude eine zentrale Klimaanlage, während die Mehrheit der Japanischen Haushalte im Durchschnitt mehr als 2 mobile Klimaanlage besitzt (IEA, 2003). Obwohl die Raumklimatisierung in Europa noch nicht sehr verbreitet ist, nimmt die Anzahl der gekühlten Gebäude schnell zu.

Die größte Herausforderung liegt langfristig aber in den Schwellenländern und Entwicklungsländern, wo die Wetterbedingungen oft eine Klimaanlage unentbehrlich machen. Heutzutage werden zum Beispiel in China 20 Millionen Klimaanlagen jährlich verkauft (Wang, 2008). Dieser steigende Bedarf verursacht eine starke Zunahme der Energienachfrage, was unter den aktuellen Umständen aufgrund der Klimaerwärmung und der Energieknappheit unerträglich ist. Die meisten Klimaanlagen werden heutzutage von Kompressionskältemaschinen angetrieben, die einen relativ hohen Stromverbrauch verursachen. Da dieser Stromverbrauch meistens in den wärmsten Stunden des Tages erfolgt, also in den Spitzenstunden, in der die Stromnetzauslastung maximal ist, ist diese Technologie mit einem stabilen Stromnetz schwer vereinbar.

Der erste Schritt in Richtung Energieeinsparung bei der Gebäudeklimatisierung besteht aus einer möglichst effizienten Wärmeisolierung und Abdichtung der Gebäude, damit wenige Wärme- und Kälteverluste auftreten. Es ist die erste Voraussetzung für eine vernünftige Klimatisierung. Leider reicht es aber nicht immer, da innere Wärmequellen (Menschen und Maschinen) eine Steigerung der Raumtemperatur bewirken. Besonders in Bürogebäuden, in denen viele Computer angeschaltet sind und dabei Wärme erzeugen, müssen die inneren Bedingungen geregelt werden.

Obwohl die Effizienz der Klimaanlagen in den letzten Jahren schnell gestiegen ist, nahm der gesamte Stromverbrauch für die Raumklimatisierung um knapp 13% zwischen 1990 und 2000 zu, da immer mehr Klimaanlagen in Betrieb genommen werden (IEA, 2003). Eine interessante Alternative zur konventionellen Klimatisierung stellt die solare Klimatisierung dar. Die solare Klimatisierung mit offenen Sorptionssystemen vereint zwei wesentliche Vorteile. Erstens ist hierbei die Hauptenergiequelle die Sonne, so dass der Stromverbrauch stark reduziert wird. Zweitens wird die Sonneenergie in flüssigen bzw. festen Sorbentien durch einen Absorptions- bzw. Adsorptionsprozess gespeichert und steht dann für die Raumklimatisierung zur Verfügung. Die Energiespeicherung erfolgt dabei vom Bedarf zeitlich unabhängig, und das Stromnetz kann dann leichter stabilisiert werden. Die Entwicklung dieser Technologie wurde in Deutschland vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert.

Die Raumklimatisierung stellt eine wichtige und spannende thermodynamische Aufgabe dar, da sowohl die Lufttemperatur als auch die Luftfeuchtigkeit in den Räumen zuverlässig auf den Komfortbereich eingestellt werden müssen. Diese bedeutet in wärmen Klimaten, dass die Luft gekühlt und entfeuchtet werden muss. Am Bayerischen Zentrum für angewandte Energieforschung (ZAE Bayern) wird unter anderem der Prozess der solaren Klimatisierung mit Hilfe von flüssigen Sorbentien untersucht. Mit einer hygroskopischen Lithium-Chlorid

Salzlösung wird Luft getrocknet und anschließend durch Verdunsten von Wasser gekühlt. Die Salzlösung kann als effizienter Energiespeicher verwendet werden.

## 1.2 Stand der Technik

Im Bereich der Raumklimatisierung bestehen bereits mehrere Alternativen zur konventionellen Kompressionskältemaschinen. Die Tabelle 1.1 listet einige Konzepte zur Energiespeicherung mit Vor- und Nachteile.

**Tabelle 1.1: Energiespeichermethoden zur Luftklimatisierung**

Konzept	Vorteile	Nachteile
<i>Sensible Wärmespeicherung</i>	Relativ einfache Technologie, Solarwärme oder Abwärme eines BHKW als Hauptenergiequelle einsetzbar	Geringe spezifische Speicherkapazität und Bedarf an großen Speichervolumen, hohe Energieverluste aufgrund der großen Temperaturunterschiede mit der Umgebung
<i>Latente Wärmespeicherung in Materialien mit Phasenwechsel (engl.:Phase change materials, PCM)</i>	Speichervolumen bis zu drei Mal kleiner als bei der sensiblen Wärmespeicherung. Hohe thermische Trägheit, Wärme als Energiequelle einsetzbar	Platzbedarf bleibt relativ groß, Technologie noch nicht sehr verbreitet da bisher unwirtschaftlich. Temperaturbereich der erzeugbaren Kälte (bzw. der Wärme) durch die Temperatur der Phasenumwandlung festgelegt
<i>Adsorptive Energiespeicherung in festen Sorbentien</i>	Hohe Speicherdichte, geringer Platzbedarf	Regeneration der Zeolithen bei hoher Temperatur (200-300°C), Zeolithe nicht mit Pumpe förderbar
<i>Absorptive Energiespeicherung in flüssigen Sorbentien</i>	Hohe Speicherdichte, Regeneration bei niedriger Temperatur (60-70°C), so dass Abwärme oder klassische Solarwärme leicht einsetzbar sind	Speichermedium korrosiv und reizend, Technologie noch in der Entwicklungsphase

Adsorptive und absorptive Energiespeicherung werden auch unter dem Begriff Thermochemische Speicherung zusammengefasst. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich die absorptive Energiespeicherung in einer Lithium-Chlorid Salzlösung (Sole) untersucht, die als flüssiges Sorbens dient. Am ZAE Bayern werden aber andere Alternativen zu klassischen Kompressionsmaschinen untersucht.

## 1.3 Das Konzept der Zuluftklimatisierung mit Lithium Chlorid am ZAE Bayern e.V.

In Zusammenarbeit mit der Firma L-DCS Technology GmbH wurde ein offenes System zur Raumklimatisierung entwickelt, das eine Lithium-Chlorid Salzlösung als Arbeits- und Energiespeichermedium nutzt. Eine Kälterückgewinnung erfolgt mit der Abluft, aber keine Rezirkulation, denn frische Luft wird ständig von der Umgebung entnommen, um das Gebäude zu klimatisieren. Das Arbeitsmedium ist in direktem Kontakt mit der Luft, in diesem Fall spricht man von einem offenem System.

Offene Systeme haben den Vorteil, dass sie beim Umgebungsdruck betrieben werden. Dazu erfolgt der Wärme- und Stoffaustausch in direktem Kontakt zwischen der Luft und der Salzlösung und ist dementsprechend effizienter. Die Lufttemperatur und die Luftfeuchte sind gleichzeitig und separat regelbar. Die thermische Leistungszahl ist vergleichbar mit der einer geschlossenen Absorptionskältemaschine, liegt jedoch mit ca. 0,75 deutlich niedriger als bei einer Kompressionskältemaschine. Der direkte Kontakt zwischen der Sole und der Luft kann auch Verschmutzung der Salzlösung verursachen (Grossman, 2002) und stellt damit einen zweiten Nachteil des offenen Systems dar.

Der Prozess ist in der Abbildung 1.1 dargestellt. Dabei sind 4 Hauptkomponenten zu erkennen.

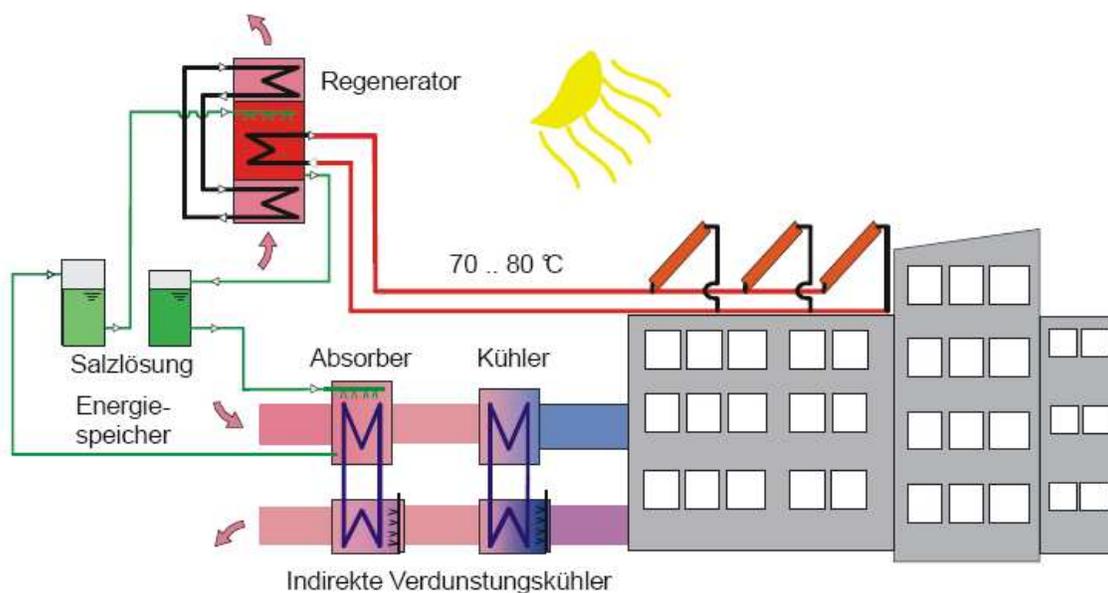


Abbildung 1.1 Konzept der Zuluftklimatisierung am ZAE-Bayern

### 1.3.1 Absorber

Bei der Zuluftklimatisierung handelt es sich nicht nur um einen Luftabkühlungsprozess, sondern auch um eine Regelung der Luftfeuchtigkeit. Da das Konzept der

Gebäudeklimatisierung mit Hilfe der LiCl-Lösung hauptsächlich für die Tropenländer ausgedacht wurde, muss eine Luftentfeuchtung unbedingt stattfinden, da die Außenluft in diesen Ländern sehr feucht ist.

Dieser Prozess beruht auf der Wasseraufnahmefähigkeit der Lithium-Chlorid Salzlösung. In einem Absorber wird die Salzlösung in Kontakt mit der feuchten Zuluft gebracht. Das Wasser, das in der Luft als Feuchte vorhanden ist, wird in der Salzlösung absorbiert. Dabei wird die Absorptionenthalpie des Wassers freigesetzt. Um den Sorptionsprozess effizient zu machen wird diese Wärme durch Abkühlung so abgeführt, dass die austretende Luft leicht kälter als die Außenluft ist.

### **1.3.2 Indirekte Verdunstungskühler**

Diese Zuluft ist aber für Klimatisierungszwecke noch nicht kalt genug. Sie wird durch indirekte Verdunstungskühlung abgekühlt. Dieser Prozess hat den energetischen Vorteil, dass er auf einer Kälterückgewinnung beruht. Abluft aus dem Gebäude wird durch einen Wärmeübertrager geleitet, dessen Flächen mit Wasser besprüht werden. Das Sprühwasser verdunstet auf den Wärmeaustauschflächen in die trockene Abluft. Es nimmt dabei Wärme aus einem Kühlkreis auf, der die Zuluft kühlt. Da die Zuluft nicht direkt durch Verdunsten im Kühler abgekühlt wird, sondern dank eines zwischengeschalteten Wärmetauschers, spricht man von indirekter Verdunstungskühlung.

Die Kälterückgewinnung aus der Abluft wird zur Abkühlung der Zuluft und zum Wärmeabfuhr aus dem Absorber benutzt. Die endlich austretende Abluft ist dann mit Wasser gesättigt und wird nicht rezirkuliert.

### **1.3.3 Regenerator**

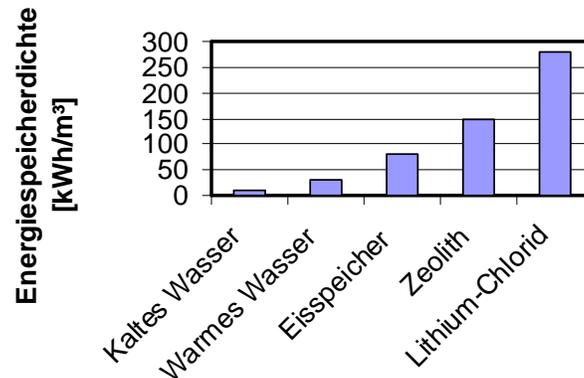
Nach dem Absorber tritt die LiCl-Salzlösung mit einem höheren Wassergehalt aus. Um diese verdünnte Lösung wieder aufzukonzentrieren führt man sie zum Regenerator. Dort wird sie wieder in Kontakt mit Außenluft gebracht, aber diesmal unter Wärmezufuhr. Die Regeneration erfolgt in einem Temperaturbereich zwischen 50°C und 90°C. Die dafür notwendige Wärme wird als Nieder-Temperatur Wärme bezeichnet. Die kann zum Beispiel von Solarflachkollektoren bereit gestellt werden, die höhere Temperaturniveaus nicht erreichen. Abwärme aus einem Blockheizkraftwerk oder einem anderen industriellen Prozess sowie die Wärme eines Fernwärmenetzes sind auch sehr gut geeignet.

Die zwei Hauptvorteile der LiCl-Klimatisierung sind hier zu erkennen. Erstens können Energiequellen eingesetzt werden, die entweder erneuerbar oder in Form von Abwärme vorhanden sind. Zweitens ist der Regenerationsprozess vom Kühlbetrieb dank der Energiespeicherung zeitlich entkoppelt. Die Solarflachkollektoren stellen somit bei sonnigem Wetter Wärme zur Verfügung und die Fernwärme liefert ihre Überschusswärme, wenn das Fernwärmenetz wenig ausgelastet ist. Der Zeitpunkt, in dem die Regeneration erfolgt, hat auf die Effizienz der Anlage keinen Einfluss.

### **1.3.4 Energiespeicher**

Das System aus konzentrierter und verdünnter Salzlösung kann als Energiespeicher für den Anwendungsfall „Luftentfeuchtung“ verwendet werden. Die umgesetzte Nutzenergie ist die

Verdampfungsenthalpie des absorbierten Wassers. Bezogen auf diese Basis kann die Energiespeicherdichte LiCl-Lösung bis zu 280 kWh/m<sup>3</sup> betragen (bezogen auf das Volumen der verdünnten Sole) (Hublitz, 2007). Dieser Wert ist groß im Vergleich zu anderen Speichern, die in der Klimatechnik eingesetzt werden. Ein Vergleich der Energiespeicherdichten mehrerer Speichermedien ist in der Abbildung 1.2 dargestellt.



**Abbildung 1.2: Vergleich der Energiespeicherdichte mehrerer Speichermedien für die Klimatechnik**

Lithiumchlorid hat sogar die höchste Speicherdichte unter den dargestellten Speichermedien. Als flüssige Sorbentien sind aber auch andere Salzlösungen anwendbar. Die Tabelle 1.2 listet einige Beispiele auf, mit Vor- und Nachteilen.

**Tabelle 1.2: Vor- und Nachteile potentieller flüssiger Sorbentien**

Salzlösung	Vorteile	Nachteile
<i>Lithium-Bromid</i>	Gute Sorptionseigenschaften	Teurer und toxischer als Lithium-Chlorid und dementsprechend schlecht für Anwendungen in offenem System
<i>Calcium-Chlorid</i>	Billig (Abfallprodukt der Sodaherstellung)	Schlechte Sorptionseigenschaften
<i>Lithium-Chlorid</i>	Gute Sorptionseigenschaften, relativ billig (5EUR./kg)	Korrosiv und reizend
<i>Mischung von Calcium-Chlorid und Calcium-Nitrat</i>	Billig und relativ gute Sorptionseigenschaften, ungiftig	Kristallisierungsgefahr falls die Zusammensetzung der Mischung von der eutektischen Zusammensetzung abweicht

Die Eignung der LiCl-Lösung für offenen Kreislauf und ihre gute Energiespeicherdichte motivieren die Wahl dieser Lösung als Arbeitsmedium. Leider ist diese Sole sehr korrosiv, was die Arbeit mit metallenen Komponenten für den Solekreislauf ausschließt. Als Konstruktionswerkstoffe werden Kunststoffe eingesetzt. Obwohl die Salzlösung reizend ist, müssen nur wenige Vorsichtsmaßnahmen eingehalten werden, da der menschliche Körper einen metabolischen Kreislauf für Lithium besitzt, was für Bromid nicht der Fall wäre. Eine Vergiftung kann dann nur durch Verschluckung von großen Salzmengen verursacht werden.

## 1.4 Konstruktive Anforderungen an den Stoffaustauscher

Im Absorber, sowie im Regenerator wird die Salzlösung in direkten Kontakt mit der Luft gebracht. In der klassischen Verfahrenstechnik wird ein solcher Apparat in Form einer Stoffaustauschkolonne gebaut. Um eine hohe Energiespeicherdichte zu erreichen, muss die Luft aber mit einem sehr kleinen Solemassenstrom entfeuchtet werden. Bezogen auf die Austauschfläche beträgt er ca. 0,2 bis 0,4 l/(h m<sup>2</sup>). Ein so kleiner spezifischer Solestrom kann in einer Kolonne nicht zufriedenstellend verteilt werden.

Das ZAE Bayern hat in den vergangenen Jahren verschiedene Austauschflächen entwickelt, die zu einem Plattenaustauscher zusammgebaut werden können. Um die Leistungsfähigkeit der Austauschflächen zu vermessen wurden sie zu einem so genannten „Monokanal“ verbaut.

Der Monokanal besteht aus zwei Austauschplatten, die einen einzigen Luft-Kanal bilden. Dieser Monokanal wird als Muster für einen ganzen Plattenaustauscher untersucht. Weiß man wie der Stoff- bzw. Wärmeaustausch auf einer Platte erfolgt, dann können diese Ergebnisse für einen Plattenwärmetauscher mit mehreren Platten leicht extrapoliert werden. Die Abbildung 1.3 stellt das Funktionsprinzip des Monokanals dar, wie es zur Untersuchung des Absorptionsprozesses gebaut wurde.

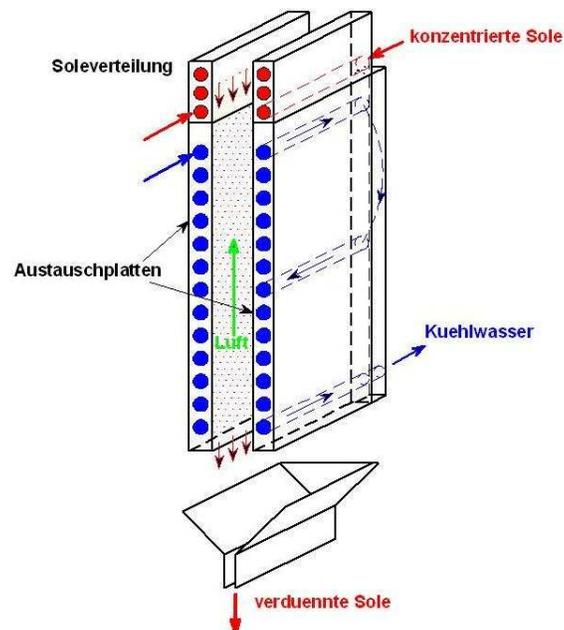


Abbildung 1.3: Funktionsprinzip des Monokanals im Absorptionsbetrieb

Drei unabhängige Kreisläufe sind auf der Abbildung zu sehen. Erstens wird die Sole von oben zugeführt und fließt auf den Austauschplatten herab. Dabei absorbiert sie Wasser aus der Luft und verdünnt sich. Im oberen Teil der Stoffaustauschplatten befinden sich Kanäle, die zur Verteilung der Sole dienen. Um eine möglichst effiziente Energiespeicherung zu erreichen, wird nur ein sehr kleiner Massenstrom an Sole gefördert, bezogen auf die Austauschfläche ca. 0,2 bis 0,4 l/(h m<sup>2</sup>). Dadurch wird die Lösung stark verdünnt und der Wasserumsatz optimiert. Diese Betriebsbedingung wird als „low-flow“ bezeichnet.

Der zweite Kreislauf ist der Luftkreislauf. Die Luft strömt im Gegenstrom zur Salzlösung ein und wird durch den Kontakt mit der Sole entfeuchtet. Dabei wird aber die Absorptionenthalpie des Wassers in der Sole freigesetzt, die abgeführt werden muss, damit die exotherme Absorptionsreaktion weiterläuft.

Der dritte Kreislauf besteht dann aus Kühlwasser zur Abkühlung des Prozesses. Der Solestrom ist zu klein, um die Absorptionenthalpie aufzunehmen ohne sich zu stark zu erwärmen. Daher muss der Absorber mit einem separaten Kühlwasserstrom gekühlt werden. Das Kühlwasser fließt in lateralen Kanälen, die in den Austauschplatten eingebaut sind.

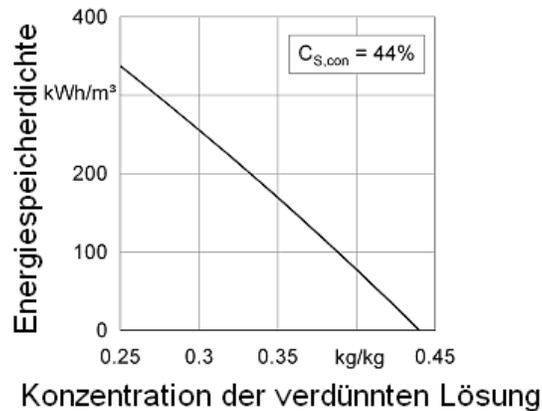
Der Absorber kann auch im Regenerationsbetrieb funktionieren. Kühlwasser wird durch Heizwasser ersetzt, um das Wasser aus der erwärmten Sole auszudampfen. Die Luft strömt wiederum im Gegenstrom und nimmt diesmal Wasser aus der Sole auf. Die aufkonzentrierte Salzlösung tritt unten aus.

Einige Anlagen wurden schon nach diesem Verfahren gebaut und in Betrieb genommen. In München wurde zum Beispiel eine 12 kW-Anlage in 2006 in Betrieb genommen, die mit Fernwärme die Klimatisierung eines Jazzclubs unterstützt (ZAE-Bayern, 2006).

## 1.5 Problemstellung und Zielsetzung

Die am ZAE Bayern entwickelten Austauschflächen wurden bisher für den Absorptionsbetrieb optimiert. So werden die Sole- und Luftströme im Gegenstrom zueinander geführt und der Solemassenstrom ist sehr gering („low-flow“ Betrieb), um eine möglichst hohe Energiespeicherdichte in der Sole zu erreichen. Ist der Solemassenstrom im Vergleich zum Luftmassenstrom sehr klein, dann wird bei der Absorption die Sole stark mit Wasser beladen, und die Konzentration der Sole am Absorberaustritt wird dementsprechend sehr klein.

Wie die Abbildung 1.4 es veranschaulicht, ist die Energiespeicherdichte der Konzentration der verdünnten Sole indirekt proportional (Hublitz, 2007). So kann ein low-flow Absorber zu einer höheren Energiespeicherdichte führen.



**Abbildung 1.4: Energiespeicherdichte der Sole in Funktion der Solekonzentration am Absorberaustritt**

Die für den Absorber entwickelten Austauschflächen wurden bisher auch für den Bau des Regenerators eingesetzt. Das low-flow Prinzip bringt für den Regenerator einige Vorteile wie kleine Sole-Pumpe, kein externer Wärmeübertrager, etwas reduzierte Regenerationstemperatur. Diese sind für den Erfolg bei der Energiespeicherung jedoch nicht ausschlaggebend. Es hat sich andererseits als schwierig herausgestellt Heißwasser führende Kunststoffplatten zu schweißen, die bei 80°C dicht und druckfest sind. Daher soll in einem nächsten Schritt ein Kreuzstrom-Regenerator in high-flow Technik aufgebaut und untersucht werden.

Da die Regenerationswärme nicht mehr über die Plattenwände übertragen wird, wird sie über einen handelsüblichen Wärmeübertrager der Sole zugeführt. Um der Sole eine ausreichende Wärmemenge für die Regeneration zu übertragen, muss der Solemassenstrom im Regenerator gegenüber der low-flow Technik deutlich erhöht werden, damit diese Wärme in einem Temperaturintervall von 5 bis 10 K umgesetzt werden kann. Darüber hinaus wird der Regenerator als Kreuzstromapparat gebaut. Da die klassischen Komponenten einer Raumlufteinrichtung meistens in horizontalen Anordnung positioniert sind, kann ein Kreuzstromaustauscher leichter integriert werden. Während die Sole wie vorher senkrecht auf die Austauschplatte runterfließt, strömt die Luft jetzt horizontal.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Regenerator für Lithiumchloridlösung auszulegen, als Monokanal zu konzipieren und aufzubauen, sowie die zugehörige Versuchseinrichtung umzubauen und in Betrieb zu nehmen. Die Vermessung des Apparates war optional. Sie konnte im gegebenen Zeitraum nicht mehr realisiert werden.

Die Versuchseinrichtungen, die für den low-flow Gegenstrom-Absorber vorgesehen waren müssen an den high-flow Betrieb im Kreuzstrom angepasst werden. Besonders der Soleverteiler muss optimiert werden, damit ein Solemassenstrom, der fast drei Größenordnungen größer als im low-flow Betrieb ist, gleichmäßig auf die Austauschplatten verteilt wird. Die bestehende Versuchsanlage mit Wasser- und Luft Kreisläufen muss angepasst werden. Der Solekreislauf muss für den high-flow Solemassenstrom neu aufgebaut werden.

Der Bau dieses Regeneratorsprototyps sollte Hinweise darüber liefern, welche volumenspezifische Austauschfläche in einem Plattenaustauscher erzielbar ist, wie effizient der Regenerationsprozess unter vorgegebenen Bedingungen läuft, und in welchem Kostenverhältnis ein Plattenaustauscher im Vergleich zu einer klassischen Stoffaustauschkolonne steht. Vor diesem Hintergrund wurde in dieser Arbeit eine konventionelle Stoffaustauschkolonne simuliert und in Zusammenarbeit mit der Firma Sulzer Chemtech dimensioniert. Informationen über Preis- und Effizienzfaktoren einer Stoffaustauschkolonne wurden recherchiert.

## 2 Theorie

### 2.1 Grundlagen

#### 2.1.1 Wassergehalt in der Luft

Zur Angabe des Wassergehaltes in der Luft können drei verschiedenen Größen benutzt werden. Als Bilanzmaß eignet sich die Beladung der Luft mit Wasserdampf, auch Wassergehalt der Luft genannt, der die Wasserdampfmasse in der Luft auf die Luftmasse bezieht wie in Gleichung (2.1) definiert. Alle verwendeten Symbole sind im Symbolverzeichnis aufgelistet.

$$X_L = \frac{m_{WD}}{m_{trockene\ Luft}} \quad \text{Gleichung (2.1)}$$

Wird eine feuchte Luftmenge so tief abgekühlt, dass der Wasserdampf anfängt zu kondensieren, so wird den Taupunkt erreicht. Die Temperatur des Taupunktes ist ein sehr hilfreiches Maß für die Luftfeuchtigkeit, da sie direkt gemessen werden kann, was für den Wassergehalt nicht der Fall ist.

Die dritte Größe ist die relative Luftfeuchtigkeit. Sie gibt für eine gewisse Temperatur und einen gewissen Druck den Sättigungsgrad der Luft in Prozent an, wie in Gleichung (2.2) gezeigt. So besitzt die gesättigte Luft am Taupunkt eine relative Feuchtigkeit von 100 %, während die relative Feuchtigkeit trockener Luft 0 % beträgt.

$$\varphi = \frac{P_{WD}}{P_{WD}^s} \quad \text{Gleichung (2.2)}$$

Bei gegebenen Druck und Temperatur bestimmt jede einzelne Größe den Zustand der feuchten Luft eindeutig. Für die Berechnung von Enthalpiebilanzen werden die Stoffströme als Enthalpieströme berücksichtigt. Die spezifische Enthalpie der feuchten Luft ist eine Funktion der Temperatur, des Druckes, und des Wassergehaltes, sie wird nach der Formel (2.3) ermittelt.

$$h_{feuchte\ Luft} = h_{trockene\ Luft} + X_L \cdot h_{WD} \quad \text{Gleichung (2.3)}$$

#### 2.1.2 Wassergehalt in der Sole

Per Definition ist eine Sole eine Salzlösung, d.h. die Mischung eines Salzes (hier Lithiumchlorid) mit Wasser. In Gleichung (2.4) wird die Beladung des Salzes mit Wasser  $X_{Salz}$  eingeführt, die analog zur Wasserbeladung der Luft definiert ist und die ebenfalls den Wassergehalt der Sole beschreibt.

$$X_{Salz} = \frac{m_{Wasser}}{m_{Salz}} \quad \text{Gleichung (2.4)}$$

Häufiger wird aber der Salzgehalt der Sole zur Charakterisierung der Lösung statt des Wassergehaltes eingesetzt. Die Konzentration quantifiziert diesen Salzgehalt, wie in der Gleichung (2.5) definiert.

$$C_{Sole} = \frac{m_{Salz}}{m_{Sole}} = \frac{m_{Salz}}{m_{Salz} + m_{Wasser}} \quad \text{Gleichung (2.5)}$$

Die Beziehung zwischen Beladung und Konzentration ist in der Gleichung (2.6) dargestellt.

$$X_{Salz} = \frac{1 - C_{Sole}}{C_{Sole}} \quad \text{Gleichung (2.6)}$$

In den Berechnungen wird die Beladung statt der Konzentration eingesetzt, da die Luftfeuchtigkeit auch als Beladung angegeben wird, wie es in der Klimatechnik üblich ist. Die Beladung hilft zur Darstellung des Prozesses in einem McCabe-Thiele Diagramm. Die Abbildung 2.4 zeigt das McCabe-Thiele Diagramm der Absorption. Durch den Einsatz der Beladungen statt der Konzentrationen ist der Sorptionspfad nahezu eine Gerade. So kann eine Berechnung der theoretischen Stufenzahl durch eine Stufenkonstruktion zwischen dem Sorptionspfad und der Bilanzgerade leicht durchgeführt werden.

Da weder Solekonzentration noch Solebeladung mit den vorhandenen Messgeräten direkt gemessen werden können, misst man die Dichte der Sole. Die Dichte der Lithiumchlorid Lösung hängt von der Temperatur und dem Wassergehalt ab. Da die Messung bei 20°C und normalem Druck durchgeführt wird, bestimmt die Messung der Soledichte die Solekonzentration eindeutig. Die Beziehung zwischen der Dichte und der Konzentration wurde experimentell ermittelt (Conde, 2003). Eine Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Sole könnte ebenfalls Angaben über ihre Konzentration liefern (von Oelsen, 2001). Dieses Verfahren wurde aber in dieser Arbeit nicht untersucht.

## 2.2 Absorption und Desorption

### 2.2.1 Begriffserklärung

Der grundlegende Prozess der Raumklimatisierung mit Hilfe von flüssigen Sorbentien ist die Absorption. Die Absorption ist das Lösen eines gasförmigen Stoffes, des Absorptivs, in einer Flüssigkeit, dem Absorbens. Die Absorption sollte nicht mit der Adsorption verwechselt werden, die das Anlagern von Gasen in festen Sorbentien bezeichnet. Die Desorption bezeichnet den umgekehrten Vorgang der Absorption, d.h. die Freisetzung eines gasförmigen Stoffes aus einer Flüssigkeit. Im Fall der Lithiumchloridlösung wird für die Desorption des Wassers aus der Sole der Begriff „Regeneration“ verwendet.

### 2.2.2 Stoffaustausch bei der Absorption

Außerhalb des Gleichgewichtszustandes findet ein Stofftransport zwischen den beiden Phasen statt. Dieser Stofftransport findet durch Diffusion im Trägergas Luft statt und strebt einen Ausgleich der Partialdichten des Wasserdampfes in der Luft und über der Sole an. Die

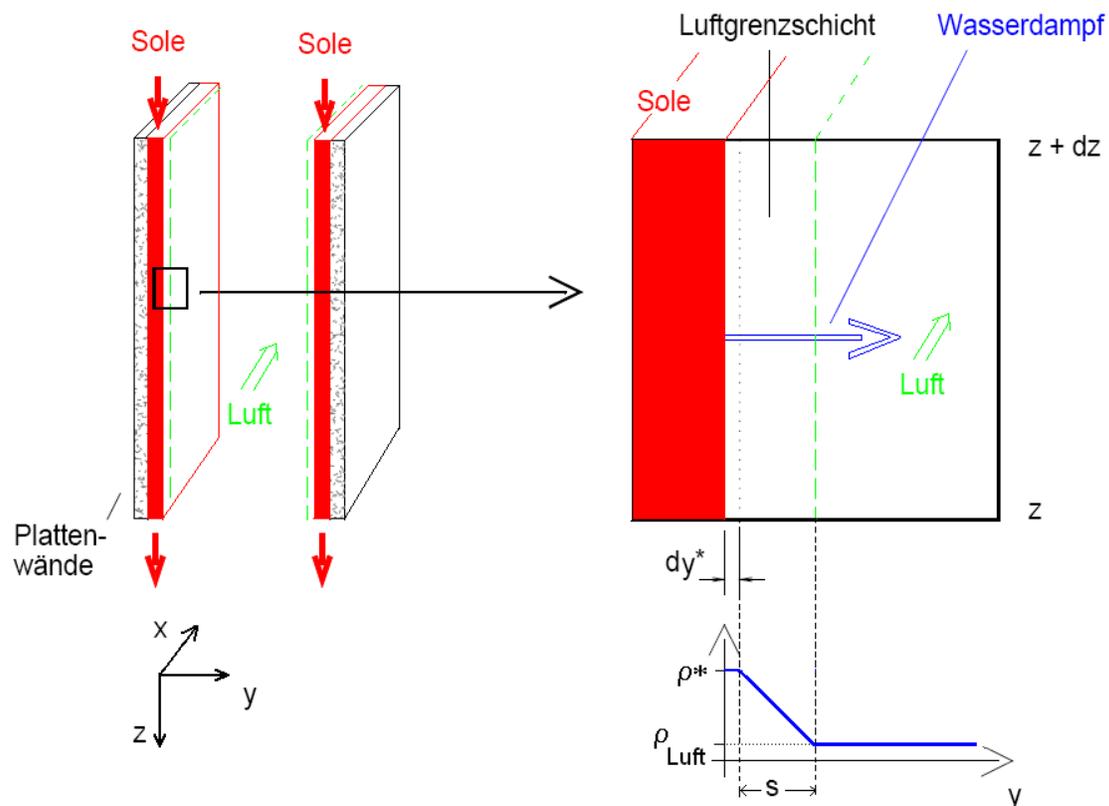
Relation zwischen Partialdichte und Partialdruck ist nach dem idealen Gasgesetz in Gleichung (2.7) gegeben.

$$\rho_{WD} = \frac{n_{WD}}{V} = \frac{P_{WD}}{RT} \quad \text{Gleichung (2.7)}$$

Die regierende Gleichung bei der Absorption (bzw. Desorption) ist das Ficksche Gesetz. Es gilt für den Fall mit Wasserdampf als Absorptiv die Gleichung (2.8), mit dem Diffusionskoeffizienten für Wasserdampf in Luft  $D$ .

$$\dot{m}_{WD} = -D \cdot A \cdot \frac{\partial \rho_{WD}}{\partial y} \quad \text{Gleichung (2.8)}$$

Die treibende Kraft, aus der der Wasserdampfmassenstrom in der Gleichung (2.8) entsteht, ist der Unterschied der Partialdichten in senkrechter Richtung zur Soleoberfläche. Die Abbildung 2.1 schematisiert den Transportvorgang. Im Regenerationsbetrieb wird die Sole so erhitzt, dass die Partialdichte des Wasserdampfes an der Oberfläche der Sole höher ist als die Partialdichte in der Luftströmung. So ergibt sich ein Stofftransport des Wasserdampfes von der Sole aus in die Luft, der die Regeneration der Sole ermöglicht.



**Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung des Stoffaustauschstroms zwischen Luft und Sole

Dieser Wasserdampfmassenstrom ist im Regenerator nicht überall gleich. Er ändert sich in den Richtungen x und z, da die Sole sich in z-Richtung aufkonzentriert und dann eine kleinere Wasserdampfpartialdichte mit zunehmender z-Koordinate besitzt. In ähnlicher Weise nimmt die Luft in x-Richtung Wasser auf und die Wasserdampfpartialdichte der Luft nimmt mit x zu.

Die Grenzschicht, die sich über dem Solefilm bildet, hat die Dicke s. Unter der Annahme, dass die Wasserdampfpartialdichte in dieser Grenzschicht linear mit der y-Koordinate abnimmt, kann man den differentiellen Quotienten linearisieren, um die Gleichung (2.9) zu erhalten.

$$\dot{m}_{WD} = -D \cdot A \cdot \frac{(\rho_{WD} - \rho_{WD}^*)}{s} \quad \text{Gleichung (2.9)}$$

Die Gleichgewichtpartialdichte  $\rho_{WD}^*$  ist die Wasserdampfpartialdichte, die sich im Gleichgewicht mit der Konzentration der Sole einstellt. Der Stoffübertragungskoeffizient wird mit der Gleichung (2.10) definiert.

$$\frac{D}{s} = \beta \quad \text{Gleichung (2.10)}$$

Die Gleichung (2.9) wird umgeformt in Gleichung (2.11), die zur Berechnung des lokalen Stoffüberganges im Simulationsprogramm verwendet wird.

$$\dot{m}_{WD} = -\beta \cdot A \cdot (\rho_{WD} - \rho_{WD}^*) \quad \text{Gleichung (2.11)}$$

### 2.2.3 Wärmetransport bei der Absorption

Beim Absorptionsvorgang findet nicht nur ein Stoffaustausch statt. Temperaturunterschiede zwischen den Stoffströmen treiben Wärmetransporte an. Da das Absorptionsphänomen exotherm ist, muss die freigesetzte Absorptionswärme abgeführt werden. Bei der Regeneration ist es genau umgekehrt, die Stoffströme müssen geheizt werden, damit der Wasserdampf aus der Sole ausdampft.

Für die Enthalpiebilanzen um den Austauscher sind die Wärmeströme zwischen den Stoffströmen und mit der Umgebung zu bestimmen. Wärmeströme werden durch die Gleichung (2.12) beschrieben, die analog zur Gleichung (2.8) für den Stofftransport ist.

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Gleichung (2.12)}$$

Der Temperaturgradient kann durch Linearisierung vereinfacht werden unter der Annahme eines linearen Temperaturverlaufs in der Grenzschicht zwischen Luft und Sole. Es wurde für den Partialdichteunterschied in der Gleichung (2.8) ähnlich gemacht. Es ergibt sich die Gleichung (2.13), in der  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit in der Grenzschicht darstellt.

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{T_L - T_S}{s} \quad \text{Gleichung (2.13)}$$

Analog zur Gleichung (2.10) wird der Wärmeübertragungskoeffizient  $\alpha$  in der Gleichung (2.14) definiert.

$$\frac{\lambda}{s} = \alpha \quad \text{Gleichung (2.14)}$$

Setzt man diesen Koeffizienten in die Gleichung (2.13) ein, ergibt sich die Gleichung (2.15), die im Simulationsprogramm benutzt wird, um den lokalen Wärmetransport zwischen der Luft und der Sole zu simulieren.

$$\dot{Q} = -\alpha \cdot A \cdot (T_L - T_S) \quad \text{Gleichung (2.15)}$$

## 2.2.4 Thermodynamischer Zyklus

Der Prozess der Luftklimatisierung kann vorteilhaft im Mollier-Diagramm dargestellt werden (Abbildung 2.2). Die gekrümmten Parameterlinien geben die relative Luftfeuchtigkeit und die geraden Parameterlinien die Isenthalpen (Linien gleicher Enthalpie) an. Die Isenthalpen stellen den Weg dar, dem die Luft folgt wenn Wasser eingesprüht wird. Auf dieser Linie ändert sich die Temperatur, aber nicht die Enthalpie.

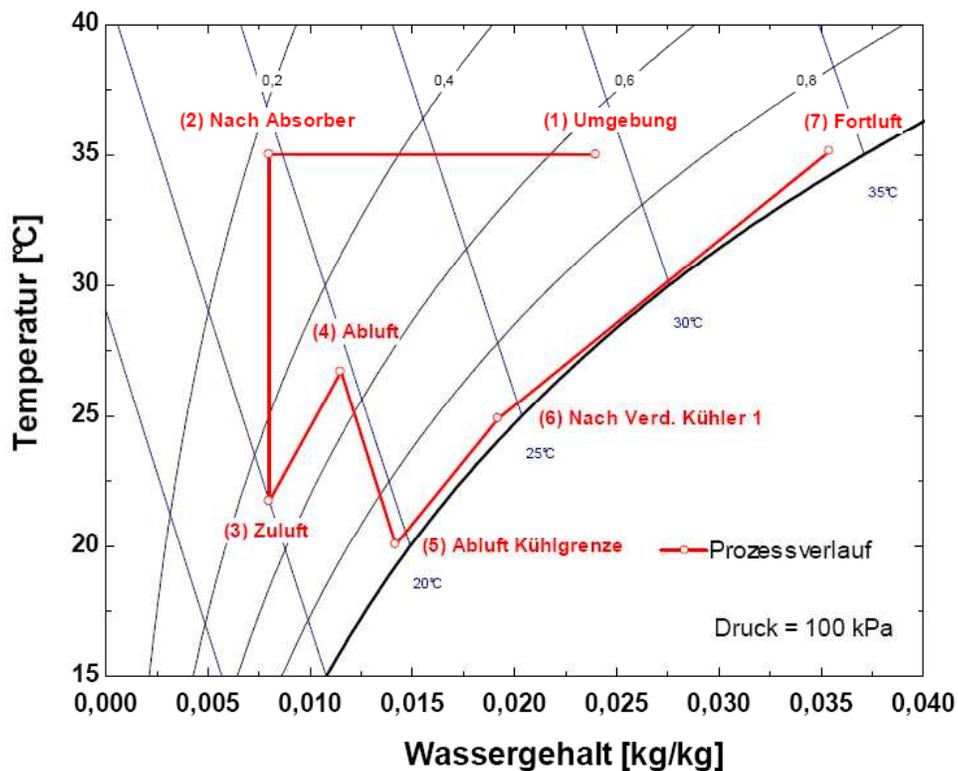


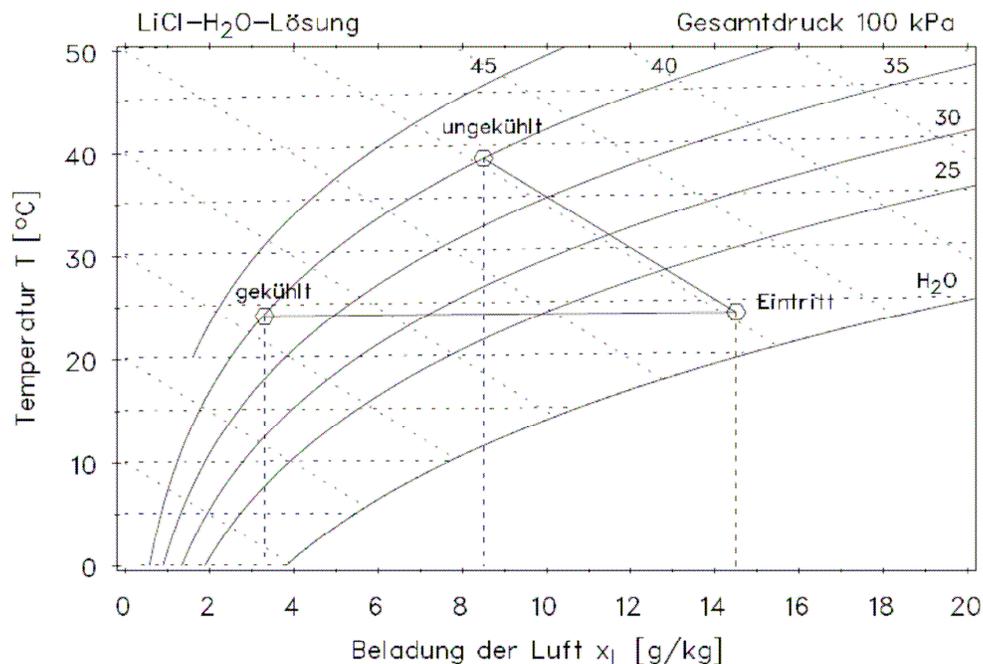
Abbildung 2.2: Darstellung des Prozesses der Luftklimatisierung im Mollier-Diagramm

Die Luft strömt in den Absorber mit dem Zustand (1). Im Absorber wird sie entfeuchtet und die Absorption läuft näherungsweise isotherm, da die freigesetzte Absorptionsenthalpie abgeführt wird. Die Luft verlässt den Absorber mit dem Zustand (2) und wird dann durch indirekte Verdunstungskühlung abgekühlt. Die klimatisierte Luft hat den Zustand (3) beim Einströmen in das Gebäude.

Die latente Energie der Abluft wird wieder verwendet, in dem eine Kälterückgewinnung erfolgt. Die Abluft hat nach ihrem Aufenthalt im Gebäude den Zustand (4) erreicht. Durch das Einsprühen von flüssigem Wasser wird sie wieder befeuchtet. Dabei verdunstet Wasser. Die Verdunstungswärme wird der Luft entnommen und die Luft kühlt sich ab. Dieser Prozess ist die Verdunstungskühlung. Der Prozess ist nicht isotherm, sondern verfolgt einer Isenthalpe.

Die Luft, die dadurch an der Kühlgrenze den Zustand (5) angenommen hat, wird zum Abkühlen der Zuluft benutzt und wärmt sich dann an einer feuchten Wärmeaustauschfläche wieder auf. Die Verdunstungskühlung läuft in zwei Schritten. Erstens wird die Zuluft abgekühlt und zweitens wird der Absorptionsprozess gekühlt, so dass die Abluft feucht und warm mit dem Zustand (7) in die Umgebung gelangt.

Der Bedarf an einer Abkühlung beim Absorptionsprozess wird durch ein Beispiel in der Abbildung 2.3 veranschaulicht. Falls die Zuluft in den Absorber mit einer Temperatur von 24°C und einem Wassergehalt von 14,5 kg Wasser/kg Luft eintritt, läuft im Fall der adiabaten Absorption mit einer 40%-Solelösung der Zustand der Luft günstigstenfalls parallel zu den Isenthalpen. So wird nach der Absorption ein Wassergehalt von 8,5 kg Wasser/kg Luft erreicht. Falls die entstehende Absorptionwärme abgeführt wird und der Prozess nahezu isotherm verläuft, kann eine Endluftbeladung von 3,3 kg Wasser/kg Luft erreicht werden, was deutlich besser ist. Die gekrümmten Parameterlinien stellen die Konzentration der Sole dar, die in Kontakt mit der Luft gebracht wird.



**Abbildung 2.3: Darstellung des Absorptionsprozesse ohne und mit Abkühlung im Mollier-Diagramm**

### 2.2.5 McCabe-Thiele Diagramm

Der Absorptions- bzw. Desorptionsprozess kann auch im McCabe-Thiele Diagramm zur graphischen Berechnung der theoretischen Zahl der Gleichgewichtstufen einer Stoffaustauschkolonne dargestellt werden. Die Abbildung 2.4 zeigt dieses Diagramm für die Absorption.

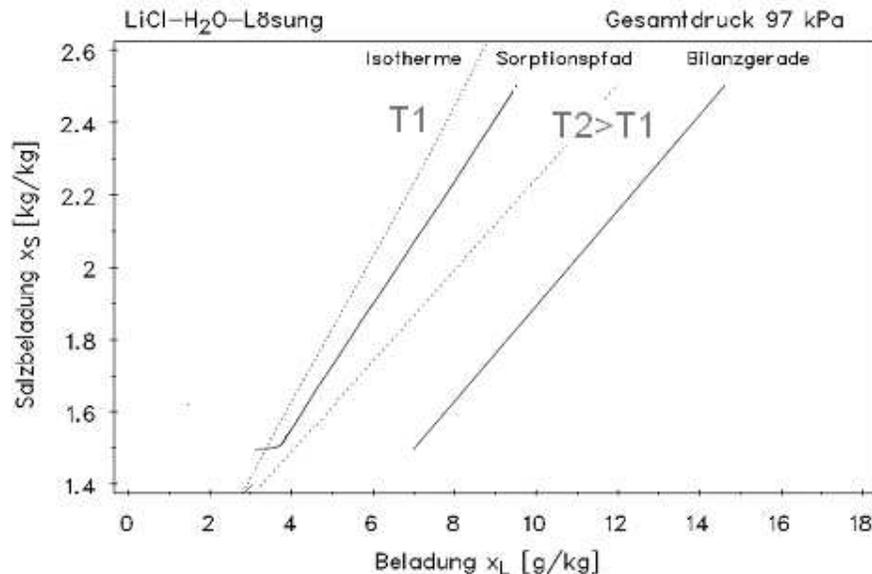
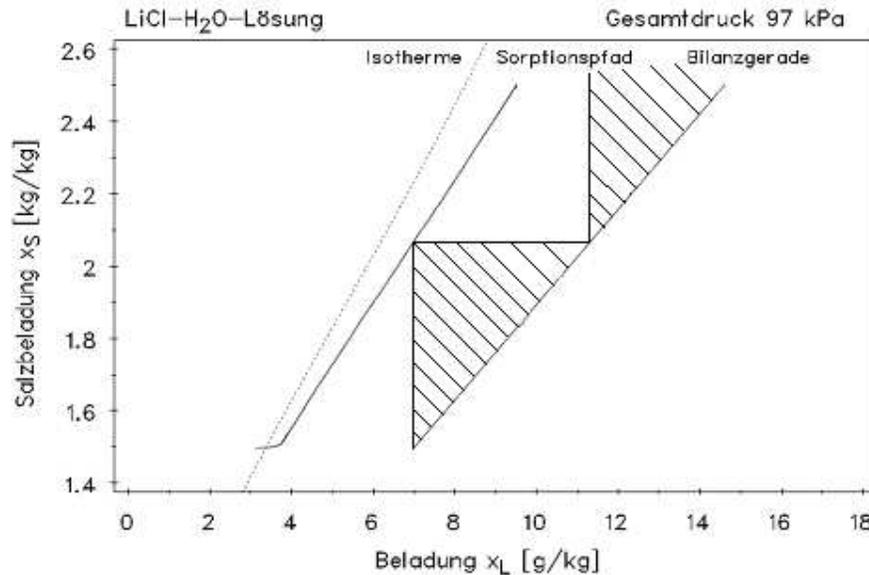


Abbildung 2.4: McCabe-Thiele Diagramm für den Absorptionsprozess

Die Isothermen stellen die Gleichgewichtszustände zwischen der Luft und der Salzlösung bei einer konstanten Temperatur dar und müssen für Lithiumchlorid experimentell bestimmt werden, siehe (Lävemann et al., 1993). Da sich die Temperatur des Kühlmediums während der Absorption aufgrund der schon erwähnten Wärmefreisetzung erhöht, verläuft der Sorptionspfad ebenso in Richtung höherer Temperaturen. Die Abweichung geht in Abbildung 2.4 nach rechts, da die Temperatur in diese Richtung steigt. Die Bilanzgerade beschreibt die Veränderung des Wassergehaltes der Sole mit der Veränderung des Wassergehaltes der Luft, sie ergibt sich aus der Wassermassenbilanz und wird auch als „Arbeitslinie“ bezeichnet.

Im Fall eines idealen Absorbers würde die Austauschfläche so groß sein, dass sich die Bilanzlinie an den Sorptionspfad annähert, da ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen der Luft und der Sole sich einstellen kann.

Die Darstellung des Absorptionsprozesses im McCabe-Thiele-Diagramm ermöglicht die graphische Berechnung der erforderlichen Zahl von Gleichgewichtstufen im Absorber. In diesem Fall sind das fast zwei Stufen, wie die schraffierten Zonen in der Abbildung 2.5 es veranschaulichen. Diese Zahl entspricht der NTU (Number of transfer units) eines Stoffaustauschers falls die Bilanzlinie und der Sorptionspfad parallel zu einander sind.



**Abbildung 2.5: McCabe-Thiele Diagramm der Absorption mit graphischer Ermittlung der Gleichgewichtstufenzahl**

Für den Desorptionsprozess liegt die Bilanzgerade links vom Sorptionspfad, der selbst links von der Isotherme liegt, da Wärme durch die Desorption aufgenommen wird. Die Berechnung der Stufenzahl erfolgt aber analog.

## 2.3 Versuchsparmeter

Im Prozess der Absorption bzw. Desorption kommt eine Reihe von Versuchsparmetern vor, die im folgenden Abschnitt definiert werden. Diese Parameter werden im Simulationsprogramm benutzt, um den stattfindenden Vorgang zu beschreiben und zu berechnen.

### 2.3.1 Luft zu Salz Verhältnis

Das Luft zu Salz Verhältnis (engl.: *Air to salt mass ratio*, ASMR) ist nach der Gleichung (2.16) definiert.

$$ASMR = \frac{\dot{m}_{L(\text{trocken})}}{\dot{m}_{\text{Salz}}} \quad \text{Gleichung (2.16)}$$

Dieses Verhältnis ist auch gleich der Steigung der Bilanzlinie im McCabe-Thiele Diagramm (Abbildung 2.4), denn aus der Wasserbilanz der Absorption ergibt sich die Gleichung (2.17).

$$\dot{m}_{\text{Salz}} \cdot (X_{S, \text{aus}} - X_{S, \text{ein}}) = \dot{m}_{L(\text{trocken})} \cdot (X_{L, \text{ein}} - X_{L, \text{aus}}) \quad \text{Gleichung (2.17)}$$

Durch Umformen der Gleichung (2.17) erhält man die Gleichung (2.19), die die Steigung der Bilanzlinie im McCabe-Thiele Diagramm angibt:

$$\frac{(X_{\text{Salz, aus}} - X_{\text{Salz, ein}})}{(X_{L, \text{ein}} - X_{L, \text{aus}})} = \frac{\dot{m}_{L(\text{trocken})}}{\dot{m}_{\text{Salz}}} = \text{ASMR} \quad \text{Gleichung (2.19)}$$

### 2.3.2 Massenverhältnis

Im praktischen Betrieb wird nicht ASMR sondern das Luft-Sole-Massenverhältnis (engl.: *Mass Ratio*, MR) gemessen. Hier wird der Solestrom betrachtet und nicht der Salzstrom. Da beide Ströme aber durch die Beladung miteinander verbunden sind, kann MR aus ASMR mit der Gleichung (2.20) ermittelt werden.

$$MR = \frac{\dot{m}_{L, \text{ein}}}{\dot{m}_{S, \text{ein}}} = \frac{\text{ASMR}}{(1 + X_{\text{Salz, ein}})} \quad \text{Gleichung (2.20)}$$

Da der Solemassenstrom (bzw. die Beladung) im Reaktor nicht konstant sind, wird per Definition festgelegt, dass die Ströme (bzw. Beladung) in der Gleichung (2.20) Eintrittsgröße sind.

### 2.3.3 Enthalpie der Sole und Energiespeicherdichte

Für die energetische Bilanz ist die Enthalpie der Sole zu ermitteln. Eine Beziehung, die die Enthalpie der Lithiumchlorid Lösung in Funktion der Soletemperatur  $T_S$ , der Solekonzentration  $C_S$  und der spezifischen Wärmekapazität der Sole  $C_{p,\text{Sole}}$  bzw. des Wassers  $C_{p,w}$  gibt die Gleichung (2.21) (Hublitz, 2007). Die Wärmekapazität der Lithiumchlorid Salzlösung wurde ebenfalls von Conde bestimmt (Conde, 2003).

$$H_S = (1 - C_S) \cdot C_{p,w} \cdot T_S + C_S \cdot C_{p,\text{Sole}} \cdot T_S - 1980.3744 \cdot C_S + 2277.68505 \cdot C_S^3 + 1059.288 \cdot C_S^2 \quad \text{Gleichung (2.21)}$$

Ein wichtiger Faktor zur Bewertung der Effizienz der Energiespeicherung ist die Speicherdichte (engl.: *Storage Capacity*, SC). Sie ist nach der Gleichung (2.22) als die Entfeuchtungsenergie bezogen auf das Volumen der verdünnten Sole definiert.

$$SC = \frac{\Delta M_{\text{WD}} \cdot r_0}{V_{S, \text{verdünnt}}} \quad \text{Gleichung (2.22)}$$

$r_0$  ist die spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers, das beim Absorptionsprozess umgesetzt wird, und  $\Delta M_{\text{WD}}$  ist die Wasserdampfmenge, die die Sole absorbiert.

### 2.3.4 Anzahl der Übergangseinheiten

Die Anzahl der Übergangseinheiten (engl.: *Number of transfer units*, NTU) ist ein wesentlicher Parameter zur Auslegung und Dimensionierung eines Austauschers. Sie ist nach der Gleichung (2.23) definiert, die einen Zusammenhang zwischen dem Aufwand für den Stoffaustausch ( $\beta \cdot A$ ) und dem zu entfeuchten Luftvolumenstrom angibt.

$$NTU = \frac{\beta \cdot A}{\dot{V}_L} = \frac{\beta \cdot A \cdot \rho_L}{\dot{M}_L} \quad \text{Gleichung (2.23)}$$

Eine große Kolonne mit vielen Übergangseinheiten behandelt dann ein relativ kleiner Luftvolumenstrom, aber sorgt für eine hohe Austauschleistung.

### 2.3.5 Benetzungsfaktor

Der Benetzungsfaktor  $f$  gibt an, welcher Anteil der gesamten Austauschfläche mit Sole benetzt ist. Da die Benetzung der Sole auf Polypropylenplatten nicht problemlos ist, wurde dieser Faktor eingesetzt und nach der Gleichung (2.24) definiert, um die unvollständige Benetzung der Austauschfläche bei der Simulation zu berücksichtigen.

$$f_{wet} = \frac{A_{benetzt}}{A_{gesamt}} \quad \text{Gleichung (2.24)}$$

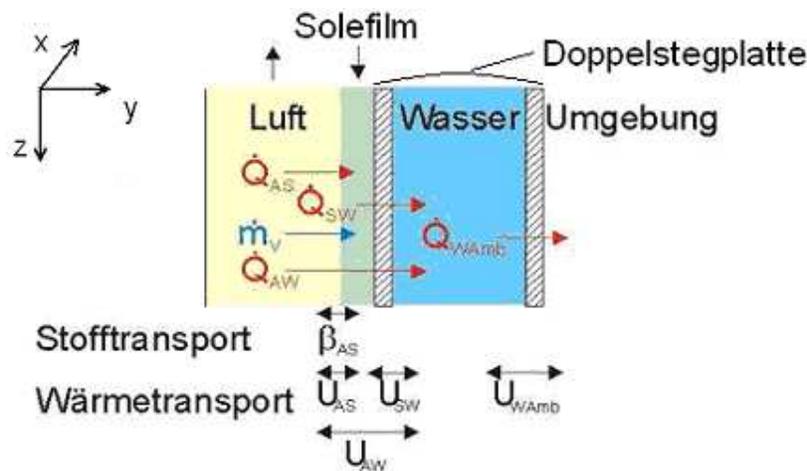
In low-flow Systemen kann der Benetzungsfaktor durch gute Verteilung der Sole den Wert von 80% überschreiten (Heimberg, 2007). In high-flow Systemen ist eine Benetzung von 100% gewünscht.

## 3 Simulationsprogramme

### 3.1 Monokanal

#### 3.1.1 Beschreibung des Modells

Ein Programm zur Simulation des Absorptions- bzw. Desorptionsprozesses wurde von Hublitz im Rahmen ihrer Doktorarbeit entwickelt (Hublitz, 2007). Dieses Programm simuliert den Betrieb des Versuchsstandes, der am ZAE von Lampe gebaut wurde (Lampe, 2003). In dieser alten Version wurde die zur Regeneration benötigte Energie vom Heizwasser in die Sole über die Plattenwände übertragen, wie in der Abbildung 3.1 dargestellt. Das Wasser zirkulierte in Kanälen innerhalb der Doppelstegaustauschplatten.



**Abbildung 3.1:** Schematische Darstellung der Austauschvorgänge zur Modellierung der Absorption

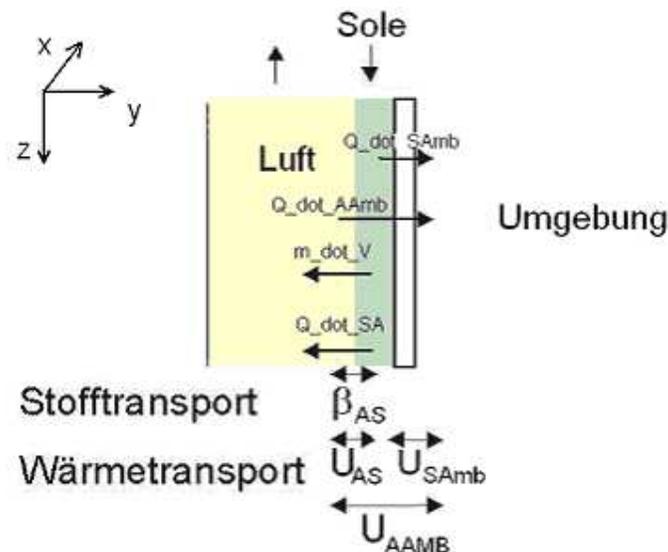
Die Stoff- und Wärmeübergangskoeffizienten, die in der Abbildung dargestellt sind, wurden von Heimberg im Rahmen seiner Diplomarbeit experimentell bestimmt (Heimberg, 2007). Dabei sind englische Indizes eingesetzt worden: A (air) für die Luft, W (water) für das Wasser, V (vapor) für den Dampf und Amb (ambience) für die Umgebung. Direkte Wärmeübertragung von der Luft an das Wasser ist nur an den unbenetzten Anteilen der Austauschfläche möglich.

Die Simulation wurde mit dem Programm EES (Engineering Equation Solver) durchgeführt. Grundlegende Gleichungen des Simulationsmodells sind die schon erwähnten Stoff- und Wärmeaustauschgesetze, sowie Wasserdampf- und Enthalpiebilanzen. Dieses Modell simuliert den Absorptionsprozess unter folgenden Bedingungen.

- Das Modell ist eindimensional, alle Variablen hängen nur von der Höhe  $z$  und sind in den Richtungen  $x$  und  $y$  konstant
- Die Stoff- und Wärmeübergangskoeffizienten sind konstant
- Die Absorption läuft stationär
- Die Druckverluste werden im Absorber vernachlässigt

Die Simulation des Regenerationsbetriebs konnte auch unter den gleichen Bedingungen durchgeführt werden. Um den neuen Versuchsstand zu simulieren, müssen aber einige Veränderungen vorgenommen werden. In der neuen Version des Monokanals wird die erforderliche Energie von der Sole selbst mitgebracht, die vor den Austauschplatten auf eine hohe Temperatur in einem Wärmetauscher geheizt wird. Es läuft kein Wasser mehr in den Doppelstegplatten. Der Solemassenstrom, der im Kreislauf zirkuliert, soll groß genug sein, damit eine hinreichende Energiemenge für die Regeneration vorhanden ist.

Der Energiezufuhr durch die Austauschplatten ist für die high-flow Bedingungen wie schon erwähnt nicht mehr geeignet, da die Temperatur viel höher ist. Obwohl die Polypropylenplatten Temperaturen bis 80°C ohne zu schmelzen aushalten, sind sie ein bisschen weicher geworden, was zu Undichtigkeiten des Wasserkreislaufs führte. Die Sole wird dann in einem vorgeschaltetem Wärmetauscher erwärmt. Um diese neuen Bedingungen richtig zu berücksichtigen, müssen neue Austauschkoefizienten eingeführt werden, die auf der Abbildung 3.2 zu erkennen sind.



**Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Austauschvorgänge zur Modellierung der Regeneration**

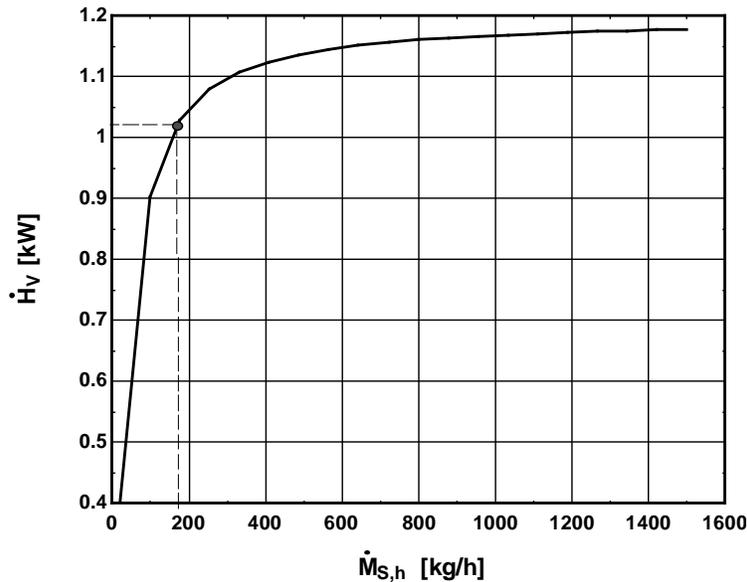
Zusammengefasst wurde das bestehende Simulationsmodell mit dem Ziel angepasst, die Betriebsbedingungen des neuen Versuchstandes zu modellieren, und zwar eine größere Soledurchströmung und eine Erhitzung der Sole vor den Austauschplatten. Die Strömungsdynamik des Kreuzstromes wurde weiterhin mit einem Gegenstrommodell simuliert, um die Eindimensionalität des Modells zu behalten.

### 3.1.2 Ergebnisse der Simulation

#### 3.1.2.1 High-flow / low-flow

Mit diesem Programm konnte das optimale Massenverhältnis MR zwischen der Luft und der Sole für den high-flow Betrieb bestimmt werden. Dabei sind die von Heimberg gemessenen Stoffaustauschparameter als Faustwerte angenommen worden (Heimberg, 2007).

Bei festgelegtem Luftmassenstrom ( $40 \text{ m}^3/\text{h}$ , etwas der nominale Luftstrom der Versuchsanlage) wurde der Solemassenstrom variiert. Die Abbildung 3.3 zeigt die entsprechende Variation des Wasserdampfenthalpiestromes. Der Enthalpiestrom des Wasserdampfes, der von der Sole zur Luft übergeht, gibt ein Maß davon an, wie viel Regenerationsenergie von der Sole aufgenommen wird, um das Wasser zu desorbieren.



**Abbildung 3.3: Darstellung der verbrauchten Regenerationsenergie in Funktion des Solemassenstromes**

Je höher der Solemassenstrom, desto mehr Energie wird bei gleicher Austauschfläche genutzt. Ab einem gewissen Solemassenstrom nimmt aber die Steigung der Kurve deutlich ab. Das bedeutet, wenn der Massenstrom noch erhöht wird, ist die Zunahme der umgesetzten Energie kleiner. Wird der Solemassenstrom bei konstanter Austauschfläche und konstantem Luftmassenstrom stark erhöht und verfügt die Anlage über eine gewisse Energiemenge (aus Solarkollektoren oder Fernwärme), dann kann diese Energie am Ende nicht besser ausgenutzt werden.

Darüber hinaus zeigte die Simulation, dass sich die Leistung des Regenerators ab einem Solemassenstrom von ungefähr  $4000 \text{ kg/h}$  auf dem Wert von  $1,19 \text{ kW}$  stabilisiert. Bei einem Solemassenstrom von  $20.000 \text{ kg/h}$  beträgt die Leistung immer noch  $1,19 \text{ kW}$ . Das bedeutet, dass sogar wenn man  $20.000 \text{ kg/h}$  Sole im Wärmetauscher auf  $80^\circ\text{C}$  aufwärmt, kann nicht mehr Energie als  $1,9 \text{ kW}$  umgesetzt werden, angenommen, dass die Austauschfläche und der Luftmassenstrom festgestellt sind.

Die Dimensionierung der Anlage für den high-flow Betrieb muss dann so erfolgen, dass diese Energieausnutzung möglichst effizient ist. Für einen festgelegten Luftvolumenstrom, muss dann der Auslegungspunkt da liegen, wo die zusätzlichen Konstruktions- und Betriebsaufwendungen eines erhöhten Solemassenstroms die Zunahme der Energieausnutzung nicht mehr ausgleichen. So wurde aus der Abbildung 3.3 graphisch ermittelt, dass der optimale Solemassenstrom bei  $185 \text{ kg/h}$  liegt. Da die bestehende Anlage mit einem

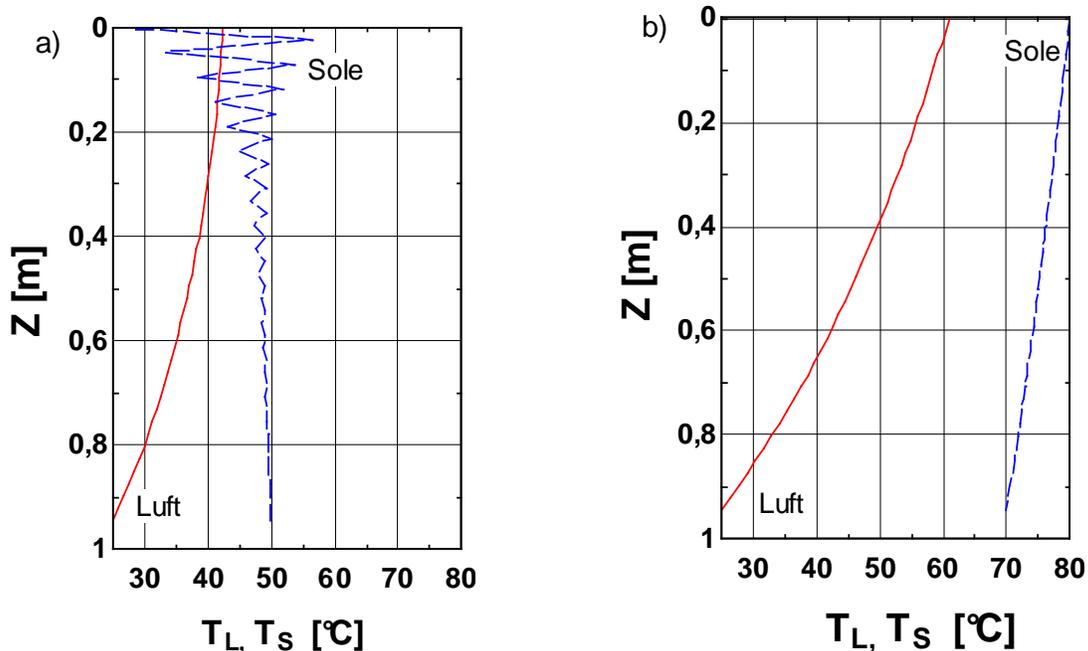
Luftmassenstrom von  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  optimal läuft, beträgt das optimale Massenverhältnis ungefähr 0,2.

Im Fall des low-flow Betriebes wurde das optimale Massenverhältnis von Kapfhammer im Rahmen seiner Diplomarbeit ermittelt. Das Verhältnis liegt bei  $MR=84$  (Kapfhammer, 1997). Für die Soleverteilung ergeben sich daher völlig andere Verhältnisse.

### 3.1.2.2 Temperatur und Konzentrationsprofile im Monokanal

Die Unterschiede zwischen low-flow und high-flow können anhand der Temperatur- und Beladungsverläufe für die Luft bzw. Konzentrationsverläufe für die Sole veranschaulicht werden. Die Abbildung 3.4 zeigt den Temperaturverlauf im Reaktor für die Sole und die Luft während der Regeneration als Funktion der von der Sole abgelaufenen Strecke  $Z$ . Für diese Simulation wurde eine Soleaustrittskonzentration von 40 % erzielt. Davon ausgehend wurden die Soleeintrittskonzentration und die erforderliche Regenerationstemperatur für den low-flow bzw. für den high-flow Betrieb ermittelt.

In low-flow Betrieb erfolgt die Regeneration bei einer Temperatur von etwa  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Temperatur im Regenerator ist aber nicht wirklich konstant, wie in der Abbildung 3.4 (a) veranschaulicht. Im diesem Fall wird die Sole nicht vor der Austauschfläche erwärmt, sondern erst im Regenerator. Sie tritt oben mit einer Temperatur von  $25^\circ\text{C}$  ein und wird durch den indirekten Kontakt mit dem Heizwasser über die Plattenwände stark erwärmt. Dazu ist der Solemassenstrom sehr klein, seine Wärmekapazität ist dementsprechend sehr gering und er wärmt sich sehr schnell auf.



**Abbildung 3.4: Simulation des Temperaturverlaufs der Sole und der Luft während der Regeneration im low-flow (a) und high-flow (b) Betrieb**

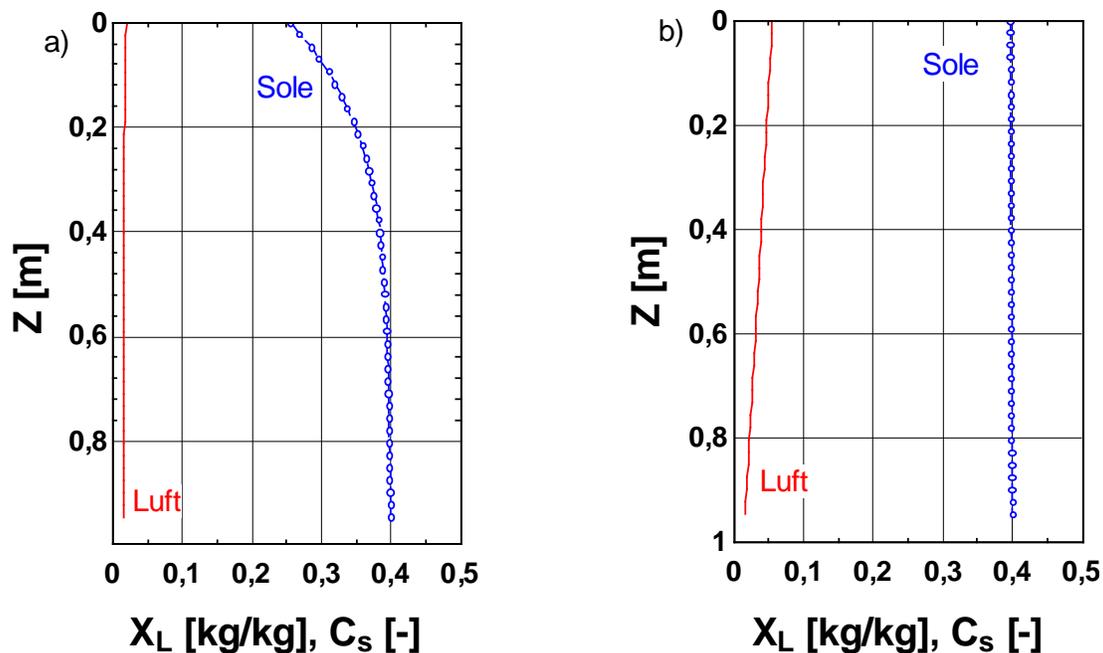
Die Temperaturschwankungen sind ebenfalls auf den geringen Wärmekapazitätsstrom der Sole zurückzuführen. Die Sole wärmt sich auf, gibt Wasser und Desorptionswärme über und

kühlt sich dabei wieder ab. Da die Wärmekapazität des Solestromes sehr gering ist, dauert es relativ lang bis sich ein Gleichgewicht zwischen Wärmeaufnahme über die Platten und Wärmeabgabe zum Wasserdampf einstellt. Die Luft tritt in den Regenerator von unten ein und wärmt sich bei der Regeneration auf.

Im high-flow Betrieb wird ebenfalls eine Soleaustrittskonzentration von 40 % erzielt. Die dafür eingestellte Regenerationstemperatur liegt bei 80 °C wie in der Abbildung 3.4 (b) veranschaulicht. Auf ihrem Weg im Regenerator kühlt sich die Sole leicht ab, da der Wasserdampf beim Desorbieren Wärme aufnimmt. Da der Solemassenstrom viel größer ist, sind keine Temperaturschwankungen zu sehen. Wie in low-flow Betrieb wärmt sich die Luft von unten nach oben auf. Solche Temperaturverläufe sind in einem Gegenstromapparat klassisch.

Die Profile des Wassergehalts sind in der Abbildung 3.5 dargestellt. Beim Luftstrom wurde die Luftbeladung als maßgebende Größe für den Wassergehalt gewählt, während die Konzentration der Sole ihren Wassergehalt angibt. Unter low-flow Bedingungen sieht man in der Abbildung 3.5 (a), dass sich die Solekonzentration im Regenerator stark ändert. Die Eintrittskonzentration liegt bei etwa 26 %. Die Solekonzentration nimmt dann um 14 % zu. Die Luftbeladung ändert sich dagegen kaum, da relativ viel Luft wenig Wasser aufnimmt.

Unter high-flow Bedingungen ist es genau umgekehrt (Abbildung 3.5 (b)). Die Solekonzentration ändert sich kaum. Eigentlich nimmt sie durch die Regeneration nur um etwas 0,3 % zu. Die Luftbeladung ändert sich dagegen viel mehr als unter low-flow Bedingungen.



**Abbildung 3.5: Simulation des Konzentrationsverlaufs der Sole und der Luft während der Regeneration im low-flow (a) und high-flow (b) Betrieb**

Aus den Temperatur- und Konzentrationsverläufen sieht man deutlich, dass die Regenerationstemperatur unter low-flow Bedingungen kleiner als unter high-flow

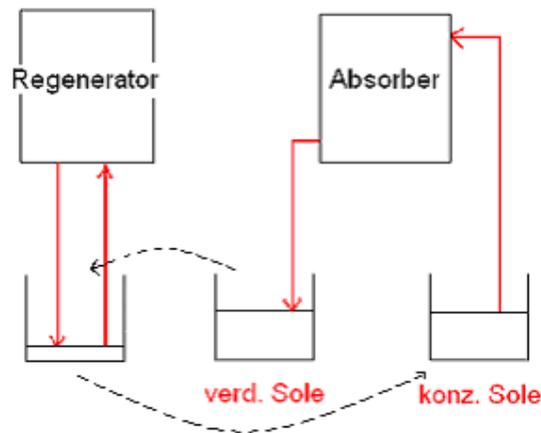
Bedingungen ist. Ist die Soleaustrittskonzentration auf 40 % fixiert, beträgt der Unterschied etwa 30 °C. Dagegen nimmt aber die Luft ungefähr 2 bis 3 Mal mehr Wasser auf als in low-flow Betrieb.

Neben der kleineren Regenerationstemperatur besitzt der low-flow Betrieb einen weiteren wichtigen Vorteil. Die durchschnittliche Solekonzentration im Regenerator liegt zwischen 26 und 40 %, und nicht bei 40 % wie unter high-flow Bedingungen. Da diese durchschnittliche Solekonzentration kleiner ist, ist der Wasserdampfpartialdruckunterschied zwischen Luft und Sole größer und der Wasserdampfaustausch erfolgt effizienter.

### 3.1.2.3 Batch-Regeneration / kontinuierliche Regeneration

In der Verfahrenstechnik kann ein Prozess oft in zwei verschiedenen Weisen durchgeführt werden, je nachdem ob das Produkt kontinuierlich behandelt wird oder nicht. Der Regenerationsprozess kann absatzweise (engl.: *Batch*) oder kontinuierlich betrieben werden. Wenn eine gewisse Menge an Sole regeneriert werden muss, besteht die Möglichkeit, diese Lösung im Kreislauf im Regenerator laufen zu lassen, bis sie die gewünschte Endkonzentration erreicht.

Die Regeneration läuft dann nach dem Prinzip, das in der Abbildung 3.6 beschreiben ist. Der Regenerator arbeitet mit einer Solemenge, die im Vergleich zu der Menge im Absorptionsprozess relativ klein ist. Wenn eine bestimmte Menge verdünnter Sole vorhanden ist, wird diese Menge dem Regenerationskreis zugeführt, in dem sie regeneriert wird, unabhängig davon ab, wie die Absorption weiterläuft.

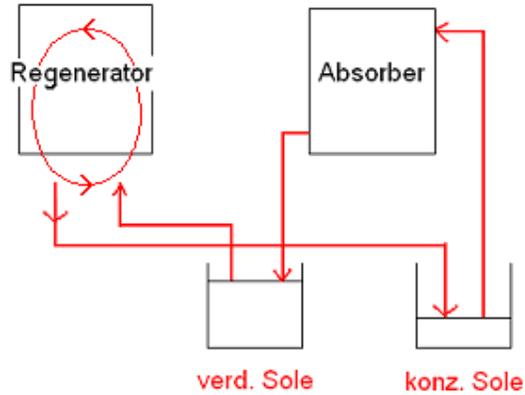


**Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der Batch-Regeneration, kontinuierliche Absorption**

Diese Entkopplung der Regenerations- und Absorptionskreise benötigt einen weiteren Tank für die Regeneration. Dieses Volumen ist aber relativ klein, sodass die Solemenge während der Regeneration eine ausreichende Endkonzentration im gegebenen Zeitraum erreicht. Da die Wärmeversorgung in diesem Prozess meistens diskontinuierlich (periodisch) erfolgt, muss die zu regenerierende Solemenge so gewählt werden, dass sie innerhalb einer Periode auf die gewünschte Konzentration gebracht werden kann. Im Fall von Solarkollektoren sollte dann zum Beispiel die Sonneneinstrahlung eines einzigen Tages ausreichen, um diese Solemenge

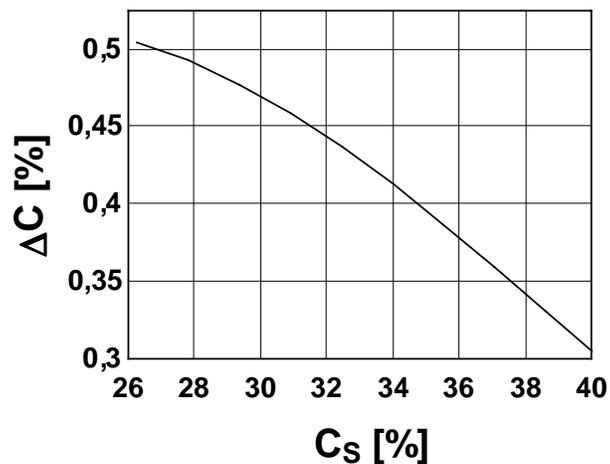
zu regenerieren. Eine genauere Auslegung des Regenerationsvolumens in Abhängigkeit der Wärmequelle sollte durchgeführt werden.

Im Fall der kontinuierlichen Regeneration läuft der Prozess wie in der Abbildung 3.7 dargestellt. Vor dem Regenerator mischt man frische Sole mit dem Hauptsolestrom, der die Regenerationswärme mitbringt. Die resultierende Mischungsmenge hat eine Solekonzentration, die ungefähr gleich der Konzentration des Hauptstromes ist.



**Abbildung 3.7: Schematische Darstellung der kontinuierlichen Regeneration, kontinuierliche Absorption**

Wie in der Abbildung 3.5 (b) gesehen, ist die Konzentrationszunahme im Regenerator sehr gering in high-flow Betrieb. Damit aufkonzentrierte Sole kontinuierlich abgeführt werden kann, muss dann die Solekonzentration des Hauptstromes hoch sein, sie liegt ungefähr bei 40-42 %. Die mittlere Konzentration im Regenerator ist damit höher als bei der Batch-Regeneration, und die Effizienz des Prozesses dementsprechend kleiner. Die Abbildung 3.8 veranschaulicht die Abhängigkeit des Konzentrationssprunges im Regenerator  $\Delta C$  als Funktion der mittleren Solekonzentration im Regenerator  $C_S$ .



**Abbildung 3.8: Konzentrationssprung im Regenerator in Funktion der mittleren Solekonzentration im Regenerator**

Liegt die mittlere Solekonzentration bei 40 %, dann ist die treibende Kraft der Desorption schwächer und der Prozess ist weniger effizient. Diese Abbildung kann auch als eine Darstellung der spezifische Leistung des Regenerators in Funktion der durchschnittliche Solekonzentration im Apparat angenommen werden. Bei der Batch-Regeneration durchläuft die Konzentration der Sole den gesamten Konzentrationsbereich. Beim kontinuierlichen Prozess muss die Regeneration bei der angestrebten Endkonzentration erfolgen. In diesem Fall ist die spezifische Leistung des Regenerators bei gegebener Regenerationstemperatur kleiner.

Zusammengefasst ist bei der Batch-Regeneration ein zusätzlicher Tank notwendig. Der ist aber relativ klein im Vergleich mit den Speichertanks, denn im Fall des solaren Betriebes wird die Sonneneinstrahlung über mehrere Stunden gespeichert und die Speichertanks für die regenerierte Sole müssen dann relativ groß sein. Da die Regeneration bei niedrigeren mittleren Konzentrationen erfolgt, ist doch die Batch-Regeneration eine sehr interessante Alternative zum kontinuierlichen Prozess.

## **3.2 Stoffaustauschkolonne**

### **3.2.1 Simulationsmodell**

Das Modell zur Simulation und Dimensionierung der Stoffaustauschkolonne ist dem Monokanalmodell sehr ähnlich. Es wurde angenommen, dass das Luft-Sole-Massenverhältnis den Wert hat, der in der Monokanalsimulation ermittelt wurde. Die auszulegende Leistung der Kolonne wurde auf 200 kW gesetzt.

Um eine solche Leistung zu erreichen muss ein gesamter Solenmassenstrom von 27.375 kg/h durch das Apparat laufen. Die Extrapolation für einen großen Solemassenstrom erfolgt relativ leicht. Ausgehend von den durch Simulation gewonnenen Daten konnte eine Packungskolonne in Zusammenarbeit mit der Firma Sulzer dimensioniert und ein Preisangebot eingeholt werden.

Nach Fumo et al. sind die prinzipiellen Auslegungsvariablen einer Stoffaustauschkolonne zur Regeneration von Lithiumchlorid die folgenden (Fumo et al., 2002):

- das Massenverhältnis zwischen Luft und Sole
- die Soletemperatur
- die Solekonzentration

Für die Modellierung der Kolonne wurde eine Betriebstemperatur von 80 °C angenommen, sowie eine Konzentration der Sole von 42 %, die im Kreislauf zirkuliert. Das Massenverhältnis beträgt wie vorher 0,2.

### **3.2.2 Ergebnisse der Simulation**

Die Hauptergebnisse der Dimensionierung und Auslegung der Kolonne sind in der Tabelle 3.1 zusammengefasst.

**Tabelle 3.1: Hauptergebnisse der Dimensionierung und Auslegung einer Stoffaustauschkolonne zur LiCl-Regeneration**

Leistung	200 kW
Solemassenstrom	27.375 kg/h
Luftmassenstrom	5.475 kg/h
Massenverhältnis	0,2
Packung	Geordnete Packung aus PP
Spezifische Austauschfläche der Packung	250 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Durchmesser der Kolonne	0,9 m
Höhe der Packung	2,1 m
Betriebstemperatur	60-80°C
Betriebsdruck	Umgebungsdruck
Druckverlust	2,67 mbar
Preis (gesamt)	30.000 Eur.

Die Packung ist keine Füllkörperpackung sondern eine geordnete Packung. Die Vorteile einer geordneten Packung über eine Füllkörperpackung sind die folgende:

- geringerer Druckverlust
- größere spezifische Austauschfläche
- besseren Stoffaustausch

Der Richtpreis für die Packungen in Polypropylen, den Verteiler in PVDF und den Tragrost in Glasfaserkunststoff für eine Kolonne mit einem Innendurchmesser von 0,9 m beträgt ca. 13.000 EUR.. Rechnet man dazu noch den Kolonnenmantel und weitere Einrichtungen wie zum Beispiel den Wärmetauscher, die Solepumpe, die Verrohrung, ... dann kommt man auf den Wert von ca. 30.000 EUR. für die Regenerationskolonne. Der Kolonnenmantel könnte aus Glasfaserkunststoff oder sogar Polypropylen gebaut werden. Die gesamte Kolonne würde dann ungefähr 800 kg wiegen.

Eine ungeordnete Packung aus Kunststoff wäre vielleicht auch einsetzbar, aber da die Firma Sulzer keine Füllkörper aus Kunststoff anbietet, ist diese Möglichkeit nicht weiter untersucht worden. Aus diesem Angebot ausgehend soll entschieden werden, ob ein Plattenaustauscher im Vergleich zu einer Kolonne sich lohnt bezüglich der Effizienz und des Preises.

## 4 Aufbau des Monokanals

Der Monokanalversuchsstand besteht aus einem Gehäuse, in das der Prüfling, ein Austauschkanal, eingebaut wird, sowie aus Versorgungseinrichtungen, mit denen die Medien Luft, Sole und ggf. Kühl- oder Heizwasser dem Prüfling zugeführt werden können.

### 4.1 Prüflingsaufbau

Der Prüfling besteht aus mehreren Komponenten: Austauschplatten, Soleverteiler, Tropfenabscheider und Stabilisatorplatten aus Holz, die im Folgenden beschrieben werden. Die genauen Abmessungen der Austauschplatten, der Holzplatten und des Verteilers sind im Anhang zu finden.

#### 4.1.1 Austauschplatten

Die Austauschplatten sind aus Polypropylen hergestellt. Polypropylen hat mehrere Vorteile: Es ist solebeständig, hält bis zu einer Betriebstemperatur von 80 °C relativ gut, und vor allem ist sehr billig. Polycarbonatplatten könnten auch eingesetzt werden, die mit einer 2- $\mu$ m dicken Wasserspreitenden Schicht beschichtet werden (von Oelsen, 2001). Diese Platten werden aber hier nicht untersucht.

Die Polypropylenplatten wurden von der Firma L-DCS Technology GmbH bereit gestellt. Die Austauschplatten sind Doppelstegplatten, wie in der Abbildung 4.1 dargestellt.



**Abbildung 4.1: Doppelstegstruktur der Austauschplatten.**

Diese Struktur verleiht den Platten eine hohe Festigkeit. Im Absorptionsbetrieb zirkulierte Kühlwasser in den Kanälen um die Absorptionenthalpie abzuführen. Für die Regeneration ist eine Soleaufwärmung durch Wärmeübertragung über die Plattenwände aber nicht geeignet, da die Platten bei 80°C leicht weich und vor allem undicht werden.

Die Austauschplatten sind mit einem Vlies bedeckt, wie es in der Abbildung 4.2 zu sehen ist. Da Polypropylen hydrophob ist, benetzt die Sole die Austauschfläche sehr schlecht. Das Vlies sorgt für eine bessere Benetzung der Platte.



**Abbildung 4.2: Aufnahme einer Polypropylen-Doppelstapplatte mit Vlies beschichtet**

Ein Problem, das eingetreten ist, ist dass sich das aufgeklebte Vlies beim Schneiden der Platten sehr leicht ablöste. Das Vlies musste dann wieder an die Platte geklebt werden. Das erfolgte teilweise mit Sprühkleber, und teilweise durch ein leichtes Verschmelzen des Vlieses mit der Platte mit Hilfe eines Engel-Cutters.

Leider reicht das Vlies nicht immer um eine optimale Benetzung zu gewährleisten. In seiner Dissertation hat von Oelsen die Benetzung von Stoffaustauschplatten mit einer Solelösung untersucht (von Oelsen, 2001). Die Platten sind ebenfalls aus Polypropylen und mit einem Vlies bedeckt. Die Abbildung 4.3 zeigt wie sich Kanäle beim Strömen bilden. Die transparente Sole wurde gefärbt um dieses Vorkommen zu veranschaulichen.



**Abbildung 4.3: Bildung von Kanälen beim Soleströmen auf Polypropylenplatten, die mit einem Vlies beschichtet sind**

Diese Kanalströmung passiert aber nicht mehr, wenn die Platten zunächst vollständig benetzt werden. Um die Platten vollständig zu benetzen empfiehlt von Oelsen, einen hohen Solemassenstrom auf die Platte einige Minuten strömen zu lassen, bevor den optimalen Massenstrom einzustellen. In high-flow ist die Überflutung schon mit dem nominalen Solemassenstrom beinah erreichbar.

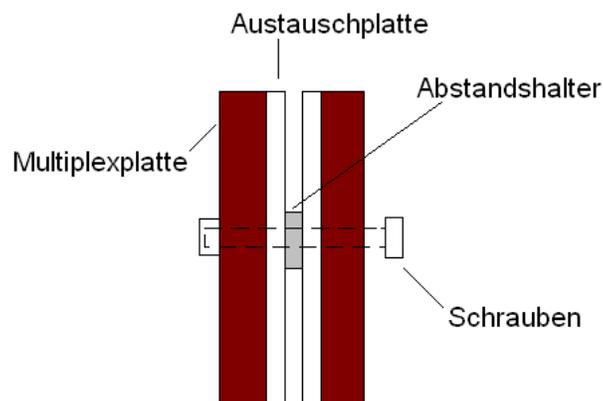
#### 4.1.2 Zusammenbau der Versuchsplatten

Der Abstand zwischen den Polypropylenplatten sollte möglichst klein gehalten werden, damit beim Bau eines Plattenaustauschers weniger Platz gebraucht wird. Beim Reduzieren des Abstands zwischen den Platten von 5 auf 4 mm wird die spezifische Austauschfläche von  $221\text{m}^2/\text{m}^3$  auf  $250\text{m}^2/\text{m}^3$  gesteigert, und der Platzverbrauch für eine gewisse Austauschfläche um mehr als 10 % reduziert.

Ein Abstand kleiner als 4 mm war nicht möglich, da der Verteiler, der zwischen den Platten eingebaut wird, schon eine Dicke von 3 mm hat. Der Verteiler wird an den Austauschplatten nicht fixiert, sondern durch Pressung der Platten aufeinander festgehalten. Um die Gefahr zu vermeiden, dass die Sole nicht mehr aus dem Verteiler fließt, wenn die Platten zu stark aneinander gepresst sind, werden auf der Verteileroberfläche kleine Pappeabschnitte geklebt, die einen Abstand von 0,5 mm zwischen dem Verteiler und den Austauschflächen beidseitig gewährleisten, ohne die Soleverteilung zu beeinträchtigen. Somit ist die minimale Spaltbreite zwischen den Platten 4 mm.

Um diesen Abstand auf der gesamten Austauschfläche zu gewährleisten wurden 4 mm dicke PVC Scheiben geschnitten. Diese Abstandshalter sind kreisförmig mit einem Durchmesser von 10 mm. Die Schrauben, die die Platten miteinander verbinden, werden durch diese PVC-Scheiben geschraubt, damit sie nicht in Kontakt mit der herabströmenden Sole kommen. Die Schrauben sind nämlich metallisch und würden beim Kontakt mit der Sole verrosten.

Um zu vermeiden, dass sich die Polypropylenplatten bei einer Temperatur von  $80^\circ\text{C}$  verformen, werden sie an Holzplatten befestigt. Die Multiplexholzplatten wurden gewählt, da sie eine höhere Feuchtigkeit ertragen können. Diese Holzplatten verleihen dem Prüfling die erforderliche Steifigkeit, damit er während der Versuche fest hält. Die Holzplatten werden an den PP-Platten mit denselben Schrauben geschraubt, die die Austauschplatten aneinander fixieren. Die Abbildung 4.4 stellt einen Schnitt dieser Verbindung dar.



**Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der Verbindung zwischen Holzplatten, Polypropylenplatten und Abstandshalter**

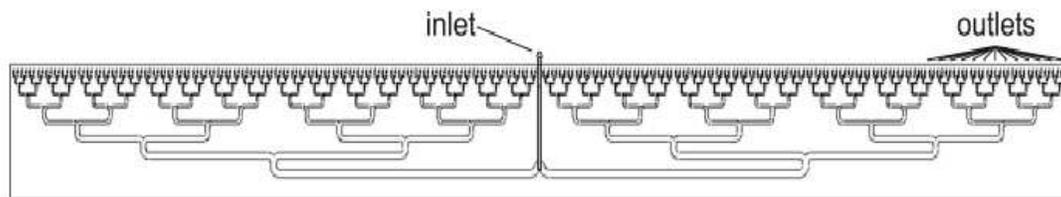
Die Baugruppe aus Multiplexplatten und Polypropylenplatten wurde dann in einen PP-Rahmen eingebaut. Dieser Rahmen wird in das Gehäuse geschraubt und hält somit die Austauschplatten im Gehäuse fest.

Um das Fließen der Sole in die Kanäle der Doppelstegeplatten zu verhindern, sind diese Kanäle mit Silikon verstopft worden. An der Frontseite, da wo die Luft in die Platten einströmt, wurden die Kanäle mit Klebband bedeckt. Mit dem Klebband konnten gleichzeitig die PP-Platten dicht an die Holzplatten gedrückt werden, damit keine Luft zwischen den Holzplatten und den PP-Austauschplatten strömt.

#### 4.1.2 Verteiler

Vom Anfang des Projektes am ZAE Bayern an stellte eine regelmäßige Verteilung der Sole auf die Versuchsplatten eine technische Herausforderung dar. Schon in 1993 wurde das Thema am ZAE Bayern in einem Bericht erwähnt (Lävemann et al., 1993). Besonders bei der Absorption im low-flow Betrieb ist eine homogene Verteilung wesentlich, um eine hohe Effizienz des Absorbers zu ermöglichen und damit eine hohe Energiespeicherdichte in der Lithiumchloridlösung. In diesem Fall ist der Soledurchsatz so klein, dass die Benetzung der Oberfläche von der Verteilung stark abhängig ist.

Aus dieser Perspektive wurde ein Bisektionsverteiler am ZAE Bayern entwickelt, der in der Abbildung 4.5 dargestellt ist. In diesem Verteiler teilt sich der Solestrom bei jeder Abzweigung in zwei. Davon ausgehend ist eine Optimierung der Soleverteilung für den low-flow Betrieb von Landspersky im Rahmen seiner Diplomarbeit durchgeführt worden (Landspersky, 2006).

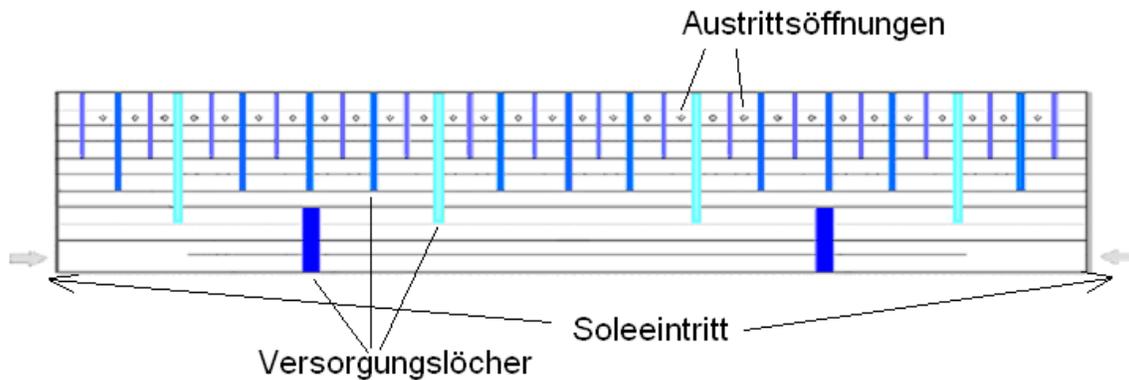


**Abbildung 4.5: Darstellung eines Bisektionsverteilers für den low-flow Betrieb**

In dieser Arbeit musste jetzt der low-flow Verteiler für die high-flow Bedingungen der Regeneration angepasst werden. Obwohl die Verteilung im high-flow Betrieb weniger kritisch als in low-flow ist, waren mehrere Versuche notwendig, um eine regelmäßige Verteilung der Solelösung zu erreichen. Die Endgültige Version des high-flow Verteilers ist in den Abbildungen 4.6 und 4.7 zu sehen.



**Abbildung 4.6: Aufnahme eines Abschnittes des high-flow Verteilers**



**Abbildung 4.7: schematische Darstellung des high-flow Verteilers**

Der Verteiler ist aus einem Abschnitt einer 3mm-dicken PP-Doppelstegplatte gebaut worden. Die Sole strömt in die unteren Kanäle ein und verteilt sich auf ihrem Weg nach oben zum Austritt. Um die Zuführung der Sole dicht zu machen, wurden Verbindungsteile der Firma EM-Technik eingesetzt, die durch das Zusammenschrauben dicht und druckfest sind. Die Abbildung 4.8 stellt die Eintrittsstülle für die Sole in den Verteiler dar.



**Abbildung 4.8: Aufnahme der Eintrittsstülle für das Soleeinströmen in den Verteiler**

Die Fertigung des Verteilers war relativ aufwändig. Um die Versorgungs- und Auslasslöcher zu bohren wurden zwei Methoden eingesetzt. Zunächst wurde probiert, Löcher mit einem Heißdraht zu bohren, der das Polypropylen zum Schmelzen bringt. Die Ergebnisse waren aber nicht zufriedenstellend, da die Löcher nicht regelmäßig geschmolzen werden konnten. Stattdessen wurden dann die Löcher gebohrt. Die Versorgungsbohrungen haben einen Durchmesser von knapp 3 mm und die Austrittsöffnungen von 1,4 mm.

Nachteilig beim Bohren ist, dass oft Polypropylengrate stehen bleiben. Um diese zu entfernen wird durch die Löcher mit einem Eisendraht so durchgedrungen, dass die Grate abgeschnitten werden. Für die Serienfertigung müsste aber eine bessere Methode gefunden werden. Eine Möglichkeit wäre es, die Löcher mit Hilfe eines Lasers zu bohren aber da diese Methode eine besondere Technologie erfordert, wurde diese Lösung nicht untersucht.

Im Gegensatz zum low-flow Verteiler ist der high-flow Verteiler nicht Teil der Platten, sondern ist er eine eigenständige Komponente und wird zwischen den Platten eingebaut. Die Austrittsöffnungen lassen die Sole auf beiden Seiten herausströmen, damit sich Sole auf die beiden Platten verteilt.

### 4.1.3 Tropfenabscheider

Es ist geplant, dass die Sole auf den Platten herab fließt und sich am Boden des Gehäuses sammelt. Dort wird sie von der Solepumpe über Polypropylenrohrleitungen abgesaugt. Da Luft aber über die Oberfläche der Platten strömt, besteht das Risiko, dass Soletropfen vom Luftstrom mitgerissen werden, und überall in das Gehäuse spritzen. Um das zu vermeiden wurde einen Tropfenabscheider gebaut.

Der Tropfenabscheider besteht aus drei halben PVC-Rohren am ende des Austauschkanals, die den Luftstrom umlenken. Durch diese Umlenkung lagern sich die Soletropfen an der Oberfläche der Halbrohre ab, und fließen dann den Tropfenabscheider entlang zum Boden des Gehäuses.

Die Abbildung 4.9 zeigt diesen Tropfenabscheider und den fertigen Prüfling vor seinem Einbau in das Gehäuse.

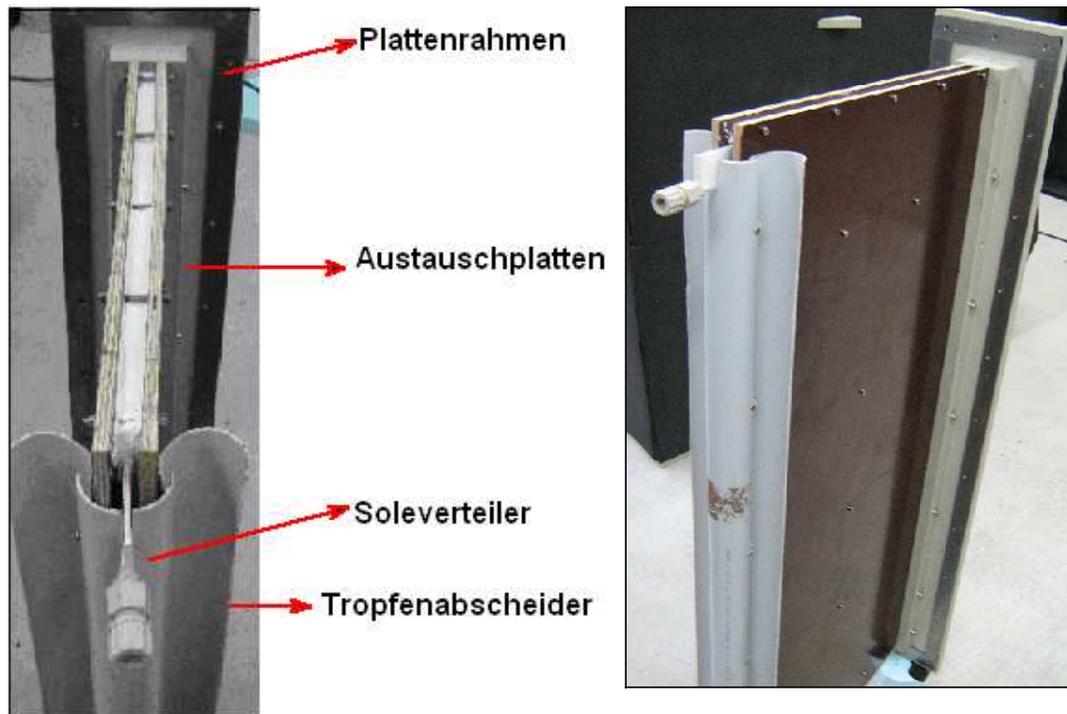
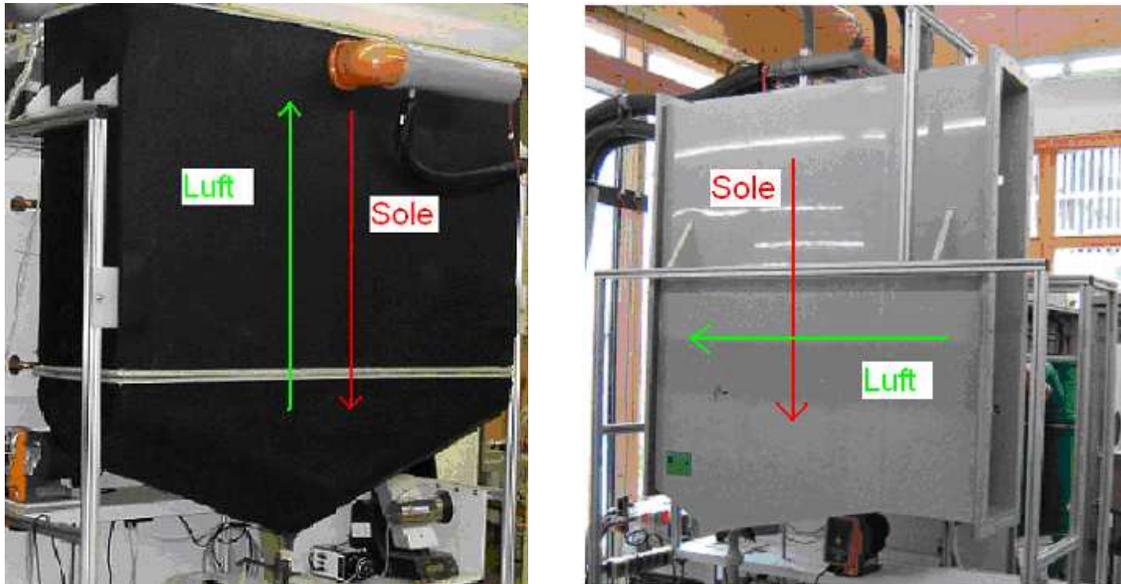


Abbildung 4.9: Aufnahme des fertigen Prüflings

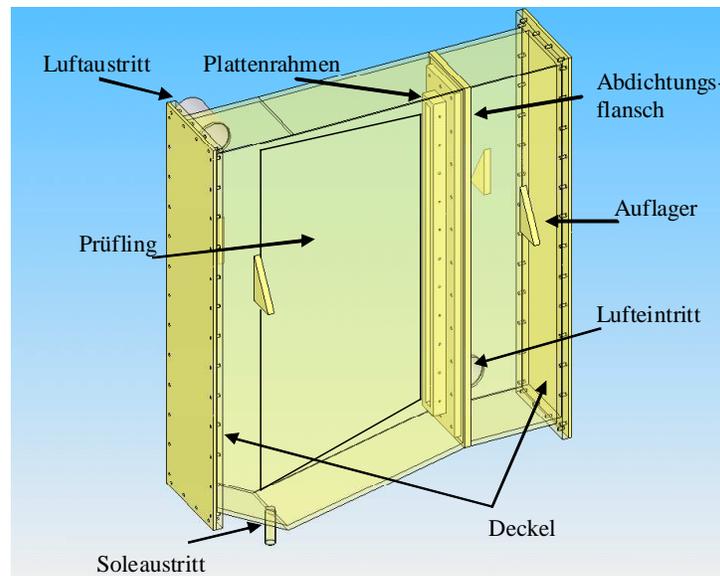
## 4.2 Gehäuse

Das alte, für die low-flow Technik vorgesehene Gehäuse war so gebaut, dass die Stoffströme im Gegenstrom den Apparat durchströmten, wie in der Abbildung 4.10 links veranschaulicht. Da die Luft von unten kam und nach oben strömte sind die Austauschplatten von oben eingebaut worden. Der Deckel und der Boden waren vom Gehäuse abtrennbar.



**Abbildung 4.10: Aufnahme des alten Gehäuses (links) und des neuen Gehäuses (rechts) mit schematischer Darstellung des Strömungsrichtungen**

Im neuen Monokanal strömt die Luft von der Seite ein und dann im Kreuzstrom zur Sole wie in der Abbildung 4.10 rechts dargestellt. Die Öffnungen des neuen Gehäuses befinden sich an den Seiten. Die Abbildung 4.11 zeigt das Gehäuse und Zubehör, das von der Firma E. Wühr Kunststofftechnik GmbH aus Polypropylen gebaut worden ist. Der Plattenrahmen ist Teil des Prüflings und hält die Platten im Gehäuse fest. Der Abdichtungsflansch sorgt dafür, dass die Luft in den linken Teil des Gehäuses nur über den Austauschkanal des Prüflings einströmen kann. Die Auflager werden auf Item-Profile gelegt zum suspendieren des Gehäuses.



**Abbildung 4.11: Technische Zeichnung des Gehäuses und Zubehör**

Das Gehäuse wurde nachträglich mit einer 4 cm-Schicht Armaflex-Dämmstoff isoliert, um die Wärmeverluste zu reduzieren. Die Isolierung ist dafür da, dass eine Energiebilanz um den Apparat möglichst genau gemessen werden kann. Die Polypropylendeckel werden mit einem Armaflexdeckel isoliert. Diese Lösung hat den Vorteil, dass sich das Gehäuse leicht wieder öffnen lässt.

### 4.3 Integration in eine bestehende Versuchsanlage

Der Regenerator soll in die gleiche Anlage eingebaut werden, die zum Vermessen des Absorbers benutzt wurde. Der Absorber wurde daher abgebaut und stattdessen wurde der Regenerator auf dem Aluminiumrahmen aufgelegt. Die Struktur des Aluminiumrahmens besteht aus Item-Profilen, die durch ihre modulare Bauweise ein Umbauen sehr leicht machen.

Die Itemstruktur wurde an den Regenerator angepasst. Die Abbildung 4.12 zeigt wie die fertige Anlage aussieht. Der oberste Itemrahmen dient zum Aufhängen des Wärmetauschers, der im rechten Teil des Gehäuses eingebaut wird. Der Wärmetauscher dient zur Erhitzung der Sole auf die gewünschte Regenerationstemperatur. Er befindet sich in dem Gehäuseteil, in den die Luft einströmt und ist an einen Heizwasserkreislauf angeschlossen.

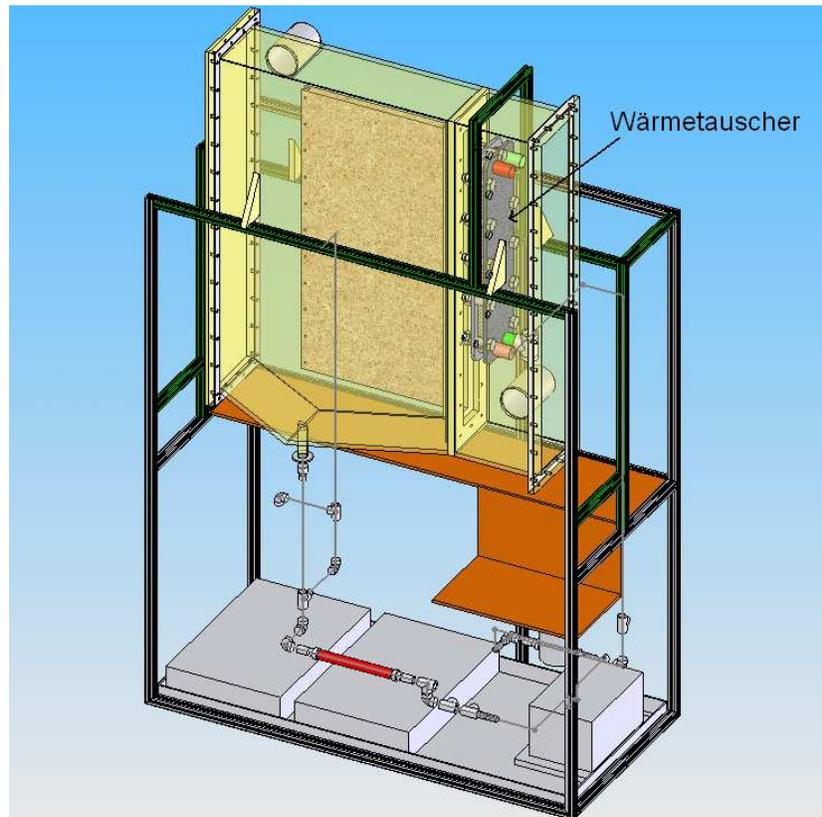


Abbildung 4.12: Technische Zeichnung des fertigen Monokanals

Der Wärmetauscher hängt am Item-Rahmen an zwei Gewindestange aus Edelstahl, die durch das Dach des Gehäuses laufen. Da der Wärmetauscher aus Titan ist, verrostet er durch Kontakt mit der Sole nicht. Dieser Wärmetauscher wurde als Sonderfertigung für ein ehemaliges Projekt des ZAE Bayern hergestellt.

Im linken Teil des Gehäuses sind die Austauschplatten dank dem Plattenrahmen fest im Gehäuse fixiert. Der Plattenrahmen ist am Abdichtungsflansch mit Edelstahlschrauben befestigt. Ähnlicherweise werden die Deckel an das Gehäuse geschraubt. Um die Deckel am Gehäuse dicht zu fixieren wird Silikon benutzt.

Damit man keine Gewindemutter für die Fixierung der Deckel und des Plattenrahmens braucht, wurden drei Metallrahmen an das Gehäuse geschraubt, in die Gewinde geschnitten wurden. So beschädigt die Fixierung die Isolierungsschicht der Gehäuse nicht und das Schrauben ist viel einfacher.

## 5 Stoffkreisläufe

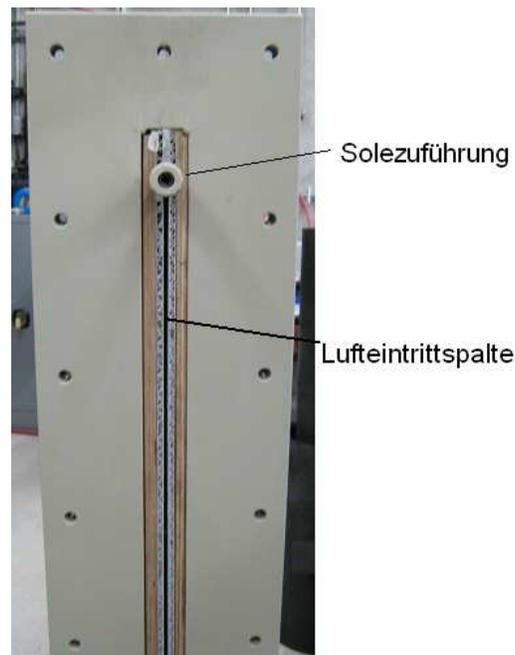
Der Soleregenerator ist eigentlich nichts anderes als ein Stoff- und Wärmetauscher. Stoffaustausch findet zwischen der Sole und der Luft statt. Wärme wird hauptsächlich zwischen Heizwasser und Sole ausgetauscht. Es bestehen dann drei Stoffkreisläufe, die miteinander im Regenerator gekoppelt sind:

- Sole-
- Luft-, und
- Heizwasserkreislauf

### 5.1 Luftkreislauf

Für den alten Versuchstand gab es schon einen Luftkreislauf. Eine Luftheizung und ein Befeuchter sind vorhanden um tropischen Bedingungen zu simulieren. Der alte Kreislauf ist vom Lampe entwickelt und beschrieben worden (Lampe, 2003). Dieser Luftkreislauf musste nur leicht umgebaut werden, damit die Luft jetzt im Kreuzstrom statt im Gegenstrom strömt.

Die Luft wird über PP-Abwasserrohre, so genannte KG-Rohre, in das Regeneratorgehäuse geführt. Das Gehäuse ist durch einen dicken Flansch in zwei Teilen geteilt. Die Luft strömt in den Teil ein, wo sich der Wärmetauscher befindet. Der Flansch muss luftdicht sein, damit die Luft von der ersten Gehäuseabteilung in die zweite Abteilung nur über den Austauschkanal des Prüflings strömt, wie in Abbildung 5.1 dargestellt.



**Abbildung 5.1: Frontseite des Austauschkanals, Lufteintritt**

Nach Durchströmen des Austauschkanals tritt die Luft in den zweiten Teil des Gehäuses. Über ein angeschlossenes Abwasserrohr wird sie an die Umgebung abgeführt.

## 5.2 Wasserkreislauf

Ein Wasserkreislauf war für den alten Monokanal auch vorhanden. Im Absorberbetrieb wurde Kühlwasser durch die Kanäle der Doppelstegplatten geführt, um die freiwerdende Absorptionenthalpie abzuführen. Das Wasser konnte aber auch geheizt werden, da die Anlage auch für den Regenerationsbetrieb vorgesehen war.

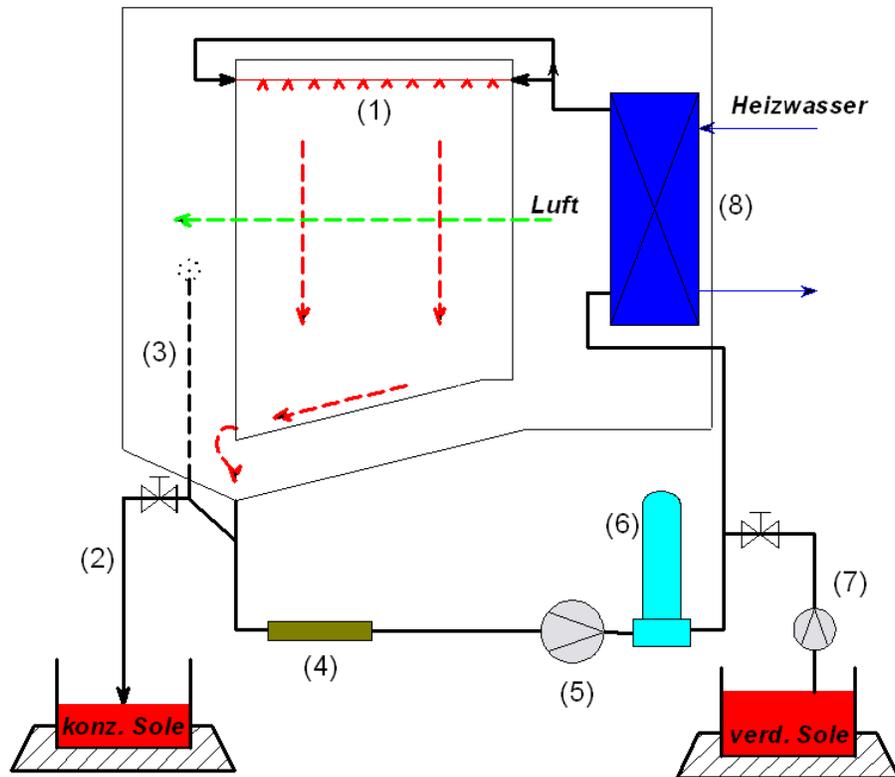
Die Wasserleitungen sind aus Kupfer. Sie wurden nur leicht umgebaut, in dem sie an den Wärmetauscher angeschlossen wurden. Die Schraubfittings zum Anschluss am Wärmetauscher bestehen aus Rotguss, da Rotgussteile kleiner als Messingteile sind, und dementsprechend besser in das Regeneratorsgehäuse passen.

Der Überdruck im Wasserkreislauf beträgt 0,2 bar. Undichtigkeiten sind nicht aufgetreten, was einen großen Vorteil gegenüber dem früheren Plattenheizungssystem darstellt.

## 5.3 Solekreislauf

Der ehemalige Solekreislauf war für einen Solenmassenstrom von 0,2 bis 0,3 kg/h ausgelegt. Im neuen Apparat sollen 185 kg/h im Kreislauf strömen, also fast 1000-mal mehr. Dafür musste ein Rohrleitungssystem gebaut werden, da die Solezuführung bisher nur über Schläuche erfolgte. Die Rohren sind aus Polypropylen, da sich Metall wegen der Korrosionskraft der Sole überhaupt nicht eignet.

Durch den größeren Massenstrom ist der Druck höher und Rohre halten Druck besser als Schläuche. Der Druck im Solekreislauf beträgt ungefähr 1 bis 2 bar im nominalen Betrieb. Der Druck wurde mit Wasser geprüft. Er konnte mit Sole nicht gemessen werden, da das Manometer Metallanschlüsse besitzt. Die Abbildung 5.2 stellt die neuen Kreisläufe schematisch dar.



**Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Stoffkreisläufe im neuen Versuchstand**

Der Verteiler verteilt die Sole auf die Austauschplatten (1). Die Sole fließt dann auf die Platten im Kreuzstrom zur Luft herab, wird unten aufgefangen und strömt in die PP-Leitungen. Ein Teil der konzentrierten Sole wird in (2) entnommen. Die gewünschte Konzentration liegt dabei bei 42%.

Diese Entnahme der aufkonzentrierten Sole erfolgt nicht aktiv. Die Sole läuft über einen freien Auslauf, der offen zur Umgebung (3) ist. Die Entlüftungsleitung (3) ist an dem Gehäuse angeschlossen, um eventuelles Überlaufen der Sole zu verhindern. Mit diesem freien Auslauf soll der Pegel in den Rohrleitungen am Niveau des Auslaufs konstant gehalten werden.

Der Hauptteil des Lithiumchlorids strömt aber weiter durch einen statischen Mischer (4), der isotrope Verhältnisse für die Temperatur und Konzentrationsmessung schafft, und wird von einer solebeständigen Verdrängerpumpe (5) weiter gefördert. Da die Pumpe eine Pulsation im geförderten Strom verursacht ist ein Druckausdehnungsgefäß (6) eingebaut worden, der diese Vibrationen dämpft. Als Druckausdehnungsgefäß wurde ein ehemaliges Filtergehäuse eingesetzt. Ein neuer Filter wurde beschaffen, um eine grobe Filtration der Sole durchzuführen. Ein Nachteil von offenen Systemen ist die Gefahr der Verunreinigung der Sole durch Kontakt mit der Umgebung. Der Filter sollte eine Verschmutzung der Sole vorbeugen, und damit ein Verstopfen des Soleverteilers verhindern.

In (7) wird die frische verdünnte Sole zudosiert. Die Dosierung erfolgt mit Hilfe einer solebeständigen Membranpumpe. Die gesamte Solemenge strömt dann zum Wärmetauscher

(8), in dem sie auf 80 °C wieder aufgewärmt und wiederum auf die Platten verteilt wird, damit der Kreislauf wieder anfangen kann.

Der Simulation nach, müssen ungefähr 9 kg/h frische Sole zudosiert werden, wenn insgesamt 185 kg/h Sole das System durchströmen. Es wurde für die verdünnte Sole eine Konzentration von 27 % angenommen. Ebenfalls werden in stationärem Betrieb 9 kg/h konzentrierte Sole aus dem System in (2) entnommen, oder eher ein bisschen weniger, da die konzentrierte Sole weniger Wasser enthält. Die konzentrierte Sole hat eine Konzentration von ungefähr 42 %.

Der Konzentrationsprung im Regenerator beim high-flow Betrieb ist sehr gering, er beträgt ungefähr 0,35%. Der Hauptteil der Solemenge, die im Kreislauf zirkuliert, muss dann eine Konzentration von 41,65 % haben, damit die regenerierte Lösung eine Konzentration von 42 % erreicht.

## 6 Messtechnik

### 6.1 Ziel der Messungen

Die grundlegende Gleichung für die Absorption bzw. Desorption im Monokanal ist die Gleichung (6.1)

$$\dot{m}_{WD} = -\beta \cdot A \cdot f_{wet} \cdot (\rho_{WD} - \rho_{WD}^*) \quad \text{Gleichung (6.1)}$$

Im Vergleich mit der Gleichung (2.11) wurde der Benetzungsfaktor  $f_{wet}$  hinzugefügt, der den Anteil der mit Sole benetzten Austauschfläche angibt. Bei der Vermessung kann dieser Benetzungsfaktor nicht einzeln gemessen werden, sondern es muss das Produkt  $\beta \cdot f_{wet}$  experimentell ermittelt werden. Das Produkt  $\beta \cdot f_{wet}$  kann als Qualitätsmaß für die Austauschfläche verwendet werden. Es dient zur Berechnung der Austauschleistung unter bekannten Betriebsbedingungen. Zusammengefasst charakterisiert diese Leistung die Effizienz des Monokanals.

Da die Partialdichte von Wasserdampf aber nicht direkt messbar ist, wird die Gleichung (6.1) umgeformt. Es ergibt sich die Gleichung (6.2), unter der Annahme, dass die gemessene Luftdichte und die Luftdichte beim Gleichgewicht zwischen Sole und Luft ungefähr gleich sind.

$$\dot{m}_{WD} = -\beta \cdot A \cdot f_{wet} \cdot \rho_L \cdot (X_L - X_L^*(C, T)) \quad \text{Gleichung (6.2)}$$

In der Gleichung (6.2) ist der Wassergehalt der Luft  $X_L$  durch Taupunkttemperaturmessung in der Luft experimentell bestimmbar. Die Gleichgewichtsbeladung  $X_L^*$  ist nur von der Soletemperatur und Solekonzentration abhängig. Dieser Zusammenhang wurde in früheren Arbeiten experimentell bestimmt. Die Austauschfläche ist bekannt, sie beträgt 0,99 m<sup>2</sup>. Der Wasserdampfmassenstrom wird an der Luftseite sowie an der Soleseite gemessen.

Obwohl das Gehäuse eine dicke Isolierungsschicht besitzt, treten geringe Wärmeverluste an die Umgebung auf. Diese werden in separaten Experimenten bestimmt und bei der Analyse der Regenerationsveruche zur Korrektur der Energiebilanz am Austauschkanal eingesetzt.

### 6.2 Messstellen

Die Abbildung 6.1 stellt alle Messstellen dar, die zum Vermessen der Effizienz einer Austauschfläche in den Monokanal eingebaut wurden.

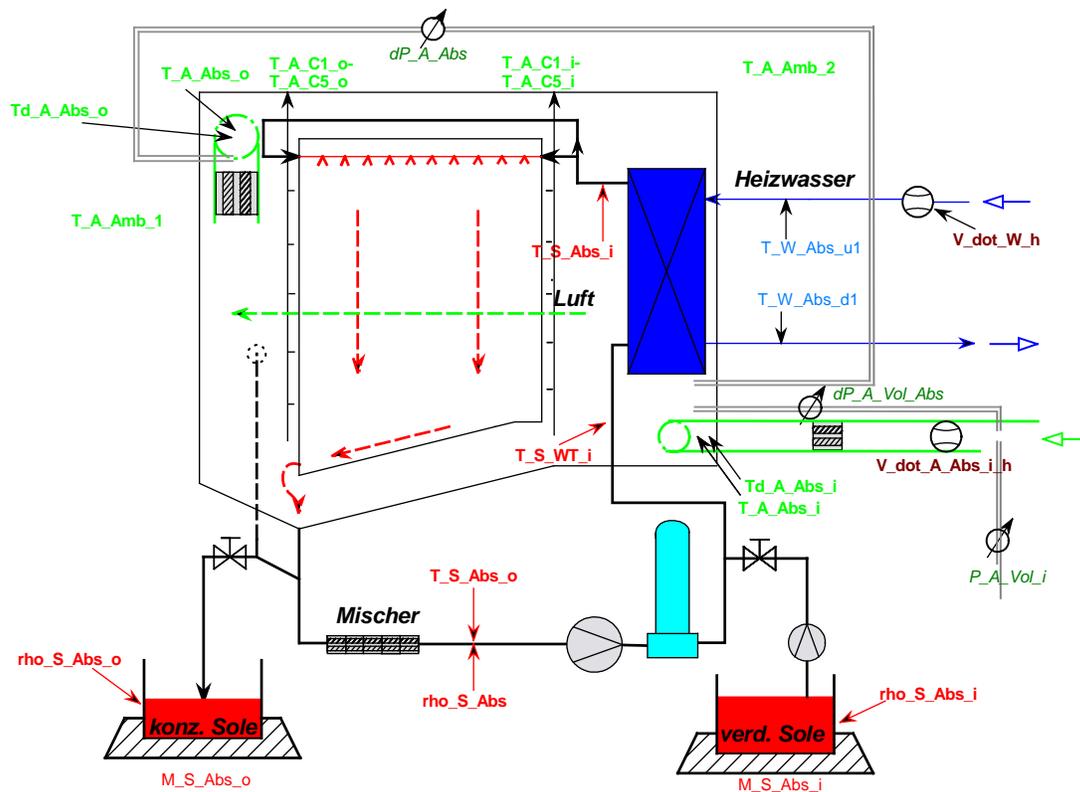


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des Monokanals und der eingebauten Messstellen

Die Tabelle 6.1 listet diese Messstellen auf und enthält für jede Messstelle Namen und kurze Beschreibung.

Tabelle 6.1: Messstellens am Monokanal

Name	Bezeichnung	Einheit	Messfühler
<b>1. Umgebung</b>			
P_A_Amb	Absolutdruck Umgebung	Pa	Wetterstation
T_A_Amb_1	Fühler, Außentemperatur	°C	Mono Pt 4/2004
T_A_Amb_2	Fühler, Außentemperatur	°C	Mono Pt 10/2004
<b>2. Luftkreis</b>			
V_dot_A_ABS_i_h	Volumenstrom Zuluft gesamt	m³/h	Elster Q65
T_A_Vol_i	Temperatur am Volumenstrommessgerät	°C	Mo no Pt 2/2004
P_A_Vol_i	Absolutdruck am Volumenstrommessgerät	Pa	Baratron 221A
dP_A_ABS	Differenzdruck über Monokanal	Pa	Baratron 221A
	Differenzdruck zwischen Volumenstrommessgerät und Monokanaleintritt		
dP_A_Vol_ABS	Monokanaleintritt	Pa	Baratron 221A
T_A_ABS_i	Lufttemperatur Reaktoreintritt	°C	THM 04 40
T_A_ABS_o	Lufttemperatur Reaktorausritt	°C	Mono Pt 8/2004
			Mono TE
T_A_C1_i	Lufttemperatur Eintritt Teilkanal 1 (oben)	°C	6/2004
T_A_C2_i	Lufttemperatur Eintritt Teilkanal 2	°C	Mon o TE

			7/2004
T_A_C3_i	Lufttemperatur Eintritt Teilkanal 3	°C	Mono TE
			8/2004
T_A_C4_i	Lufttemperatur Eintritt Teilkanal 4	°C	Mono TE
			9/2004
T_A_C5_i	Lufttemperatur Eintritt Teilkanal 5 (unten)	°C	Mono TE
			12/2004
T_A_C1_o	Lufttemperatur Austritt Teilkanal 1 (oben)	°C	Mono TE
			2/2004
T_A_C2_o	Lufttemperatur Austritt Teilkanal 2	°C	Mono TE
			4/2004
T_A_C3_o	Lufttemperatur Austritt Teilkanal 3	°C	Mono TE
			5/2004
T_A_C4_o	Lufttemperatur Austritt Teilkanal 4	°C	Mono TE
			11/2004
T_A_C5_o	Lufttemperatur Austritt Teilkanal 5 (unten)	°C	Mono TE
			13/2004
Td_A_ABS_i	Taupunkt Lufteintritt	°C	MBW 2
Td_A_ABS_o	Taupunkt Luftaustritt	°C	MBW 3

### 3. Wasserkreis

V_dot_W_h	Volumenstrom Wasserkreis	m <sup>3</sup> /h	MID
T_W_ABS_u1	Wassertemperatur Wärmetauscher Eintritt	°C	THM 04 37
T_W_ABS_u2	Umgebungstemperatur	°C	THM 04 38
T_W_ABS_d1	Wassertemperatur Wärmetauscher Austritt	°C	THM 04 35

### 4. Solekreis

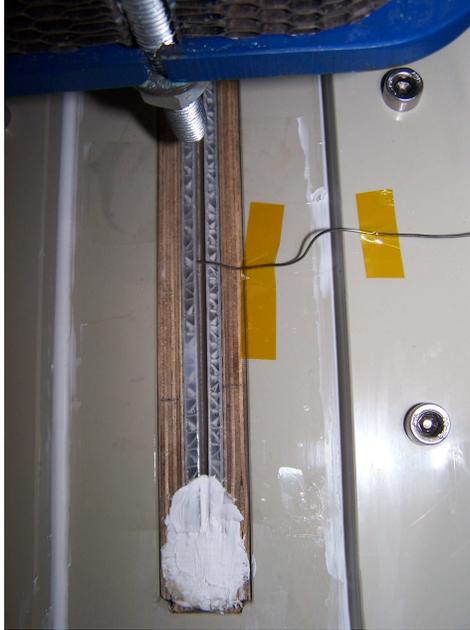
M_S_ABS_i	Solemasse Eintritt	g	Sartorius Waage
			Sartorius
M_S_ABS_o	Solemasse Austritt	g	Waage
T_S_ABS_i	Soletemperatur Eintritt Regenerator	°C	Pt PRCO0330
T_S_ABS_o	Soletemperatur Austritt Regenerator	°C	Pt PRCO0012
T_S_WT_i	Soletemperatur Eintritt Wärmetauscher	°C	P t PRCO0301
rho_S_ABS_i	Soledichte Austritt Reaktor	kg/l	
rho_S_ABS_o	Soledichte Austritt Reaktor	kg/l	

### 5. Messdatenerfassung

	MDE Anschluss	
T_VGL_2	Temperatur Vergleichsstelle Thermoelemente	°C

Im stationären Betrieb werden Massenbilanzen und Enthalpiebilanzen berechnet. Die Solemasse wird im Ablaufkanister sowie im Zulaufkanister gemessen, um die Wassermenge zu ermitteln, die bei der Regeneration an die Luft abgegeben wird. Die desorbierte Wassermenge wird auch auf Luftseite berechnet anhand von Taupunktmessungen für die Zuluft und die Abluft. Da der Wassergehalt in der Luft vom Taupunkt und vom Druck abhängt, werden diese Daten am gleichen Ort gemessen. Der absolute Druck wird nur einmal gemessen, die anderen Drücke werden über Differenzdruckmessung bestimmt.

Für die Enthalpiebilanzen sind die Temperaturen der Stoffströme wichtig. Am Eintritt des Monokanals wird die Lufttemperatur an fünf Stellen mit Thermoelementen gemessen um sicher zu stellen, dass die Lufteintrittsbedingungen auf der ganzen Oberfläche nahezu gleich sind. Am Austritt der Austauschfläche werden auch fünf Thermoelemente eingesetzt. Die Abbildung 6.2 zeigt eine Aufnahme eines Thermoelementes am Eintritt des Monokanals.



**Abbildung 6.2: Aufnahme eines Thermoelements zur Messung der Lufteintrittstemperatur in den Monokanal**

Die Dichte der Sole wird auch gemessen, da sie direkt mit der Solekonzentration korreliert ist. Um die Messung „on-line“ durchzuführen ist eine Schlauchpumpe am Solekreislauf angeschlossen, die an regelmäßigen Zeitpunkten Sole in das Dichtemessgerät fördert.

Um die Temperatur der Sole zu messen standen nur metallische Temperaturfühler zur Verfügung. Sie sind mit einem Schrumpfschlauch überzogen worden, um direkten Kontakte mit der Sole zu vermeiden. Dadurch werden Temperaturänderungen langsamer detektiert, aber da die Vermessung im stationären Zustand erfolgt, sollte das kein Problem darstellen. Es reicht dann, länger auf die Messung zu warten. Die Abbildung 6.3 stellt einen so behandelten Temperaturfühler dar.



**Abbildung 6.3: Aufnahme eines Pt100 Temperaturfühlers mit einem Schrumpfschlauch beschichtet**

Um sicherzustellen, dass die gemessene Temperatur (bzw. Dichte) der durchschnittlichen Soletemperatur (bzw. Dichte) entspricht, wurde ein statischer Mischer in die Rohrleitung eingebaut, der aus Teflon besteht. Der ist in der Abbildung 6.4 dargestellt.



**Abbildung 6.4: Darstellung des statischen Mixers für die Solehomogenisierung**

Der Mischer besteht aus 6 Mischelementen und wurde für die Betriebsbedingungen so ausgelegt, dass die Sole nach dem Mischer homogen ist. Der vom Mischer verursachte Druckverlust ist so klein, dass die Sole mit der vorhandenen Fallhöhe durch den Mischer strömt. In ähnlicher Weise sind statische Mixer im Luftkreislauf eingebaut, da wo die Temperatur, Druck und Taupunkt der Luft gemessen werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Am ZAE Bayern e.V. wurde ein Verfahren zur Raumklimatisierung mit Niedertemperaturwärme entwickelt. In einem offenen System absorbiert eine Lithiumchloridlösung Wasser aus der Luft (Zuluftentfeuchtung). Diese Luft wird dann durch indirekte Verdunstungskühlung und Kälterückgewinnung auf die gewünschte Temperatur abgekühlt und dem Gebäude zugeführt. Die mit Wasser verdünnte Lithiumchloridlösung muss regeneriert werden, indem Energie unter der Form von Niedertemperaturwärme in die Sole eingespeist wird, damit das Wasser aus der Sole desorbieren kann. So wird die Lithiumchloridlösung als Energiespeichermedium eingesetzt.

Am ZAE Bayern e.V. wurde ein Plattenaustauscher als Absorber schon seit einigen Jahren gebaut und optimiert. Die Absorption findet in Gegenstrom und in low-flow Betrieb bezüglich der Lithiumchloridlösung statt. Im Gegensatz zum Absorptionsbetrieb, in dem die Abfuhr der Absorptionenthalpie über die Wände Austauschplatten erfolgte, ist bei der Regeneration dieses System nicht mehr geeignet wegen Undichtigkeiten der Platten bei Temperaturen bis 80°C.

Die Regenerationswärme muss dann vor der Austauschfläche an die Sole übertragen werden. Das erfolgt in einem vorgeschalteten solebeständigen Titanwärmetauscher. Der Solemassenstrom wird so erhöht, dass die Sole genug Energie im Wärmetauscher aufnimmt und die benötigte Energie zur ihrer Regeneration in die Platten selbst mitbringt. Dieser high-flow Betrieb wurde simuliert, um eine Optimierung der Flächeausnutzung und der Wärmequelleausnutzung zu erreichen.

Der klassische Ansatz für solche Aufgaben ist eine Stoffaustauschkolonne. Diese Kolonne wurde auch simuliert und dimensioniert. Eine Preisabschätzung konnte durchgeführt werden. Im Vergleich zu dieser Kolonne sollte die Lösung eines Plattenaustauschers untersucht werden.

Für diese Untersuchung war der Bau eines Regeneratorsversuchsstandes geplant. Der Aufbau dieses Regenerators für einen Kreuzstrom- und high-flow Betrieb war das Hauptthema dieser Arbeit. Der Regenerator wurde als Monokanal gebaut, denn nur ein Kanal zwischen zwei Austauschplatten wird untersucht. Der fertige Monokanal wurde in eine bestehende Versuchsanlage eingebaut und die drei Stoffkreisläufe (Sole, Luft und Heizwasser) wurden an den neuen Austauscher angepasst. Die Abbildung 7.1 zeigt die fertige Anlage.



**Abbildung 7.1: Aufnahme des neuen Monokanals, der im Kreuzstrom und mit hohem Solemassenstrom betrieben wird**

Die Vermessung des Regenerators konnte im Zeitraum nicht durchgeführt werden. Dies bleibt Aufgabe einer nachfolgenden Arbeit. Ziel der Vermessung ist, die Effizienz des Plattenaustauschers zu bewerten und die voraussichtlichen spezifischen Kosten zu schätzen. Aus der Effizienz des Stoffaustausches am Versuchstand wird dann abgeleitet, wie groß die Austauschfläche für einen Plattenwärmetauscher mit gewisserer Leistung ist. Ein Vergleich zwischen dem klassischen Ansatz einer Stoffaustauschkolonne und der innovativen Lösung des Plattenaustauschers wird so ermöglicht.

## 8 Verzeichnisse

### 8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Konzept der Zuluftklimatisierung am ZAE-Bayern .....	8
Abbildung 1.2: Vergleich der Energiespeicherdichte mehrerer Speichermedien für die Klimatechnik .....	10
Abbildung 1.3: Funktionsprinzip des Monokanals im Absorptionsbetrieb.....	11
Abbildung 1.4: Energiespeicherdichte der Sole in Funktion der Solekonzentration am Absorberaustritt .....	13
Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Stoffaustauschstroms zwischen Luft und Sole .....	17
Abbildung 2.2: Darstellung des Prozesses der Luftklimatisierung im Mollier-Diagramm.....	19
Abbildung 2.3: Darstellung des Absorptionsprozesse ohne und mit Abkühlung im Mollier- Diagramm.....	20
Abbildung 2.4: McCabe-Thiele Diagramm für den Absorptionsprozess.....	21
Abbildung 2.5: McCabe-Thiele Diagramm der Absorption mit graphischer Ermittlung der Gleichgewichtstufenzahl.....	22
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Austauschvorgänge zur Modellierung der Absorption.....	25
Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Austauschvorgänge zur Modellierung der Regeneration.....	26
Abbildung 3.3: Darstellung der verbrauchten Regenerationsenergie in Funktion des Solemassenstromes .....	27
Abbildung 3.4: Simulation des Temperaturverlaufs der Sole und der Luft während der Regeneration im low-flow (a) und high-flow (b) Betrieb.....	28
Abbildung 3.5: Simulation des Konzentrationsverlaufs der Sole und der Luft während der Regeneration im low-flow (a) und high-flow (b) Betrieb.....	29
Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der Batch-Regeneration, kontinuierliche Absorption.....	30
Abbildung 3.7: Schematische Darstellung der kontinuierlichen Regeneration, kontinuierliche Absorption.....	31
Abbildung 3.8: Konzentrationssprung im Regenerator in Funktion der mittleren Solekonzentration im Regenerator .....	31
Abbildung 4.1: Doppelstegstruktur der Austauschplatten.....	34
Abbildung 4.2: Aufnahme eine Polypropyldoppelstapplatte mit Vlies beschichtet.....	35
Abbildung 4.3: Bildung von Kanälen beim Soleströmen auf Polypropylenplatten, die mit einem Vlies beschichtet sind .....	35
Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der Verbindung zwischen Holzplatten, Polypropylenplatten und Abstandhalter.....	36
Abbildung 4.5: Darstellung eines Bisektionsverteilers für den low-flow Betrieb.....	37
Abbildung 4.6: Aufnahme eines Abschnittes des high-flow Verteilers .....	37
Abbildung 4.7: schematische Darstellung des high-flow Verteilers.....	38
Abbildung 4.8: Aufnahme der Eintrittsstülle für das Soleeinströmen in den Verteiler.....	38
Abbildung 4.9: Aufnahme des fertigen Prüflings .....	39
Abbildung 4.10: Aufnahme des alten Gehäuses (links) und des neuen Gehäuses (rechts) mit schematischer Darstellung des Strömungsrichtungen .....	40
Abbildung 4.11: Technische Zeichnung des Gehäuses und Zubehör .....	40

Abbildung 4.12: Technische Zeichnung des fertigen Monokanals.....	41
Abbildung 5.1: Frontseite des Austauschkanals, Lufteintritt .....	43
Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Stoffkreisläufe im neuen Versuchstand.....	45
Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des Monokanals und der eingebauten Messstellen .....	48
Abbildung 6.2: Aufnahme eines Thermoelementes zur Messung der Lufteintrittstemperatur in den Monokanal .....	50
Abbildung 6.3: Aufnahme eines Pt100 Temperaturfühlers mit einem Schrumpfschlauch beschichtet.....	50
Abbildung 6.4: Darstellung des statischen Mischers für die Solehomogenisierung.....	51
Abbildung 7.1: Aufnahme des neuen Monokanals, der im Kreuzstrom und mit hohem Solemassenstrom betrieben wird.....	53

## 8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Energiespeichermethoden zur Luftklimatisierung.....	7
Tabelle 1.2: Vor- und Nachteile potentieller flüssiger Sorbentien .....	10
Tabelle 3.1: Hauptergebnisse der Dimensionierung und Auslegung einer Stoffaustauschkolonne zur LiCl-Regeneration .....	33
Tabelle 6.1: Messstellens am Monokanal.....	48

## 8.3 Symbolverzeichnis

Symbol bzw. Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
ASMR	Air to Salt Mass ratio	-
A	Fläche	m <sup>2</sup>
C	Solekonzentration	%
C <sub>p</sub>	Spezifische Wärmekapazität	J/(kg.K)
D	Diffusionskoeffizient	m <sup>2</sup> /s
f	Benetzungsfaktor	%
h	Spezifische Enthalpie	J/kg
n	Molezahl	mol
NTU	Number of transfer units	-
m	Masse	kg
MR	Mass Ratio	-
P	Druck bzw. Partialdruck	bar
Q	Wärmestrom	W
R	Allgemeine Gaskonstante (für die Luft = 287)	J/(kg.K)
r <sub>0</sub>	spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers	MJ/kg
s	Dicke	m
SC	Storage Capacity	MJ/m <sup>3</sup>
T	Temperatur	°K bzw. °C

$T_d$	Dew point (Taupunkttemperatur)	°C
V	Volumen bzw. Spezifisches Volumen	m <sup>3</sup> bzw. m <sup>3</sup> /kg
X	Wasserbeladung eines Fluid	kg/kg
x,y,z	Ortkoordinaten	m
$\alpha$ bzw. U	Wärmeübertragungskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> .K)
$\beta$	Stoffübertragungskoeffizient	m/s
$\phi$	Relative Luftfeuchtigkeit	%
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	W/(m.K)
$\rho$	Dichte bzw. Partialdichte	kg/m <sup>3</sup>

Indizien	Bedeutung
Amb	Ambiance (Umgebung)
L	Luft
$\dot{m}$	Massenstrom
S	Sole
s	Gesättigter Zustand
W	Wasser
WD	Wasserdampf
*	Gleichgewichtszustand an der Soleoberfläche

## 8.4 Literaturverzeichnis

Conde M.R., Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design, *International Journal of Thermal Sciences* 43 (2004) 367–382, 2003

Fumo N., Goswami D.Y., Study of an aqueous lithium chloride desiccant system: air dehumidification and desiccant regeneration, *Solar Energy* Vol. 72, No. 4, pp. 351–361, 2002

Grossman G., Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning, *Solar Energy* Vol. 72, No. 1, pp. 53–62, 2002

Heimberg F., Untersuchung von Wärme- und Stoffaustauschflächen für offene Sorptionssysteme zur Gebäudeklimatisierung, Fachhochschule Augsburg, Fachbereich Maschinenbau, 2007

Hublitz A., Efficient Energy Storage in Liquid Desiccant Cooling Systems, Dissertation, TU München, Fakultät für Maschinenwesen, 2008

International Energy Agency: Cool Appliances, Policy Strategies for Energy Efficient Homes, IEA Publications, Paris, 2003

Kapfhammer C., Experimentelle Untersuchung und Bewertung von Stoffaustauschflächen für Sorptionstrockner, Diplomarbeit am Fachbereich 06 Physikalische Technik, Fachhochschule München, 1997

Lampe C., Projektierung eines Versuchsstandes zum Test von Wärme- und Stoffaustauschplatten, Diplomarbeit im Fachbereich Energieverfahrenstechnik TU-Clausthal, 2003

Landspersky M., Analyse und Weiterentwicklung von Flüssigkeitsverteilerplatten für Sorptionsgestützte Klimatisierung, Diplomarbeit im Studienschwerpunkt Umwelttechnik, Fachhochschule Augsburg, 2006

Lävemann E., Keßling W., Röhle B. und Kink C., Klimatisierung über Sorption, Endbericht zur Phase I des Forschungsvorhabens Nr. 032 9151 des BMFT, ZAE Bayern, Abt. 4; München 1993

Recknagel H et al., Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik München, Wien: R. Oldenbourg Verlag; 1992

Mersmann A., Kind M., Stichlmair J., Thermische Verfahrenstechnik Grundlagen und Methoden, 2. Auflage, Springer, 2005

Von Oelsen T., Experimentelle Untersuchung an einem offenen Absorptionssystem zur Entfeuchtung in Kreuzstromfahrweise, Dissertation, Universität GHS-Essen, Fakultät für Maschinenwesen, 2001

Wang S., China Needs Air Conditioning, in Forbes, 02.10.2008

ZAE Bayern, Sorptionskühlung für einen Jazzclub, Tätigkeitsbericht 2006

## 9 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich noch bei allen bedanken, die die Realisierung dieser Arbeit ermöglicht haben:

Herrn H. Spliethoff, der als Inhaber des Lehrstuhls für Energissysteme an der TU München diese Arbeit betreut hat,

Herrn W. Schölkopf, der als stellvertretender Leiter der Abteilung 4 des Bayrischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. die Möglichkeiten und die Rahmenbedingungen für diese Arbeit zur Verfügung gestellt hat,

Herrn E. Lävemann, für die angenehme und lehrreiche Betreuung und Unterstützung bei der Realisierung dieser Arbeit,

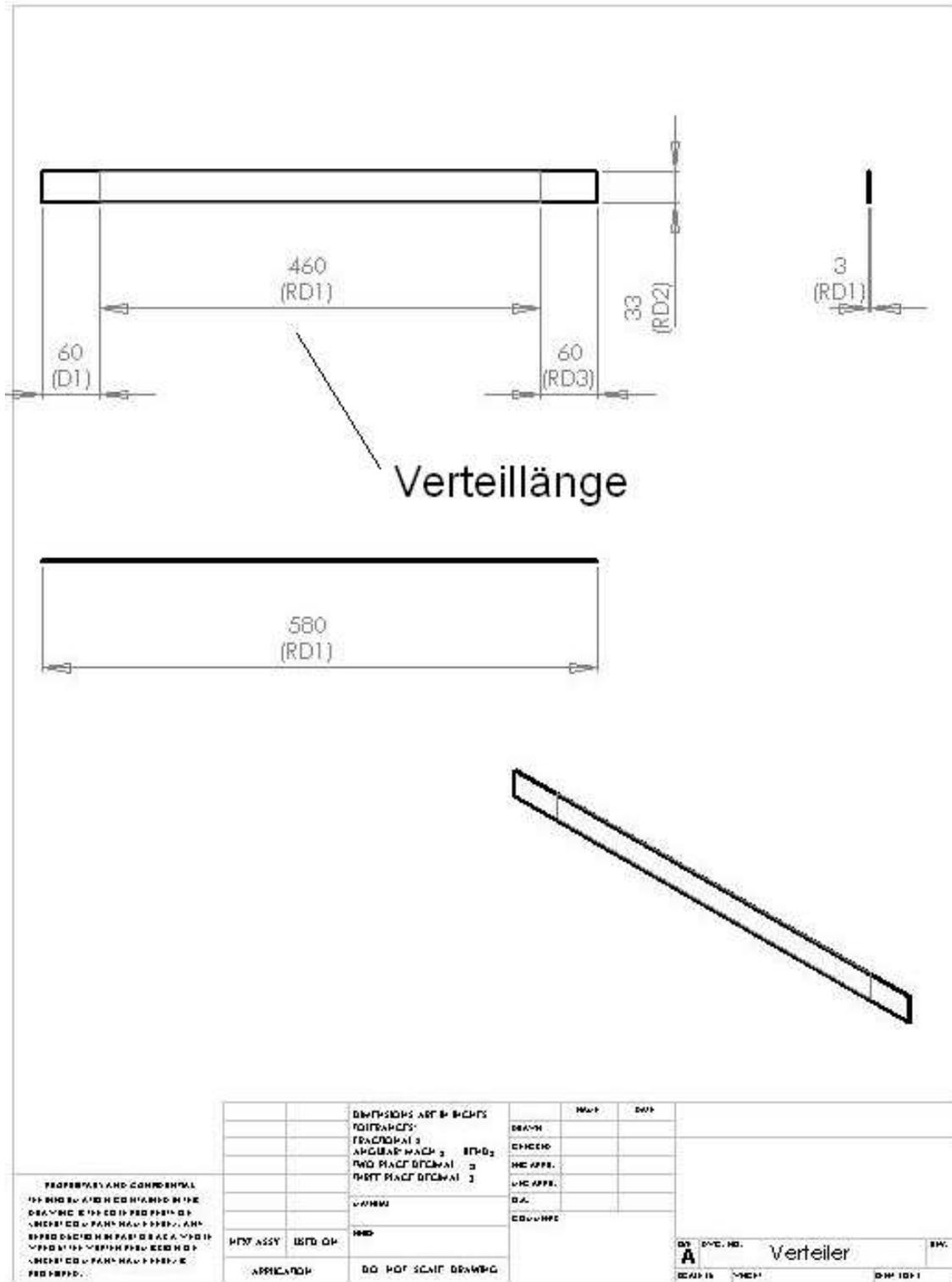
Herrn A. Krönauer, für seine wertvolle Unterstützung und technische Betreuung,

Herrn M. Thanner, der fast alle technische Zeichnungen dieser Arbeit gemacht hat, und deren Zusammenarbeit während der Konstruktionsaufgabe mir sehr geholfen und viel gelernt hat,

sowie allen Mitarbeitern am ZAE Bayern für die große Hilfsbereitschaft und die angenehme Arbeitsatmosphäre.

# 10 Anhang

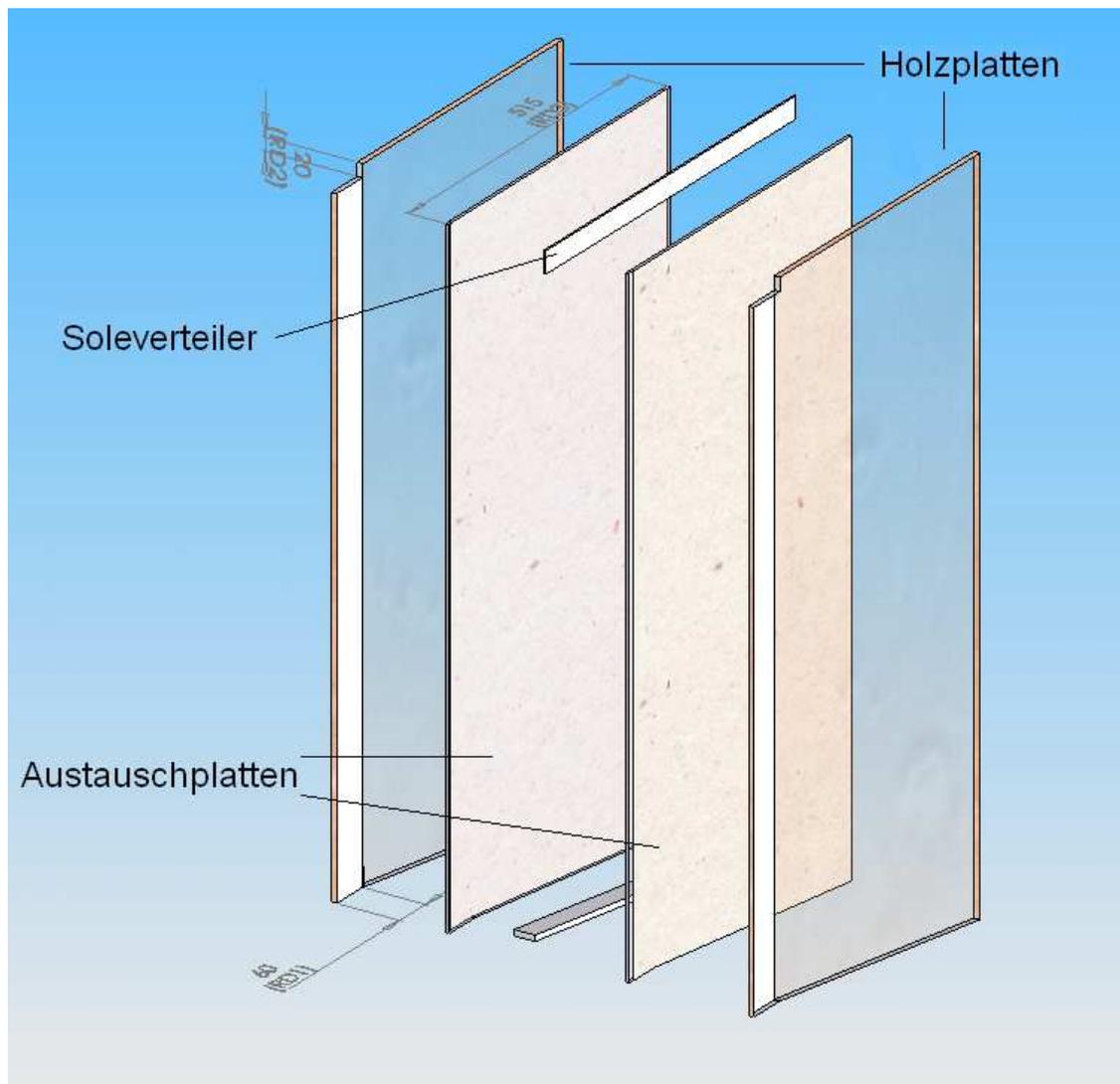
## 10.1 Verteiler







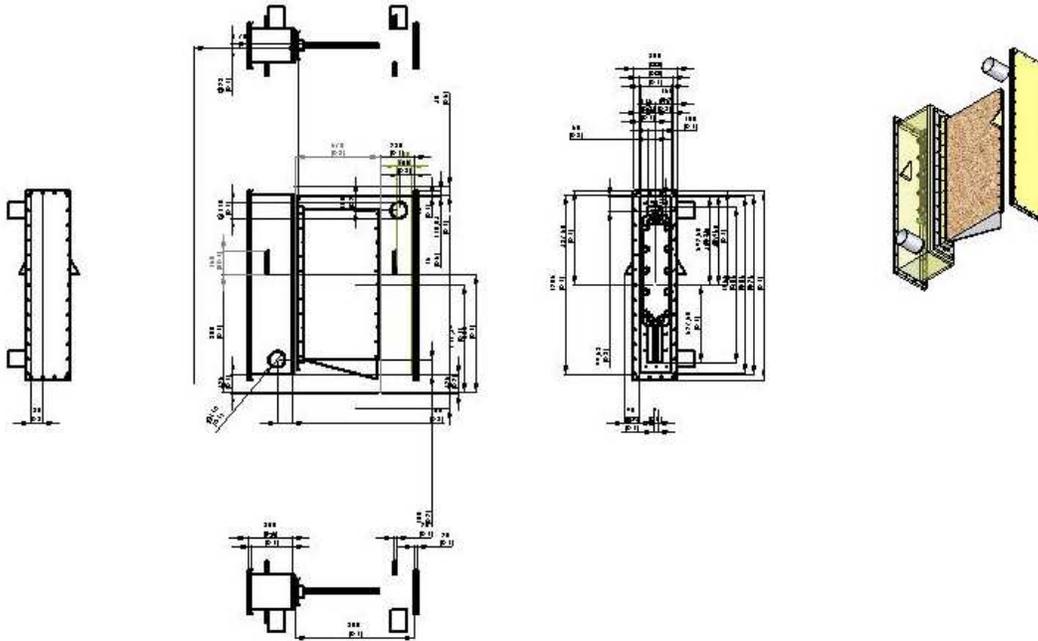
## 10.4 Prüfling



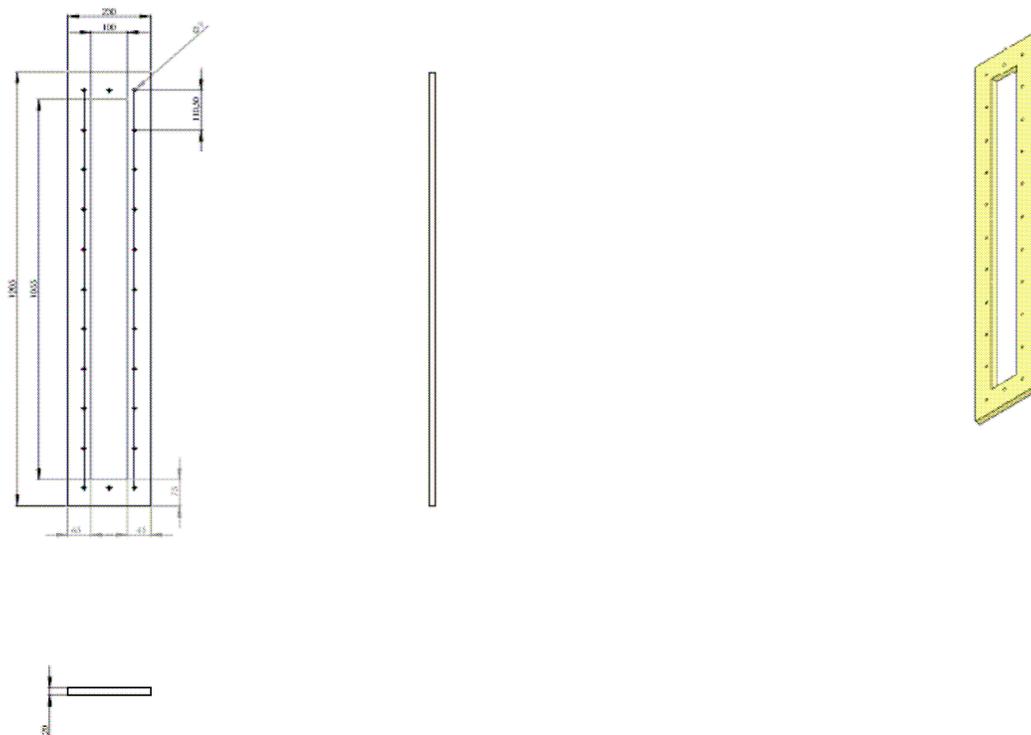
## 10.5 Gehäuse und Zubehör

Die technischen Zeichnungen im originalen Format sind auf Anfrage am ZAE Bayern erhältlich.

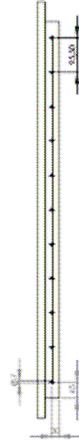
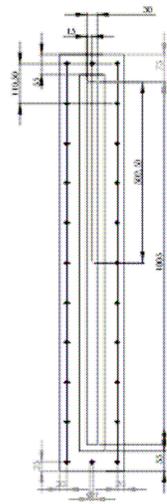
### 10.5.1 Gehäuse



### 10.5.2 Abdichtungsflansch



### 10.5.3 Plattenrahmen



### 10.5.4 Deckel

