

ETDE-DE--489



# Solar unterstützte Klimatisierung über Sorption

Endbericht zur Phase II des Forschungsvorhabens

Förderkennzeichen 032 9151 F

RECEIVED FFR 2 7 1997 OSTI

Autoren

Eberhard Lävemann, Wolfgang Keßling, Matthias Peltzer



DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED FOREIGN SALES PROHIBITED

Abteilung 4: Thermische Nutzung von Sonnenenergie

# BAYERISCHES ZENTRUM FÜR ANGEWANDTE ENERGIEFORSCHUNG E.V.

1

2

# Solarunterstützte Klimatisierung über Sorption

Endbericht zur Phase II des Forschungsvorhabens

Förderkennzeichen 032 9151 F

Autoren

Eberhard Lävemann, Wolfgang Keßling, Matthias Peltzer

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. ZAE Bayern
Abteilung 4: Thermische Nutzung von Sonnenenergie Postanschrift: Postfach 440254, 80751 München Adresse: Domagkstraße 11, 80807 München Telefon: 089 356250-11, Telefax 089 356250-23



DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED FOREIGN SALES PROHIBITED

Projektleitung: Durchführung: Projektzeitraum: Stand: Ausfertigung: Dipl.-Ing. E. Lävemann, Dipl.-Phys. W. Schölkopf Eberhard Lävemann, Wolfgang Keßling, Matthias Peltzer 1. Juni 1994 bis 29.Februar 1996 29. Februar 1996 24. September 1996

Projektpartner:

SOLVAY Deutschland GmbH, Hannover Menerga Apparatebau GmbH, Mülheim / Ruhr

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 0329151F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

# Inhaltsverzeichnis

.

1 Zusammenfassung	8
1.1 Derzeitiger Stand der Forschung	8
1.2 Zielsetzung	8
1.3 Vorgehensweise	8
1.4 Ergebnis	9
1.5 Schlußfolgerung	9
2 Einleitung10	0
3 Stand der Forschung und Entwicklung1	1
3.1 Geschlossene Sorptionssysteme	1
3.2 Offene Sorptionssysteme 12	2
3.2.1 Rotierende Entfeuchter	2
3.2.2 Festbett-Adsorber 12	3
3.2.3 Flüssige Sorbentien	3
3.2.4 Speicherung in flüssigen Absorbentien	4
4 Das System zur Raumklimatisierung 14	5
5 Planung und Ablauf der Phase II1	7
5.1 Vorausgegangene Arbeiten in Phase I1	7
5.2 Planungen für die Phase II 1'	7
5.3 Ziel der Phase II	9
5.4 Arbeitsprogramm und Vorgehensweise	9
6 Ergebnis der Phase II	1
6.1 Vermessung des Sorptionsentfeuchters aus Phase I	1
6.2 Klärung theoretischer Fragen	1
6.3 Weiterentwicklung der Austauschflächen	1
6.4 Konstruktion und Bau eines verbesserten Sorptionsentfeuchters	2
6.5 Verwertbarkeit der Ergebnisse	2
6.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen22	2

٦.

. .

.

7 Theoretischer Hintergrund	24
7.1 Luftentfeuchtung und Energiespeicherung	24
7.2 Luft-Salz-Massenstromverhältnis	24
7.3 Anzahl der Übergangseinheiten NTU	25
7.4 Enthalpiebilanz Luft	25
7.5 Wassermassenbilanz Luft - Salzlösung	25
8 Experimentelle Untersuchungen am Sorptionsentfeuchter PSR 1000	26
8.1 Versuchsanlage V1000	26
8.2 Meßtechnik	27
8.2.1 Luft	27
8.2.2 Salzlösung	27
8.2.3 Kühl- / Heizkreislauf	28
8.3 Sorptionsentfeuchter	29
8.3.1 Sorptionsentfeuchter PSR1000	29
8.4 Absorptionsexperimente	31
8.5 Ergebnisse	33
8.5.1 Luftentfeuchtung	33
8.5.2 Benetzungsverfahren für die Austauschfläche	33
8.5.3 Versuche zur Regelung der Luftentfeuchtung	33
8.5.4 Wassermassenbilanz	34
8.5.5 Energiespeicherung	34
8.6 Folgerungen	35
8.7 Desorptionsexperimente am PSR1000	35
9 Entwicklung von Austauschflächen	37
9.1 Anforderungen	37
9.2 Benetzung der Austauschfläche	37
9.3 Test von Vliesen.	38
9.3.1 Untersuchungsmethode	38
9.3.2 Bewertungsmethode	39
9.3.3 Preisvergleich der geeigneten Muster	40
9.3.4 Ergebnisse des Benetzungstestes	40
9.3.5 Befestigung von Vliesen	41

9.4 Weitere Verfahren zur Verbesserung der Benetzung	42
9.4.1 Plasmaaktivierung, Metalloxidbeschichtung, Plasmapolymerisation	42
9.4.2 PU-Folie	42
9.4.3 Industrielle Halbzeuge	42
10 Entwicklung von Lösungsverteilern	44
10.1 Verfolgte Konzepte	44
10.1.1 Verteilung durch hinreichend hohen transmembranen Druck	44
10.1.2 Verteilung durch Bisektion oder Mehrfachverteiler	44
10.2 Anforderungen an die Qualität der Lösungsverteilung	45
10.2.1 Örtliche Schwankungen der Lösungsverteilung	45
10.2.2 Zeitliche Schwankungen der Lösungsverteilung	
10.3 Experimente	47
10.3.1 Versuchsaufbau	47
10.3.2 Übersicht über die getesteten Verteiler	48
10.3.3 Einzelergebnisse	50
10.4 Bewertung der Ergebnisse	65
11 Kühlung von Austauschflächen	66
11.1 Einfluß der Kühlung des Entfeuchters	66
11.1.1 Sorptionsgleichgewicht	66
11.1.2 Austauschgrad	67
11.2 Erforderlicher Austauschgrad des Entfeuchters	67
11.3 Kreuz- oder Gegenstromkühlung des Entfeuchters	68
11.4 Einfluß von ungekühlter Austauschfläche	69
12 Konstruktion und Bau eines Sorptionsentfeuchters	
12.1 Auslegung	
12.2 Konstruktion	
12.2.1 Austauscheinheit	
12.2.2 Gehäuse	
12.2.3 Lösungsverteiler	
12.3 Fertigung und Inbetriebnahme	

13 Physikalische Eigenschaften von Klimat 3930S	75
13.1 Oberflächenspannung	
13.2 Dichte	
13.3 Gleichgewichtstaupunkt / Isosteren	77
14 Verzeichnisse	80
14.1 Nomenklatur	80
14.2 Literatur	81

# Abbildungsverzeichnis

٠

Abbildung 1:	System zur Raumklimatisierung mit offenem Sorptionsmittelkreislauf	15
Abbildung 2:	Schematische Aufsicht auf die Versuchsanlage V1000. Der hervorgehobene Bereich markiert die Module, an denen experimentiert wurde	26
Abbildung 3:	Meßstellen am Sorptionsentfeuchter	28
Abbildung 4:	Schematische Ansicht des Sorptionsentfeuchters sowie der Stoffströme: Luft, Salzlösung und Kühl / Heizwasser. Maße siehe Tabelle 2	29
Abbildung 5:	Schematischer Aufbau der Austauschflächen	30
Abbildung 6:	Luftentfeuchtung über dem Massenstromverhältnis für ausgewählte Absorptionsexperimente mit LiCl-H <sub>2</sub> O. Versuchszuordnung siehe Tabelle 2	32
Abbildung 7:	Speicherdichte für Luftentfeuchtungsenergie über dem Massenstromverhältnis für ausgewählte Absorptionsexperimente mit LiCl-H <sub>2</sub> O	35
Abbildung 8:	Massenstrom sowie Austrittskonzentration der Salzlösung bei der Desorption bei konstanter Eintrittskonzentration $C = 32,7 \%$	36
Abbildung 9:	Gliederungsprinzip der Verteilerebenen bei der Bisektion	45
Abbildung 10:	Luftentfeuchtung dY [g/kg] und Energiespeicherdichte SC [kWh/m <sup>3</sup> ] in Abhängigkeit vom Luft/Sole Massenstromverhältnis MR bei unterschiedlichen Werten von NTU=const	46
Abbildung 11:	Versuchsanordnung für Schlauchverteiler	47
Abbildung 12:	Versuchsanordnung für Bisektionsverteiler	48
Abbildung 13:	PVC Schlauch weich mit handgebohrten Löchern und konzentrierter LiCl Lösung	50
Abbildung 14:	Abweichungen der Einzelmassen der Sole pro Meßbecher vom Mittelwert der jeweiligen Meßreihe	51
Abbildung 15:	PVC Schlauch hart mit handgebohrten Löchern und konzentrierter LiCl Lösung	52
Abbildung 16:	Gummischlauch mit handgebohrten Löchern Ø0,7mm	53
Abbildung 17:	Maschinell gelochter Schlauch, Innendurchmesser 6mm mit gebrauchtem konzentriertem Klimat, örtliche Verteilung gesamt	54
Abbildung 18:	Maschinell gelochter Schlauch, Innendurchmesser 6mm mit gebrauchtem konzentriertem Klimat, örtliche Verteilung zeitlich aufgelöst	55
Abbildung 19:	Maschinell gelochter Gummischlauch, Innendurchmesser 3 mm, Vergleich der Verteilung mit und ohne <i>crossflow</i>	56
Abbildung 20:	Maschinell gelochter Gummischlauch Innendurchmesser 3 mm, Vergleich der Einzelgewichte der Lösung bezogen auf den Gesamtmittelwert des Versuches	57
Abbildung 21:	Permanenthydrophiler Membranschlauch Typ1 mit Wasser 1,4 l/h	58
Abbildung 22:	Permanenthydrophiler Schlauch Typ1 mit LiCl 1 l/h	59

.

.

•

4.

\_\_\_\_

Abbildung 23:	Permanenthydrophiler Schlauch Typ1 mit ungefiltertem Klimat 3930S 0,2 1/h60
Abbildung 24:	Permanenthydrophiler Schlauch Typ1 mit gefiltertem Klimat 3930S 0,2 l/h, gereinigter Schlauch61
Abbildung 25:	Permanenthydrophiler Schlauch Typ1 mit gefiltertem Klimat 3930S 0,27 l/h, fabrikneuer Schlauch, Abweichung des Mittelwertes abhängig vom Ort zu verschiedenen Zeiten62
Abbildung 26:	Permanenthydrophiler Schlauch Typ1 mit gefiltertem Klimat 3930S, Dichte 1,55 kg/l, 0,274 l/h, gereinigter Schlauch, Abweichung des Mittelwertes abhängig von der Zeit an verschiedenen Orten62
Abbildung 27:	Permanenthydrophiler Schlauch Typ2 mit gefiltertem Klimat 3930S 0,36 l/h63
Abbildung 28:	Bisektionsverteiler, Volumenstrom 1,18 l/h Vergleich verschiedener Versuche mit gleichen Randbedingungen64
Abbildung 29:	Sorptionsgleichgewichte gekühlte und ungekühlte Sorptions-prozesse66
Abbildung 30:	Austauschgrad eines Sorptionspozesses in Abhängigkeit von der Art der Kühlung 70
Abbildung 31:	Skizze Luftentfeuchter 11/9572
Abbildung 32:	Dichte von Klimat 3930S Meßwerte und Interpolation76
Abbildung 33:	Schematische Darstellung des Luftkreislaufs in der Meßanlage77
Abbildung 34:	Meßwerte für Taupunkt in Luft über Klimat 3930S, Meßwerte für 62 %, Vergleichswerte für Wasser berechnet mit Dampfdruckfunktion aus [50]78

# Tabellenverzeichniss

-----

- - - -

Tabelle 1: Maße der entwickelten Sorptionsentfeuchter im Vergleich [46], siehe auch Kapitel 123	0
Tabelle 2: Ausgewählte Absorptionsexperimente mit LiCl-H <sub>2</sub> O3	1
Tabelle 3: Beispiel des Versuchsprotokolls3	8
Tabelle 4: Bewertungsmaßstab3	9
Tabelle 5: Übersicht über die an Lösungsverteilern durchgeführten Versuche4	9
Tabelle 6: Austauschgrad des Sorptionsprozesses als Funktion der Kühltemperatur6	8
Tabelle 7: Eintrittsparameter für Absorption an LiCl-H <sub>2</sub> O7	0
Tabelle 8: Auslegungsdaten für den Sorptionsentfeuchter7	1
Tabelle 9: Meßwerte Oberflächenspannung7	5
Tabelle 10: Parameter zur Dichteinterpolation Klimat 3930S	6
Tabelle 11: Dichte von Klimat 3930S, Meßwerte7	9
Tabelle 12: Tabellenwerte Dichte von reinem Wasser [52]	9
Tabelle 13: Meßwerte für Taupunkt in Luft über Klimat 3930S, Meßwerte für 62 %,Vergleichswerte für Wasser berechnet mit Dampfdruckfunktion aus [50]7	9
Tabelle 14: Test von Vliesen und Geweben, Versuchsergebnisse (vergl. Kapitel 9.3)84	4

.

----

# 1 Zusammenfassung

### 1.1 Derzeitiger Stand der Forschung

Für die Kühlung von Gebäuden wird weltweit ein signifikanter Anteil der aus fossilen Quellen bereitgestellten Energie aufgewendet. Die Tendenz ist steigend, bedingt durch die zunehmende Industrialisierung in wärmeren Klimazonen. Da äußere Kühllasten und die solare Einstrahlung zeitlich kohärent sind, ist die Nutzung solarer Strahlung für die Kühlung von Gebäuden naheliegend.

Zur Kühlung von Gebäuden werden Kompressionskältemaschinen, Absorptionskältemaschinen und, in wenigen Anwendungen, offene Sorptionskühlsysteme, *desiccant cooling systems DCS*, eingesetzt, die Luft sorptiv entfeuchten und anschließend durch Verdunstung von Wasser kühlen. Solare Strahlung kann grundsätzlich Antriebsenergie für alle der genannten Kühlverfahren bereitstellen.

Offene Sorptionskühlsysteme können mit Wärme von vergleichsweise niedriger Temperatur, ab 60°C, angetrieben werden und dabei gute Wärmeverhältnisse erreichen. Sie versprechen damit einen hohen Wirkungsgrad des Gesamtsystems aus Kollektorfeld und Kühlsystem. In speziellen Ausführungen dieser Systeme kann Energie zur Kühlung und Entfeuchtung von Gebäuden im Sorbens gespeichert werden. Ein Vorteil, der die Nutzung solarer Strahlung und anderer nur temporär verfügbarer Energien, wie z.B. Abwärme, deutlich verbessert.

# 1.2 Zielsetzung

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, ein Sorptionskühlsystem zu entwickeln, das solar mit Temperaturen ab 60 °C angetrieben wird und effizient Energie in einem flüssigen Sorbens speichern kann, vorzugsweise mit dem von SOLVAY Deutschland GmbH entwickelten Klimat 3930S.

In der Phase I (1991 - 93) wurde experimentell gezeigt, daß dies grundsätzlich möglich ist und dieses System weitgehend aus klimatechnischen Standardkomponenten aufzubauen ist, daß jedoch ein spezieller sorptiver Luftentfeuchter entwickelt werden muß. In der Phase II (1994 -96) sollte der in Phase I gebaute Entfeuchter vermessen und ein technisch funktionierender und kostengünstig herzustellender Sorptionsentfeuchter als klimatechnische Komponente entwickelt werden.

### 1.3 Vorgehensweise

Der in Phase I entwickelte Sorptionsentfeuchter wurde mit Absorptions- und Desorptionsexperimenten getestet. Aus der Analyse der Versuche ergab sich ein weiterer Entwicklungsbedarf. Die Anforderungen an den Entfeuchter sind eine gut gekühlte, korrosionsfeste Austauschfläche, die ein sehr kleiner Salzlösungsstrom gleichmäßig und vollständig benetzt. Damit sind die Entwicklungsfelder Kühlung, Verteilung und vollständige Benetzung angesprochen. Das zu erwartende Ergebnis war insofern eingeschränkt, als im Rahmen der verfügbaren Mittel von vornherein auf jedem Feld nur eine konstruktive Variante realisiert werden konnte.

Es mußte, soweit möglich, auf bewährte Techniken zurückgegriffen werden. Als Austauschflächen wurden wie in Phase I wassergekühlte Polypropylen-Stegdoppelplatten eingesetzt. Ein potentiell kostengünstiges Klebetechnik-Fertigungsverfahren wurde getestet.

8

In Phase I hatten Vliese auf den Austauschflächen zunächst eine gute Benetzung mit der Sälzlösung ermöglicht, doch beim Dauerbetrieb in der Phase II verschlechterte sich die Entfeuchtungsleistung erheblich. Ein im Vlies enthaltenes Benetzungsmittel war offenbar ausgewaschen worden. Deshalb wurde in einer breit angelegten Untersuchung versucht ein kostengünstiges Vlies zu finden, das ohne auswaschbare Zusätze eine gute Benetzung insbesondere mit Klimat 3930S erzeugt, sowie ein Verfahren, mit dem es auf die Polypropylen-Flächen aufgebracht werden kann. Weitere Möglichkeiten die Fläche zu benetzen wurden aufgezeigt.

Für die Verteilung der Salzlösung wurden neben den schon in Phase I eingesetzten mikroporösen Schläuchen, gelochte Schläuche und Rohre sowie ein Bisektionsverteiler getestet. ÷

۰.

Ein Entfeuchter basierend auf wassergekühlten, vliesbeschichteten Stegdoppelplatten, die in Klebetechnik verbunden waren, wurde hergestellt und mit LiCl-H<sub>2</sub>0 in Betrieb genommen.

## 1.4 Ergebnis

Die Experimente am Sorptionsentfeuchter der Phase I bestätigten das Konzept, daß Luftentfeuchtung bei gleichzeitiger Energiespeicherung möglich ist. Zur kommerziellen Umsetzung dieses Konzeptes müssen die Herstellungskosten der Austauschfläche allerdings gesenkt und die Benetzung der Austauschfläche verbessert werden.

Das beste dafür zur Zeit verfügbare, kostengünstige Vlies erreicht mit Klimat 3930S nur unbefriedigende Benetzungsergebnisse. Das Schweißverfahren, mit dem es aufgebracht wurde, ist noch unausgereift. Es gibt inzwischen industriell beschichtete Stegdoppelplatten aus der Verpackungstechnik, mit guten Benetzungseigenschaften. Sie müssen jedoch modifiziert werden, um in Sorptionsentfeuchtern eingesetzt zu werden. Es liegen auch noch keine Erkenntnisse über ihre Dauerbeständigkeit im Kontakt mit der Salzlösung vor.

Sehr gute Ergebnisse bei der Soleverteilung wurden mit Bisektionsverteilern erreicht, die jedoch nur in großen Serien zu vertretbaren Kosten herstellbar sein werden. Für kleinere Serien kommen gebohrte oder gelochte Schläuche in Frage, auch wenn die getesteten Exemplare noch nicht die gewünschte Qualität der Verteilung erreichten.

Die Klebetechnik zur Herstellung des Entfeuchters aus den einzelnen Platten ist noch nicht zuverlässig. Zwei Versuche, die an kleinen Entfeuchtern mit 5 Platten erfolgreich getestete Technik auf einen Entfeuchter mit 50 Platten zu übertragen, scheiterten. Die Verbindungen des Kühlwasserkreises waren undicht. Damit war die Kühlung des Entfeuchters unmöglich und das vorgesehene Testprogramm konnte nicht durchgeführt werden.

### 1.5 Schlußfolgerung

Das Ergebnis der Phase II ist ein Zwischenergebnis. Erfolgversprechende Teillösungen konnten nicht mehr in den fertiggestellten Entfeuchter integriert werden. Das Ziel, einen *technisch funktionierenden und zugleich kostengünstig zu fertigenden Entfeuchter* zu bauen, wurde nicht erreicht. Wichtige Teilerfolge in Richtung auf dieses Ziel waren zu verzeichnen.

Als aktueller Stand ist festzuhalten: Es gibt erprobte funktionsfähige Lösungen für nahezu alle Teilbereiche, die z.T. noch nicht die ökonomischen Anforderungen erfüllen. Es gibt kostengünstige Lösungen, die noch Funktionsmängel aufweisen. Es gibt eine Fülle von noch unbewerteten konstruktiven Ansätzen, die für die weitere Entwicklung in Frage kommen.

# 2 Einleitung

Der Einsatz von regenerativen Energien, kann den fossilen Energiebedarf von Gebäuden reduzieren und damit einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Einsparung leisten. Zweckmäßige Voraussetzung dafür ist allerdings eine Reduktion des Energieverbrauchs durch passive Maßnahmen und angepaßte Systemkonzepte, die nicht nur den Energieumsatz, sondern auch die Energiequalität berücksichtigen, d.h. die Temperaturniveaus auf denen Energie umgesetzt wird.

Für den Bereich Kühlung und Entfeuchtung von Räumen gehören dazu einerseits Konzepte, die aus physiologischen Günden eine höhere Raumtemperatur bei niedrigerer Luftfeuchte favorisieren und Konzepte, die eine getrennte Abfuhr der sensiblen und latenten Kühllasten vorsehen, um elektrische Hilfenergie einzusparen. Beide Konzepte werden durch offene Sorptionskühlsysteme, sogenannte *desiccant cooling systems*, in besonderer Weise unterstützt.

Die Effizienz mit der solare Strahlung genutzt werden kann, wird wesentlich von der zeitlichen Kohärenz von Angebot und Nachfrage bzw. den Speichermöglichkeiten des Gesamtsystems bestimmt. Bei der thermischen Nutzung solarer Strahlung ist die Betriebstemperatur des Kollektors von entscheidender Bedeutung.

Das Ziel des Forschungsvorhabens Solarunterstützte Klimatisierung über Sorption ist es deshalb, ein offenes Sorptionskühlsystem zu entwickeln, das einerseits mit thermischer Energie niedriger Temperatur angetrieben werden kann und gleichzeitig Energie im verwendeten Sorbens speichern kann. Es ist damit besonders zur Nutzung von regenerativen Energiequellen, wie solarer Strahlung, von Fernwärme oder von Abwärme geeignet.

In diesem Bericht wird, nachdem der *Stand der Forschung und Entwicklung* referiert ist, das grundlegende Konzept des zu entwickelnden *Sorptionskühlsystems* vorgestellt. Die besonderen Ziele der Phase II, die Projektpartner und die konkrete Aufgabenstellung der Phase II werden im Kapitel *Planung und Ablauf der Phase II* beschrieben. Das technische Ergebnis wird im Kapitel *Ergebnis der Phase II* in Kurzform dargestellt. In Einzelkapiteln zur Entwicklung der Austauschfläche, der Verteilung der Salzlösung, der Kühlung der Austauschfläche und der Konstruktion des Entfeuchters werden die technischen Details erörtert.

# 3 Stand der Forschung und Entwicklung

Naheliegende und zumindest experimentell bereits realisierte Möglichkeiten zur solar unterstützten Klimatisierung sind:

 $\sim$ 

- Kompressionskältemaschinen, die photovoltaisch angetrieben werden.
- Über thermische Sonnenkollektoren angetriebene Absorptionskältemaschinen mit geschlossenem Arbeitsmittelkreislauf (meist zur Erzeugung von kaltem Wasser), z.B. mit den Stoffpaaren H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>, LiBr-H<sub>2</sub>O (flüssiges Sorbens) oder Zeolith-H<sub>2</sub>O (festes Sorbens).
- Thermisch angetriebene, offene Sorptionssysteme (*Desiccant Cooling Systems, DCS*) mit flüssigen oder festen Sorbentien, die Luft trocknen und mit Verdunstungskühlern kühlen.

Die photo-elektro-mechanische Variante ist derzeit aufgrund der teuren Photovoltaikkomponente mit wirtschaftlichen Nachteilen behaftet, auch ist die Nachfolge der FCKW als Kältemittel noch nicht geklärt. In modernen, gut konzipierten Klimaanlagen arbeiten die Kompressionskältemaschinen jedoch unter Bedingungen, die elektrische Leistungszahlen von 4 und mehr erreichen, so daß der Preis für die Photovoltaik weniger ins Gewicht fällt. Wirtschaftliche Fortschritte bei der Photovoltaik und technische Lösungen in der Nachfolge der FCKW könnten diese Variante in Zukunft wirtschaftlich interessant machen.

Im Vergleich der thermisch angetriebenen Systeme haben die offenen, sorptiven Systeme thermodynamische Vorteile bei der Entfeuchtung der Räume. Die Sorbentien lassen sich bereits bei niedrigen Temperaturen mit guten Wärmeverhältnissen regenerieren. Geschlossene Systeme können nur durch Taupunktunterschreitung entfeuchten. Dazu müssen im Vergleich zu den Erfordernissen der sensiblen Kühlung, deutlich niedrigere Temperaturen gefahren werden, was schlechtere Wärmeverhältnisse zur Folge hat. Die Leistungsdichte der geschlossenen Systeme ist allerdings höher. Sie können kaltes Wasser erzeugen und lassen sich deshalb leichter in bestehende Anlagen integrieren.

### 3.1 Geschlossene Sorptionssysteme

Absorptionskältemaschinen mit den Arbeitsstoffpaaren H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub> oder LiBr-H<sub>2</sub>O sind seit vielen Jahren im Handel. Die NH<sub>3</sub>-Systeme haben sich insbesondere bei Großanlagen im industriellen Bereich bewährt. Sie erfordern allerdings wegen des giftigen Arbeitsmittels und der hohen Drücke besondere Sicherheitsmaßnahmen. Einstufige Systeme erreichen im Klimatisierungsbetrieb ein Wärmeverhältnis von  $COP_{th} = 0.4$  bis 0,5 bei Antriebstemperaturen von ca. 130 °C. Kühltemperaturen unter 0 °C sind problemlos realisierbar.

Systeme mit dem Arbeitsstoffpaar LiBr-H<sub>2</sub>O sind für niedrigere Antriebstemperaturen und damit auch für Solaranlagen geeignet. Die Absorptionskältemaschine der Fa. Yazaki Corp., Tokyo, [2,3], z.B., erreicht einstufig ein Wärmeverhältnis von  $COP_{th} = 0,5$  bis 0,7 bei Antriebstemperaturen von 80 bis 90 °C und einer Kühltemperatur von ca. 10 °C. Zweistufig erreicht sie ein Wärmeverhältnis von 0,95, wobei die zweite Stufe ausschließlich gasbefeuert ist. Die Anlage bietet gute Voraussetzungen für einen niedrigen elektrischen Hilfsenergiebedarf, da die Kühlmaschine selbst keine Elektrizität benötigt. Es ist nur der Bedarf für die Pumpen der angeschlossenen Wasserkreisläufe, sowie für die Ventilatoren des Kühlturms und der Kühleinheiten in den Räumen zu berücksichtigen. Warren und Wahlig [4] geben in ihrer Zusammenfassung mehrerer Studien den elektrischen Hilfsenergiebedarf von solar betriebenen Absorptionsanlagen mit 7 bis 14% der Kühlenergie an. Hocheffiziente Kühlmaschinen mit  $COP_{th} = 1,5$  bei Antriebstemperaturen von mehr als 110 °C wurden u.a. am Lawrence Berkeley Laboratory, Californien, entwickelt [5].

Systeme mit festen Sorbentien wie Zeolith sind wegen der großen möglichen Temperaturhübe (bis 100 K) interessant. Sie können als Wärmepumpe oder als Kühlanlage betrieben werden. Auch zum Speichern von Heiz- oder Kühlenergie sind sie geeignet. Sie haben in jüngerer Zeit rege Forschungsaktivitäten in den USA [6] und in Frankreich [7] ausgelöst, das Laborstadium jedoch noch nicht verlassen. Antriebstemperaturen von deutlich über 150 °C schränken die Möglichkeit des solaren Antriebs und der Abwärmenutzung stark ein. Es werden vorzugsweise gasbefeuerte Systeme diskutiert.

### 3.2 Offene Sorptionssysteme

Offene Sorptions-Klimaanlagen, *Desiccant Cooling Systems*, trocknen Luft sorptiv mit Hilfe von festen oder flüssigen Sorbentien und kühlen durch Verdunsten von Wasser. Zur Lufttrocknung wurden dabei bisher folgende Verfahren eingesetzt bzw. diskutiert:

- kontinuierlich arbeitende, rotierende Entfeuchter mit festen Adsorbentien (Kieselgel, hygroskopische Salze)
- Festbetten mit Schüttungen von Adsorbentien, die zwischen Adsorptions- und Desorptionszyklus umgeschaltet werden.
- flüssige Absorbentien in speziellen Absorptions- und Desorptionsapparaten.

### 3.2.1 Rotierende Entfeuchter

Das Environmental Control System, MEC, der Firma Munters, (u.a. in Schweden, U.S.A. und der Bundesrepublik Deutschland vertreten) war eines der ersten kommerziell erhältlichen Systeme dieser Art. Eine solar betriebene Ausführung, Solar MEC III, wurde u.a. vom Institute of Gas Technology, Chicago entwickelt. Kennzeichnend ist die Art der Luftführung (ventilation cycle) und die Anordnung der Komponenten des Systems.

Erste Prototypen [8] erreichten je nach Betriebsweise saisonal gemittelte Wärmeverhältnisse von  $COP_{th} = 0,49$  bis 0,51 und  $COP_{el} = 6,5$  bis 8,1. Mit Verbesserungen an Wärmeübertragern und Entfeuchter, und vor allem einer Optimierung der Luftströme im Adsorptions- und Desorptionsteil der Anlage (*balanced flow*), werden  $COP_{th} = 1,0$  und  $COP_{el} = 16$  bis 20 erreichbar<sup>1</sup>.

Berechnungsmethoden wurden für diese Systeme entwickelt, z.B. [9] und Standardbedingungen zum Vergleich von *desiccant cooling systems* durch das *Air Conditioning and Refrigeration In*stitute (ARI), U.S.A., festgelegt [10]. Komponenten und Regelung wurden verbessert z.B. [11] und [12].

Burns, et al., [13] fanden erste kommerzielle Anwendungen. Sie verwendeten einen solar regenerierten, rotierenden Trockner zur Luftentfeuchtung in der Klimaanlage eines Supermarktes zur Aufnahme der latenten Last, während die sensible Last mit einem konventionellen Kompressionskälteaggregat abgeführt wurde.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> COP<sub>el</sub> = Kūhlleistung / gesamte elektrische Leistung

Ein theoretisch maximaler Wert für das Wärmeverhältnis eines Systems mit *ventilation cycle* unter ARI-Bedingungen wurde von Kang [14] mit  $COP_{th} = 1,6$  angegeben.

Grundlegende Veränderungen in der Prozeßführung und der Anordnung der Komponenten durch Maclaine-cross [15] mit dem Ziel einer möglichst reversiblen Prozeßführung, konnten das theoretische Potential auf  $COP_{th} = 5,8$  erweitern. Kang und Maclaine-cross [14] geben für ein derart verbessertes System mit realistisch angenommenen Komponenten unter ARI-Bedingungen  $COP_{th} = 2,6$  an.

In den USA beginnt sich seit Anfang der 90er Jahre ein Markt für diese Systeme zu entwickeln [16].

Eine Energiespeicherung ist in den rotierenden Trocknern nicht möglich. Bei unzureichendem (solarem) Energieangebot wird mit Gas nachgeheizt.

## 3.2.2 Festbett-Adsorber

Als Speicher für Heiz- und Kühlenergie wurden Festbett-Adsorber 1970 von Close und Dunkle, Australien, [17] vorgeschlagen und in Zusammenarbeit mit Pryor mit Hilfe eines Rechenmodelles weiter untersucht [18], [19].

In einer Reihe von Arbeiten wurden auch in Deutschland verschiedene Aspekte dieser Systeme untersucht [20], [21], [22]. Trotz deutlicher Fortschritte in der technischen Entwicklung ist ein wirtschaftlicher Einsatz in einem breiten Markt in absehbarer Zeit nicht zu erwarten.

### 3.2.3 Flüssige Sorbentien

Hygroskopische Salzlösungen sind den festen Sorbentien im Hinblick auf eine Speicherung von Prozeßenergie zur Raumklimatisierung überlegen [23].

•

ς,

Eines der ersten offenen sorptiven Systeme zur solaren Kühlung [24] verwendete Triäthylenglykol in Wasser, also ein flüssiges Sorbens, zur Lufttrocknung. Es hat allerdings schon bei niedrigen Regenerationstemperaturen (ca. 50 °C) einen nicht zu vernachlässigenden Dampfdruck, so daß in offenen Systemen mit Arbeitsmittelverlusten und Emissionen in die Umwelt bzw. in zu klimatisierende Räume zu rechnen ist, [25].

In späteren Arbeiten wurden überwiegend wäßrige hygroskopische Salzlösungen, auf Basis von LiCl oder CaCl<sub>2</sub>, verwendet. Speziell für solare Anwendungen wurden Kollektor-Regeneratoren untersucht. Bei ihrer Entwicklung leisteten Kakabaev et al. in der UdSSR Pionierarbeit [26,27, 28,29]. Die Lösungen wurden dabei direkt im Kollektor verrieselt, erwärmt und durch einen ebenfalls erwärmten Luftstrom aus der Umgebung oder dem Gebäude aufkonzentriert.

Es wurden abgedeckte Kollektor-Regeneratoren mit erzwungener Konvektion [27,28,30,31] und auch mit natürlicher Konvektion [29] untersucht. Experimentelle Daten und Rechenmodelle über den Wärme und Stofftransport an diversen Kollektor-Regeneratoren wurden von Wood, Novak, Nelson geliefert [32] [33] [34].

Ein hybrides System mit offener Regeneration im Kollektor-Regenerator und geschlossenem, evakuiertem Absorber wurde von Wood et al. [35, 36, 37, 38, 39] entwickelt.

Stevens et al. [40] entwickelten ein auf Austauschgraden basierendes Modell zur Berechnung von Absorbern mit flüssigen Absorbentien. So'Brien und Satcunanathan [41] konstruierten einen inte-

grierten Absorber-Regenerator, der auf mechanische Zirkulation der Lösung verzichtete. Der Austauschgrad des Absorbers lag bei 0,2 bis 0,25.

#### 3.2.4 Speicherung in flüssigen Absorbentien

Die regenerierten, konzentrierten Salzlösungen eignen sich prinzipiell zur Speicherung von Prozeßenergie zur Klimatisierung. Khelifa et al. [44], [45] verglichen LiCl-Lösung und eine konditionierte CaCl<sub>2</sub>-Lösung in einer Parameterstudie unter idealisierten Bedingungen im Hinblick auf ihre Qualitäten als Speichermaterial. Das theoretische Potential wurde mit ca. 600 kWh/m<sup>3</sup> abgeschätzt und ist damit für Niedertemperaturanwendungen außerordentlich groß.

Über einen Versuch zur Bevorratung von Prozeßenergie zur Kühlung berichtete Yang [42], der ein hybrides System nach Wood [37], mit wäßriger LiCl-Lösung als Sorbens unter Klimabedingungen in Taiwan simulierte. Erste Experimente an Prototypen lieferten allerdings sehr kleine Austauschgrade für den Absorber (ca. 0,05), was auf Fremdgaseintrag in den geschlossenen, evakuierten Bereich hindeutete. (Die von ihm zitierte Literatur nennt erreichte Werte für den Austauschgrad 0,2 bis 0,3.)

Choi und Kimura [43] versuchten die konzentrierte und die verdünnte Lösung zusammen in *einem* Tank geschichtet zu speichern, was aufgrund der unterschiedlichen Dichten gut möglich sein sollte. Die Vermessung der Konzentrationen und Temperaturen im Tank zeigte allerdings eine starke Mischung. Die Einströmbedingungen wurden als Grund vermutet.

Die erreichbare Speicherdichte hängt von der Konzentrationsdifferenz der Lösung ab, die im Zusammenspiel von Regenerator und Absorber erreicht wird. Um effizient speichern zu können, muß insbesondere der Absorber hohe Austauschgrade (ca. 0,8) erreichen und mit sehr kleinen flächenspezifischen Soleströmen arbeiten können. In der Phase I dieses Forschungsvorhabens gelang es einen Absorber herzustellen, der diese Anforderungen erstmals erfüllte.

# 4 Das System zur Raumklimatisierung

Das Konzept, nach dem das zu entwickelnde Sorptionskühlsystem arbeitet, ist in Abbildung 1 dargestellt.

2

s,

### Luftentfeuchtung:

Umgebungsluft (1) wird im Sorptionsentfeuchter im Gegenstrom durch eine konzentrierte hygroskopische Salzlösung (Sole) absorptiv entfeuchtet. Die dabei freiwerdende Sorptionswärme wird über einen in den Entfeuchter integrierten Wärmeübertrager und über einen Kühlturm an die Umgebung abgeführt, um eine niedrige Restfeuchtigkeit in der entfeuchteten Luft zu erreichen. Die durch die Wasserdampfabsorption verdünnte Salzlösung wird in einem eigenen Tank gespeichert.

### Kühlung:

Die entfeuchtete Luft (2) wird mit Umluft aus dem zu klimatisierenden Raum (5) gemischt, (3) in einem regenerativen indirekten Verdunstungskühler gekühlt (4) und dem Raum (5) zugeführt. Der Raum wird damit gekühlt und entfeuchtet.

Der Kühleffekt im Verdunstungskühler wird erzielt, indem ca. 25% des bereits gekühlten Umluftstromes als Abluftstrom (6) ausgekoppelt werden. Dieser strömt über eine feuchte Austauschfläche, die in thermischem Kontakt mit der Umluft (3-4) steht. Das verdunstende Wasser auf der Austauschfläche kühlt den Umluftstrom. Der Abluftstrom erwärmt sich dabei und führt den Wasserdampf an die Umgebung ab (7).



Abbildung 1: System zur Raumklimatisierung mit offenem Sorptionsmittelkreislauf

Die auf den trockenen Luftstrom bezogene Kühlleistung dieses regenerativen, indirekten Verdunstungskühlers ist nahezu doppelt so groß wie die eines direkten, adiabaten Luftbefeuchters. Da nur der Abluftstrom befeuchtet wird, treten keine hygienische Probleme durch den Eintrag von Keimen aus nicht hinreichend aufbereitetem Wasser auf.

### **Regeneration:**

Die während der Luftentfeuchtung verdünnte Salzlösung wird im Regenerator konzentriert, wenn Wärme mit einer Temperatur von ca. 60 bis 70 °C zur Verfügung steht. Die Wärme wird über einen in den Regenerator integrierten Wärmeübertrager der Salzlösung zugeführt und desorbiert Wasser aus der Lösung. Der Wasserdampf wird durch Umgebungsluft, die durch die Abluft vorgewärmt wird (8), an die Umgebung abgegeben (9). Die regenerierte konzentrierte Lösung wird in einem separaten Tank gespeichert und bei Bedarf dem Entfeuchter zugeführt.

#### **Speicherung:**

Das Betriebsmedium ist eine wäßrige hygroskopische Salzlösung, z.B. Klimat 3930S (siehe Kapitel 13) oder LiCl-H<sub>2</sub>O. Die Salzlösungen können in konventionellen Kunststofftanks gespeichert werden. Sie sind nicht giftig, so daß keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen notwendig sind.

Das System von konzentrierter und verdünnter Lösung speichert verlustfrei Prozeßenergie zur Entfeuchtung- oder Raumklimatisierung mit großer Energiedichte, auch über lange Zeiträume und ohne thermische Isolation der Tanks. Das System eignet sich auch dazu, Prozeßenergie über größere Entfernungen zu transportieren.

# 5 Planung und Ablauf der Phase II

### 5.1 Vorausgegangene Arbeiten in Phase I

Die hier beschriebene Phase II schließt an die Phase I des Forschungsvorhabens Klimatisierung über Sorption an [46].

Projektpartner in Phase I (1.1.91-30.6.93) waren SOLVAY Deutschland GmbH in Hannover einerseits und das FhG Institut für solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg andererseits.

SOLVAY beauftragte die Fa. Menerga Apparatebau GmbH in Mülheim/Ruhr mit der Konstruktion und Fertigung einer offenen Sorptionskühlanlage und entwickelte selbst ein auf einer wäßrigen Lösung von Kalziumchlorid basierendes flüssiges Sorbens.

Das ISE beauftragte Professor Sizmann an der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) mit den experimentellen F&E Arbeiten und stellte dazu einen Mitarbeiter an den Lehrstuhl ab. In der zweiten Hälfte der Phase I arbeitete die ISE/LMU Gruppe in den Räumen des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern).

•

¥

۰.

Die Wechselwirkungen zwischen den beiden Arbeitsgruppen SOLVAY/Menerga einerseits und ISE/LMU andererseits waren gering und praktisch auf die Sorbensentwicklung beschränkt. Insbesondere hatten Menerga und LMU keinen Kontakt. Damit wurde die Entwicklung des Kernstücks der Sorptionskühlanlage, des Sorptionsentfeuchters, auf zwei grundsätzlich verschiedenen Wegen angegangen:

- 1. Dem industriellen Weg: Konstruktion und Test von Varianten auf der Basis bestehender Produkte.
- 2. Dem universitären Weg: Theoretische Ableitung der Zusammenhänge des Wärme- und Stoffaustausches, Messung von Austauschkoeffizienten, Konstruktion und Test von einzelnen Austauschflächen, Konstruktion eines Versuchsentfeuchters.

Gezeigt werden konnte in Phase I, daß es möglich ist einen Sorptionsentfeuchter zu bauen, der Luft hinreichend entfeuchten und gleichzeitig Energie zur Entfeuchtung im Sorbens speichern kann. Gezeigt wurde jedoch auch, daß dies nicht durch einfache Modifikation bestehender Produkte erreichbar ist. Das inhaltliche Problem liegt darin, einen vergleichsweise kleinen Salzlösungsstrom gleichmäßig auf einer wassergekühlten, korrosionsfesten Austauschfläche zu verteilen, die kostengünstig herstellbar ist.

### 5.2 Planungen für die Phase II

Auf der Basis der vorliegenden Informationen wurden mögliche Inhalte einer Phase II (Entwicklung und Test von Entfeuchter, weiterer Komponenten und System) sowie einer Phase 3 (Demonstrationsanlage) skizziert. Als Projektpartner waren SOLVAY, ISE, ZAE Bayern, sowie geeignete klimatechnische Anlagenbauer vorgesehen, das Volumen wurde mit ca. DM 3 Mio. abgeschätzt.

Ein solches Vorhaben konnte das BMBF 1993 nicht fördern. Förderbar erschien eine detaillierte Vermessung und Verbesserung des von ISE/LMU hergestellten Entfeuchters, sowie die experimentelle Untersuchung der in Phase I aufgebauten Versuchsklimaanlage. Ein entsprechender Antrag wurde im April 1993 kurz vor Abschluß der Phase I vom ZAE Bayern gestellt. Projektpartner waren SOLVAY und Menerga. Der Antrag definierte folgende Ziele (im Originaltext):

Um eine zuverlässige, für die Speicherung von Energie geeignete Sorptionsklimaanlage, herstellen zu können, sind noch drei Aufgabenbereiche zu bearbeiten:

- 1. Die Betriebssicherheit des in Phase I entwickelten Sorptionsreaktors ist herzustellen und nachzuweisen. Der Verteilungseinrichtung für die Salzlösung ist dabei besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Die Leistungsfähigkeit der Anlage unter verschiedenen Lastfällen ist nachzuweisen, um zukünftige Anlagen zuverlässig dimensionieren zu können.
- 2. Regelstrategien für den Absorptions- und Desorptionsbetrieb sind zu (...) entwickeln, um die Leistung der Anlage der Kühl- oder Entfeuchtungslast, bzw. der angebotenen Regenerationsleistung (...) anpassen zu können, möglichst unter Verwendung (...) handelsüblicher Regelgeräte und Sensoren.
- 3. Anlagenkomponenten wie Sorptionsreaktor oder indirekter Verdunstungskühler (...) auf der Basis der in Phase I entwickelten Austauschflächen (...) sind nach fertigungstechnischen und anwendungsorientierten Gesichtspunkten weiterzuentwickeln, um zu kompakten, preisgünstigen Produkten zu kommen.

In der hier beantragten Phase II des Forschungsvorhabens sollen die Bereiche 1. und 2. bearbeitet werden.

#### Ziel der Phase II ist es:

basierend auf den Ergebnissen der Phase I des Forschungsvorhabens (BMFT Nr. 032 9151 B) Unterlagen zu erstellen, nach denen eine funktionsfähige Sorptionsklimaanlage ausgelegt werden kann die Betriebsmittel auf CaCl<sub>2</sub>-Basis verwendet und die zur Speicherung von Energie in konzentrierter und verdünnter Salzlösung geeignet ist.

#### Teilziele sind dabei:

- 1. Sorptionsreaktoren durch Kennlinien zu charakterisieren.
- 2. Die Betriebssicherheit des in Phase I entwickelten Sorptionsreaktors herzustellen und seine Funktion zu verbessern
- 3. Die Leistungsfähigkeit der Klimaanlage unter verschiedenen Lastfällen nachzuweisen.
- 4. Regelstrategien zu entwickeln, zur Anpassung der Kühl- und Entfeuchtungsleistung der Klimaanlage an eine vorgegebene Last.
- 5. Verfahren zur effizienten Regeneration des Betriebsmittels zu entwickeln.

Die Förderung durch das BMBF wurde nach Antragstellung (März 1993) für den Zeitraum vom 1.6.1994 bis 30.9.1995 bewilligt. Wesentliche Erkenntnisse über das in Phase I entwickelte System lagen inzwischen nach Untersuchungen des ZAE Bayern vor. Der Entfeuchter entsprach noch nicht den technischen und ökonomischen Ansprüchen. Der Bedarf nach einer Weiterentwicklung war klar erkennbar.

# 5.3 Ziel der Phase II

In einer gemeinsamen Sitzung der Projektpartner ZAE Bayern, SOLVAY und Menerga am 26.4.1994 mit Herrn Professor F. Steimle, Universität Essen, der das Vorhaben beratend begleitete, und Herrn Gehrmann, dem zuständigen Projektbetreuer der BEO, entschlossen sich die Anwesenden die Phase II auf das Thema *Entfeuchtung* zu konzentrieren. Das Thema *energetische Bewertung* sollte in einem gesonderten Vorhaben an der Universität Essen bearbeitet werden. Am 6.10.1994 definierten die Projektpartner das Ziel der Phase II neu. Es lautete:

### Herstellung eines unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten funktionierenden Sorptionsentfeuchters.

Die Anwesenden waren sich einig, daß dieses ehrgeizige Ziel im Rahmen der zur Verfügung stehenden zeitlichen und finanziellen Mittel nur schwer erreichbar sein würde. Es erschien jedoch sinnvoller die Entwicklung des Entfeuchters voranzutreiben, als eine Klimaanlage zu untersuchen, die ohne guten Entfeuchter nie zum Einsatz kommen würde.

### 5.4 Arbeitsprogramm und Vorgehensweise

Das Arbeitsprogramm wurde nach gemeinsamer Analyse der vorliegenden Ergebnisse durch die Projektpartner der veränderten Zielsetzung angepaßt:

- 1. Vermessen des in Phase I beim ZAE Bayern entwickelten Sorptionsentfeuchters. Dies war zum Zeitpunkt der Neudefinition bereits geschehen.
- 2. Klärung theoretischer Fragen wie:

Welche Geometrie der Austauschfläche ist optimal, Rohre, Platten etc.? Welchen Austauschgrad muß der Entfeuchter erreichen, um den Anforderungen der Klimatechnik zu genügen? Wie muß die Kühlung der Austauschfläche erfolgen? Ist eine Kühlung im Kreuzstrom ausreichend oder ist Gegenstrom erforderlich?

3. Weiterentwicklung der Austauschflächen, aus denen der Entfeuchter aufgebaut wird, unter Berücksichtigung der Fragen:

Wie kann die Benetzung der Austauschflächen des Entfeuchters mit dem Sorbens vollständig und kostengünstig realisiert werden? Wie kann insbesondere eine hydrophobe Polypropylenfläche benetzt werden?

Wie kann die Salzlösung gleichmäßig auf der Austauschfläche verteilt werden?

- 4. Konstruktion und Bau eines verbesserten Sorptionsentfeuchters als klimatechnische Komponente.
- 5. Test und Bewertung des verbesserten Entfeuchters.

Die Arbeiten erfolgten in enger Abstimmung zwischen den Projektpartnern. Dazu wurden 7 Projekttreffen durchgeführt, auf denen die Partner über den Fortschritt der Arbeiten informiert wurden und das weitere Vorgehen festlegten. Das Vorhaben wurde kontinuierlich begleitet von Prof. F. Steimle und seinen Mitarbeitern an der Universität Essen, die seit Anfang 1994 selbst an einem BMBF geförderten Vorhaben zu einem ähnlichen Thema arbeitet. Menerga arbeitete an einem kostengünstigen Herstellungsverfahren für den Entfeuchter. ZAE Bayern an der Beantwortung der theoretischen Fragen, der Verbesserung der Austauschflächen und der gleichmäßigen Verteilung des von SOLVAY neu entwickelten Sorbens Klimat 3930S.

In Phase II wurden aufgrund der begrenzten Zeit zunächst die entwicklungstechnischen Möglichkeiten geprüft, die eine kostengünstige Realisierung für kleine Serien erwarten lassen. Konzepte, die Fertigungstechniken erfordern, die vorab einen größeren Investitionsbedarf auslösen, wurden nicht systematisch verfolgt.

Das Projekt wurde wegen Verzögerungen bei der Herstellung des neuen Sorptionsentfeuchters bei gleicher Fördersumme bis zum 29.2.1996 verlängert.

# 6 Ergebnis der Phase II

Das Ergebnis der Phase II ist ein Zwischenergebnis. Das Ziel: *Herstellung eines unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten funktionierenden Sorptionsentfeuchters* konnte in dieser Phase noch nicht erreicht werden. Fortschritte auf dem Weg dahin wurden erzielt. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte sind folgende:

### 6.1 Vermessung des Sorptionsentfeuchters aus Phase I

Der in Phase I beim ZAE Bayern entwickelte Sorptionsentfeuchter zeigte abnehmende Austauschleistung mit fortschreitendem Betrieb, die auf die Beschichtung der Austauschflächen mit einem ungeeigneten Vlies zurückgeführt werden konnten. Die Austauschleistung stabilisierte sich auf niedrigerem Niveau. Mit einem Luftentfeuchtungs-Austauschgrad von ca. 60 % und einer Energiespeicherdichte von ca. 800 MJ/m<sup>3</sup> wurden ca. 75 % der projektierten Leistungen erzielt. Abgesehen von der Veränderung der Austauschfläche beschreiben die verwendeten Simulationsmodelle den Entfeuchter im Rahmen der Meßgenauigkeit zutreffend.

### 6.2 Klärung theoretischer Fragen

Die Verwendung von Platten als Austauschflächen löst bei gleicher volumenspezifischer Flächendichte wahrscheinlich geringere Fertigungskosten aus als die Verwendung von Rohren.

Der erforderliche stoffliche Austauschgrad des Entfeuchters sollte größer als 70 % sein, um mit den favorisierten Sorbentien genügend Reserven für ungünstige Betriebszustände bereitzustellen. Bei so hohem Austauschgrad sind im Gegenstrom gekühlte Entfeuchter deutlich kleiner, als im Kreuzstrom gekühlte, so daß sich die höheren spezifischen Kosten des Gegenstromes wahrscheinlich amortisieren.

### 6.3 Weiterentwicklung der Austauschflächen

Eine gleichmäßige Verteilung der Salzlösung auf der Austauschfläche läßt sich nur mit einer guten Anfangsverteilung erreichen. Dazu wurden mikroporöse bzw. gelochte Schläuche und Bisektionsverteiler untersucht. Für das Sorbens Klimat sind gelochte Schläuche und Bisektionsverteiler grundsätzlich geeignet. Die untersuchten mikroporöse Schläuche sind ungeeignet. Die Testergebnisse mit verschiedenen gelochten Schläuchen sind noch unbefriedigend. Die Ergebnisse mit Bisektionsverteilern sind erfolgversprechend. Gelochte Schläuche können nur mit gut gefilterter Sole betrieben werden. Bisektionsverteiler sind nur in großen Serien (mit Spritzgußtechnik) kostengünstig herzustellen.

÷

c

Als Konstuktionsbasis für die Austauschflächen dienten wie in Phase I Stegdoppelplatten aus Polypropylen (PP). Sie sind korrosionsfest, stellen Kühlkanäle bereit und sind preisgünstig. PP ist jedoch hydrophob. Die vollständige Benetzung der Fläche ist deshalb nur mit einer Beschichtung möglich.

Als Beschichtung kommen nur wenige kostengünstige technische Vliese in Frage. Sie lassen sich rein thermisch oder mit Ultraschalltechnik auf die PP-Flächen schweißen. Ultraschallschweißen ist in kleinen Serien zu teuer. Die angewendeten Fertigungstechniken für das thermische Schweißen sind unausgereift. Das bisher erreichte Ergebnis ist deshalb noch unbefriedigend.

Es gibt textil beschichtete Stegdoppelplatten im Handel. Die Flächen benetzen relativ gut und erwiesen sich in ersten Tests bei 80 °C in Klimat 3930S als beständig. Die Beschichtung ist zu dick für den diskutierten Anwendungsfall, kann jedoch grundsätzlich auch dünner hergestellt werden. Die Preise dafür sind noch nicht bekannt.

PP kann in verschiedenster Weise plasmabeschichtet werden. Die wenigen getesteten Schichten auf PP waren hydrophil. Die Verteilung der Sole auf glatten Flächen ist jedoch unbefriedigend. Es ist eine Textur der Fläche erforderlich, um Einschnürungen des Solefilms und Trockenfallen der Fläche zu verhindern. Die Schichten ließen nach einigen Monaten Alterungserscheinungen erkennen.

### 6.4 Konstruktion und Bau eines verbesserten Sorptionsentfeuchters

Es wurde ein Sorptionsentfeuchter konstruiert, der aus einzelnen Austauschflächen aufgebaut ist, die im Kreuz-Gegenstrom gekühlt werden. Die Firma Menerga entwickelte ein Fertigungsverfahren, in dem vliesbeschichtete PP-Stegdoppelplatten zu einem Entfeuchter verklebt werden, das Kostenvorteile gegenüber dem in Phase I verwendeten Schweißverfahren erwarten ließ. Das Verfahren funktionierte bei kleinen Entfeuchtern mit ca. 5 Platten. Beide Versuche den Testentfeuchter aus 50 Platten aufzubauen, scheiterten jedoch an Lecks im Wasserkreislauf. Der vorgesehene Absorptionstest konnte deshalb nicht vorgenommen werden.

### 6.5 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Entwicklung des Entfeuchters ist weder im Hinblick auf die Funktion noch im Hinblick auf die Herstellkosten abgeschlossen. Eine Verwertung der erzielten Ergebnisse ist in der weiteren Entwicklung möglich und sinnvoll.

Viele verfahrenstechnische und fertigungstechnische Möglichkeiten, auf die in den anschließenden Kapiteln hingewiesen wird, konnten während der Phase II nicht verfolgt oder nicht ausgeschöpft werden.

Die aktuelle Konstruktion des Entfeuchters, der einzelnen Konstruktionsvarianten und der verschiedenen Fertigungsverfahren kann als Basis für eine Schätzung der spezifischen Herstellkosten verwendet werden. Die spezifischen Kosten sind wichtige Parameter bei wirtschaftlichen Vergleichen verschiedener Kühlsysteme.

### 6.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Über den Inhalt des Forschungsvorhabens wurde auf folgenden Veranstaltungen berichtet:

1.)Veranstalter:	Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V DGS
Veranstaltung:	9. Internationales Sonnenforum
Termin:	28.61.7.1994
Ort:	Stuttgart
Vortragender:	W. Keßling
Thema:	Experimentelle Untersuchungen an einem neuartigen Sorptionsentfeuchter

2.)Veranstalter: Veranstaltung: Termin:	Forschungsverbund Sonnenenergie Solar unterstützte Klimatisierung von Gebäuden mit Niedertemperatur verfahren 3 /4, 7, 1995
Ort:	Munzingen bei Freiburg, Brsg.
Vortragender:	E. Lävemann
Thema:	Neuartiger Entfeuchter für DEC-Systeme
3.)Veranstalter:	ISES
Veranstaltung:	ISES Solar Word Congress: In Search of the Sun
Termin:	1115. 9. 1995
Ort:	Harare, Zimbabwe
Vortragender:	E. Lävemann
Thema:	High Density Energy Storage for Desiccant Cooling Systems
4.)Veranstalter: Veranstaltung: Termin: Ort: Vortragender: Thema:	Technische Universität München und ZAE Bayern 2nd Munich Discussion Meeting 95: Solar Assisted Cooling with Sorp- tion Systems 17./18.10. 1995 München W. Keßling Energy Storage in Open Cycle Liquid Desiccant Cooling Systems
5.)Veranstalter:	Fachgruppe Gebäude Kühlung
Veranstaltung:	Arbeitsgruppensitzung: Sorptionsgestützte Klimatisierung
Termin:	23.11. 1995
Ort:	Ulm
Vortragender:	E. Lävemann
Thema:	Energiespeicherung in flüssigen Absorbentien
6.)Veranstalter:	Ludwig-Maximilians-Universität München, Sektion Physik
Veranstaltung:	Oberseminar: Neuere Arbeiten zur Energieumwandlung
Termin:	24.11. 1995
Ort:	München
Vortragender:	E. Lävemann
Thema:	Klimatisierung über Sorption

Für die Veranstaltungen 1 bis 4 wurden Tagungsbände erstellt, die beim Veranstalter zu beziehen sind.

Der Abschlußbericht zur Phase I [46] ist bei der Technischen Informations-Bibliothek (TIB) -Deutsche Forschungsberichte - Welfengarten 1B, 30167 Hannover zu beziehen.

.

### 7 Theoretischer Hintergrund

Die unten gemachten Darstellungen knüpfen an den Kenntnis- und Entwicklungsstand der Phase I an. Der in [46] erarbeitete theoretische Hintergrund wird als bekannt vorrausgesetzt. Eine Wiederholung wesentlicher Definitionen wird verkürzt gegeben.

#### 7.1 Luftentfeuchtung und Energiespeicherung

Für die untersuchten offenen Absorptionsprozesse wird feuchte Luft als ein Gemisch von Wasser (Absorptiv) und trockener Luft (Inertgas) betrachtet. Die mit der Luft geführte Masse Wasser  $m_w$  wird über die Wasserbeladung der Luft (Wassergehalt)  $x_1 := m_w/m_1$  auf die als inert betrachtete Masse der trockenen Luft  $m_1$  bezogen. Die Luftentfeuchtung  $\Delta x_1$  läßt sich so über die Änderung der Wasserbeladung der Luft zwischen Ein- und Austritt eines Absorptionsprozesses beschreiben.

$$\Delta x_{l} := x_{l}' - x_{l}'' = \frac{m_{w}' - m_{w}''}{m_{l}}$$
(2.1)

Die der Luft entzogene Wassermenge wird von der Salzlösung (Sole) aufgenommen. Die aufgenommene Wassermenge  $\Delta m_w = m''_w - m'_w$  wird, analog zur Luft, auf den Massenanteil des inerten Stoffes bezogen. Man erhält die Beladungsänderung des Salzes zu

$$\Delta x_s = \Delta m_w / m_s \,. \tag{2.2}$$

Damit läßt sich die spezifische Speicherdichte für Entfeuchtungsenthalpie (<u>S</u>torage <u>C</u>apacity) bezogen auf das Volumen der verdünnten Salzlösung angeben:  $SC = \Delta m_w \cdot r_0 / V_{Lsg}^v$ . Das Volumen der verdünnten Salzlösung ist das Mindestvolumen, daß man zur Bevorratung von konzentrierter und verdünnter Salzlösung vorhalten muß. Mit der Konzentration der Salzlösung

$$C = m_s / (m_s + m_w) \tag{2.3}$$

und der Dichte  $\rho_{Lsg}^{v} = \rho_{Lsg}(T^{U}, C_{Lsg}^{v})$  wird die Speicherdichte

$$SC = \Delta x_s \cdot r_0 \cdot C_{Lsg}^{\nu} \cdot \rho_{Lsg}^{\nu}$$
(2.4)

Die Speicherdichte ist um so größer, je größer die mittlere Beladungsänderung des Salzes ist, die sie im Absorptionsprozeß unter den gegebenen Betriebsbedingungen erfährt.

#### 7.2 Luft-Salz-Massenstromverhältnis

Mit Gleichung 2.1 und 2.2 gilt für die übergegangene Masse Wasser:

$$\dot{m}_1 \cdot \Delta x_1 = \dot{m}_s \cdot \Delta x_s \tag{2.5}$$

Das Verhältnis der inerten Massenströme Luft zu Salz (Air Salt Mass Ratio) wird mit ASMR bezeichnet.

24

$$ASMR = \frac{\dot{m}_{l}}{\dot{m}_{s}} = \frac{\Delta x_{s}}{\Delta x_{l}}$$
(2.6)

•

Für die Praxis ist das Verhältnis Luftmassenstrom zu Solemassenstrom (Mass <u>Ratio</u>) MR am (jeweiligen) Eintritt in den Sorptionsprozeß relevant. Mit Gleichung 2.3 erhält man:

$$MR = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_{LSR}} = ASMR \cdot C' .$$
(2.7)

### 7.3 Anzahl der Übergangseinheiten NTU

Die Anzahl der Übergangseinheiten (NTU) beschreibt den apparativen Aufwand, der für den Stoffbzw. Wärmeaustausch betrieben wird in einem vereinfachten isothermen Modell:

$$NTU = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{(x - x^*(C, T))} = \frac{\rho_l \cdot \beta \cdot A}{\dot{m}_l}$$
(2.8)

#### 7.4 Enthalpiebilanz Luft

Die gesamte dem Luftstrom entzogene Enthalpie wird als Summe aus latentem und sensiblem Enthalpiestrom

$$\Delta \dot{H}_{tot} = \Delta \dot{H}_e + \Delta \dot{H}_s \tag{2.10}$$

angegeben.

Aus der spezifische Entfeuchtungsleistung, der dem Luftstrom entzogenen spezifischen latenten Enthalpie, kann die Entfeuchtungsleistung bestimmt werden zu:

$$\Delta \dot{H}_{e} = \dot{m}_{1} \cdot \Delta h_{e} = \dot{m}_{1} \cdot \Delta x_{1} \cdot r_{0}. \qquad (2.9)$$

### 7.5 Wassermassenbilanz Luft - Salzlösung

Zur Analyse der Wassermassenbilanz zwischen Luft und Salzlösung wird der Faktor

$$\kappa = \frac{\dot{m}_i' \cdot \Delta x_i}{\dot{m}_s' \cdot \Delta x_s} \tag{2.11}$$

verwendet. Er vergleicht die von der Luft abgegebene Wassermenge mit der von der Salzlösung aufgenommen Wassermenge und ermöglicht damit eine Bewertung der experimentellen Ergebnisse. Bei exakter Wassermassenbilanz gilt  $\kappa = 1$ .

# 8 Experimentelle Untersuchungen am Sorptionsentfeuchter PSR 1000

Wesentlicher Entwicklungsschwerpunkt der Phase I war die technische Realisierung eines Sorptionsentfeuchters der

- eine möglichst effektive Entfeuchtung der Luft,
- bei gleichzeitiger Erzielung einer hohen Speicherdichte für Entfeuchtungsenergie in der verwendeten Sorptionslösung,
- bei geringen geometrischen Abmessungen und kleinem Druckabfall ermöglicht.

Zur Untersuchung der entwickelten Sorptionstechnologie in technischen Maßstab wurde am ZAE Bayern parallel dazu eine Versuchssorptions-Klimaanlage V1000 bestehend aus einen Sorptionsentfeuchter (z.B. PSR1000) und einem indirektem Verdunstungskühler (Fa. Dricon) für einen Nennvolumenstrom von ca. 1000 m<sup>3</sup>/h mit einer Nennleistung von ca. 8 kW errichtet. Sie ist in eine Versuchsanlage eingebaut, die ein Umgebungsklima und eine Klimatisierungslast nach kontrollierten Bedingungen darstellen kann. Der Sorptionsentfeuchter kann gleichzeitig zur regeneration der Salzlösung (Desorption) eigesetzt werden.

### 8.1 Versuchsanlage V1000

Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau der Versuchsanlage V1000. Sie ist modular aufgebaut und kann auch ohne den Verdunstungskühler und den Raumsimulator betrieben werden.



Abbildung 2: Schematische Aufsicht auf die Versuchsanlage V1000. Der hervorgehobene Bereich markiert die Module, an denen experimentiert wurde.

### 8.2 Meßtechnik

Der Sorptionsentfeuchter wird mit drei Strömen versorgt, dem Luftstrom, dem Solestrom und dem Kühl / Heizwasserstrom. Diese werden in ihren Eintrittszuständen ( $\diamond$ ') und Austrittszuständen ( $\diamond$ ") von einer rechnergestützten Meßtechnik erfaßt (siehe Abbildung 3). Vorgänge im Inneren des Sorptionsentfeuchters wurden nicht untersucht. Aus den zeitaufgelöst (ca. 30 s Takt) erfaßten Meßdaten wurden mit den Auswerteprogrammen zunächst stationäre Zustände herausgefiltert. Die Ergebnisse eines Versuches werden aus Mittelwerten der Meßdaten über mindestens 30 Minuten gewonnen.

### 8.2.1 Luft

Meßgröße	Bezeichung	Gerät	Genauigkeit
Eintrittstemperatur	$T_{1}^{\prime}$	2 Mantelthermoelemente	0,2 K
-	•	1 Pt100-Widerstandsthermometer	0,07 K
		individuell kalibriert	
Austrittstemperatur	$T_{l}^{\prime\prime}$	7 Mantelthermoelemente über Querschnitt verteilt	0,2 K
		1 Pt100- Widerstandsthermometer	0,07 K
		individuell kalibriert	
Eintrittstaupunkt	<i>Î</i> .'	Taupunktspiegelmeßgerät Hygro M1 der	0,2 K
F	-1	Firma General Eastern mit SIM 12H Sen-	
		sor	
Austrittstaupunkt	$\hat{T}''_{1}$	Taupunktspiegelmeßgerät Hygro M3 der	0,2 K
*	1	Firma General Eastern mit D2 Sensor	
Volumenstrom	$V_{1}^{\prime}$	Volumenstromzähler der Firma Elster, Typ	2·10 <sup>-3</sup> m³/s
	,	Quantometer	
Gesamtdruck	P	100 kPa Absolutdruckmeßgerät der Firma	1000 Pa
		Baraton	
Differenzdruck	$\Delta P$	1 kPa Differenzduckmeßgerät der Firma	1 Pa
		Baraton	

### 8.2.2 Salzlösung

Zu jedem stationären Zustand wurde eine Probe der Salzlösung an Ein- und Austritt genommen, anhand der die jeweilige Dichte bestimmt wurde. Diese wurden über eine Protokolldatei von den Auswerteprogrammen übernommen und gemeinsam mit den Meßdaten weiterverarbeitet.

Die Probenentnahmestelle der zugeführten Salzlösung liegt direkt vor der Soleverteilung im Sorptionsentfeuchter. Um die Standzeit der Membranschläuche der Soleverteilung zu verlängern, wurde die Salzlösung im sogenannten Solemodul mit einer mittleren Porenweite von 0,2 µm gefiltert. Damit ist die zugeführte Salzlösung gleichzeitig auch homogen durchmischt.

Die (bei Absorption) verdünnte Salzlösung tropft aus dem Sorptionsentfeuchter ab und wird in einem Sammelbehälter unterhalb aufgefangen. Aufgrund ungleichmäßiger Durchströmung des Sorptionsentfeuchters sowohl mit Luft als auch mit Salzlösung stellt sich in den 29 Kanälen lokal ein stationärer Zustand mit lokalem  $MR^k$  ein. Die unterschiedlich verdünnte Salzlösung vermischt sich im Sammelbehälter. In regelmäßigen Intervallen wurde bei der Entleerung dieses Sammelbehälters eine Probe der abgeführten Salzlösung aus der Abpumpleitung entnommen. Durch vorhergehende Versuche war sichergestellt worden, daß somit die für den Austrittszustand representativ durchmischte Salzlösung gewonnen werden kann.

Meßgröße	Bezeichung	Gerät	Genauigkeit
Eintrittstemperatur	<i>T</i> .'	1 Pt100-Fühler	0,07 K
-	3	individuell kalibriert	
Austrittstemperatur	$T_{\bullet}^{\prime\prime}$	1 Pt100-Fühler	0,07 K
<b>^</b>	3	individuell kalibriert	
Eintrittsmassenstrom	$\dot{M}_{s}$	Laborwaage LC43 der Firma Satorius	5·10 <sup>-5</sup> kg/s
Eintrittsdichte	ρ'	DMA 38 Biegeschwingdichtemeßgerät der	1 kg/m <sup>3</sup>
	15	Firma Anton Paar	
Austrittsdichte	$\rho_{*}^{\prime\prime}$	DMA 38 Biegeschwingdichtemeßgerät der	1 kg/m <sup>3</sup>
	15	Firma Anton Paar	

•

### 8.2.3 Kühl- / Heizkreislauf

Meßgröße	Bezeichung	Gerät	Genauigkeit
Eintrittstemperatur	$T_{-}^{\prime}$	1 Pt100-Fühler	0,07 K
	P	individuell kalibriert	
Austrittstemperatur	$T_{n}^{\prime\prime}$	1 Pt100-Fühler	0,07 K
<b>A</b>	p	individuell kalibriert	
Volumenstrom	V	Volumenstromzähler der Firma Aatech,	$5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{3}/\text{s}$
	, b	Typ Quantometer	

Weitere Details zur Auslegung, Aufbau und Meßtechnik siehe Abschlußbericht Phase I [46].



Abbildung 3: Meßstellen am Sorptionsentfeuchter.

- - -- -- -- -- --

### 8.3 Sorptionsentfeuchter

### 8.3.1 Sorptionsentfeuchter PSR1000

Der Sorptionsentfeuchter hat die Aufgabe, feuchte Luft mit Hilfe einer hygroskopischen Salzlösung zu trocknen. Dies wird dadurch ermöglicht, daß die Salzlösung auf Austauschflächen fein verteilt mit der Luft in Kontakt gebracht wird. Die bei dem Prozeß freiwerdende Absorptionswärme wird in einem Kühlkreislauf abgeführt.

In Abbildung 4 ist der Sorptionsentfeuchter mit seinen drei wechselwirkenden Strömen aus Luft, Salzlösung und Wasser skizziert. Die konzentrierte Salzlösung wird am oberen Ende des Sorptionsentfeuchters zugeführt, über ein Verteilungssystem aus porösen Schläuchen oben auf die Austauschflächen gegeben und fließt dann im Schwerefeld über die vliesbeschichteten Austauschflächen nach unten.

Abbildung 5 zeigt schematisch den Aufbau der Austauschflächen. Diese sind aus einzelnen PP-Stegdoppelplatten aufgebaut. An den offenen Seiten sind durch spezielle PP-Profile die einzelnen Platten wasserdicht verschweißt. Diese Kunststoff-Wärmetauscherplatten wurden modular zu einem Sorptionsentfeuchter aneinandergereiht. Durch den gewählten Aufbau strömt das Kühl/ Heizwasser quer zum Luft- und Solestrom. Durch wiederholte Umlenkung wird ein Kreuz-Gegenstrom Wärmeaustausch realisiert.

Auf der oberen Längskante der Platten sind, durch ein gemeinsames Kunststofformteil gehalten, für jede Plattenseite getrennt ein Membranschlauch angebracht. Die PP-Stegdoppelplatten sind seitlich mit einem Vlies beschichtet. Das Vlies wird durch einen dreidimensionalen PE-Kunststoffabstandshalter, der die Kanalbreite vorgibt, auf der Austauschfläche fixiert. Die massiven Längsstege des Abstandshalters bedecken ca. 20 % der mit Vlies beschichteten Austauschflächen. Die Querstege tragen außerdem zu einer Verwirbelung der Luft sowie der Salzlösung bei.



Abbildung 4: Schematische Ansicht des Sorptionsentfeuchters sowie der Stoffströme: Luft, Salzlösung und Kühl / Heizwasser. Maße siehe Tabelle 1.



Abbildung 5: Schematischer Aufbau der Austauschflächen

		Versuchsentfeuchter PSR 1000 Betriebsdaten	Luftentfeuchter 11/95 Fa. Menerga Auslegungsdaten
Маве	$B \cdot H \cdot T$	$1000 \cdot 960 \cdot 380 \text{ mm}^3$	$500 \cdot 1000 \cdot 620 \text{ mm}^3$
Anzahl der Luftkanäle	n	29	50 .
Abstand der Austauschflächen	a	8 mm	ca. 5 mm
Brutto Austauschfläche	A	ca. 58 m <sup>2</sup>	ca. 49 m <sup>2</sup>
Luftvolumenstrom	$\dot{V}_{l}$	ca. 1000 m³/h	ca. 900 m <sup>3</sup> /h
Wasserkühlung	, m <sub>w</sub>	max. 4300 l/h	max. 4000 l/h
Solemassenstrom	m <sub>Lsg</sub>	ca. 15 kg/h	ca. 12,5 kg/h
spezifischer Solestrom Sole	ν <sub>Lsg</sub>	ca. 0,2 l/(hm <sup>2</sup> )	ca. 0,2 l/(hm <sup>2</sup> )

Tabelle 1: Maße der entwickelten Sorptionsentfeuchter im Vergleich [46], siehe auch Kapitel 12

### 8.4 Absorptionsexperimente

An dem Sorptionsentfeuchter PSR1000, wurden eine Reihe von Absorptions- und Desorptionsexperimenten mit LiCl-H<sub>2</sub>O als Sorptionsmittel durchgeführt. Der Schwerpunkt lag auf den Absorptionsexperimenten und dort auf der Frage: Welcher Austauschgrad wird bei gegebenem Luftstrom in Abhängigkeit vom Salzlösungsmassenstrom erreicht.

2

Die Ergebnisse ausgewählter Absorptionsexperimente sind in Tabelle 2 und Abbildung 6 und Abbildung 7 zusammengefaßt. Die Versuchsbedingungen wurden in Anlehnung an die *ARI*-Standardbedingungen gewählt. Umgebung, d.h. Bedingung am Eintritt in den Entfeuchter sind: Lufttemperatur 35 °C und Luftfeuchte 14,5 g/kg. Daraus ergibt sich mit einem idealen Kühlturm eine Kühlgrenztemperatur von ca. 24 °C. Zur Untersuchung des reinen Sorptionsprozesses wurden einige Experimente mit einer Lufteintrittstemperatur von ca. 24 °C durchgeführt. Die Eintrittskonzentration der LiCl-H<sub>2</sub>O-Lösung betrug in allen Experimenten 40,3 %.

Für diese Versuchsbedingungen ist der für Luftentfeuchtung optimale Betriebspunkt bei MR = 80. Dabei kann theoretisch eine maximale Luftentfeuchtung von  $\Delta x_1 = 11,2$  g/kg und eine Speicherdichte von SC = 1310 MJ/m<sup>3</sup> erreicht werden.

Exp.	$T_{l}^{\prime}$	$x'_l$	<i>ṁ</i> į	$\dot{m}'_{Lsg}$	MR	$\Delta x_{l}$	$\Delta x_s$	SC	$\Delta \dot{H}_{e}$	$\Delta \dot{H}_{tot}$	к
	°C	g/kg	kg/h	kg/h	kg/kg	g/kg	kg/kg	MJ/m <sup>3</sup>	kW	kW	1
wl	35,0	14,5	820	18,0	45	9,6	0,84	735	5,5	8	1,30
w2	35,0	14,4	820	8,4	98	8,4	1,35	1000	4,8	7,3	1,44
1a'	35,0	14,5	871	17,2	48	7,1	0,74	828	4,2	6,6	1,34
1b'	35,0	14,6	860	17,2	50	7,8	0,74	846	4,5	6,9	1,21
3a	24,1	14,4	1101	19,4	57	3,9	0,49	540	2,9	-	1,13
3b -	24,1	14,4	1098	14,0	78	3,4	0,65	610	2,5	-	1,02
3c	24,1	14,4	1099	11,5	95	3,2	0,71	685	2,4	-	1,07
3d	24,1	14,4	1102	9,7	113	2,9	0,88	707	2,2	-	0,95
3e	24,0	14,4	1102	8,0	137	2,8	0,95	805	2,1	-	1,03
3g	24,0	14,5	1103	9,5	116	3,0	0,89	743	2,3	-	0,99
3h	24,0	14,5	1105	15,0	74	3,5	0,67	595	2,7	-	0,94
4a	24,1	14,7	1130	7,3	155	3,2	1,02	1000	2,5	-	1,19
4b	24,2	14,6	1123	9,8	115	3,6	0,92	854	2,7	-	1,09
4c	24,2	14,7	1120	11,8	95	3,8	0,80	793	2,9	-	1,11
4d	24,2	14,7	1122	114,4	78	4,1	0,75	720	3,2	-	1,07
4e	24,2	14,7	1124	18,3	61	4,6	0,60	641	3,4	-	1,11
4f	24,2	14,6	1127	14,5	78	4,2	0,75	733	3,2	-	1,09
4g	24,1	14,7	1128	9,7	117	3,9	0,95	937	3,0	-	1,17
4h	24,1	14,6	1129	7,8	144	3,6	1,16	1013	2,8	-	1,11
7a	24,0	14,5	1029	18,0	57	6,2	0,79	<i>7</i> 79	4,4	-	1,13

Tabelle 2: Ausgewählte Absorptionsexperimente mit LiCl-H2O



Abbildung 6: Luftentfeuchtung über dem Massenstromverhältnis für ausgewählte Absorptionsexperimente mit LiCl-H<sub>2</sub>O. Versuchszuordnung siehe Tabelle 2.

In Abbildung 6 ist die erreichte Entfeuchtung der Luft, die Differenz von Eintritts- und Austrittsfeuchte, über dem Massenstromverhältnis MR von Luft zu konzentrierter Salzlösung aufgetragen. In einem Experiment aufeinander folgende Betriebszustände sind durch Linien verbunden. Es sind außerdem Linien gleicher Anzahl von Stoffübergangseinheiten (NTU) als Schätzhilfe eingezeichnet. " $NTU = \infty$ " kennzeichnet die Werte, die bei unendlich großer Austauschfläche theoretisch erreichbar wären.

Die exakte Berechnung der *NTU* (vergleiche Kapitel 7) setzt die Kenntnis der örtlichen Temperatur der Salzlösung auf der Austauschfläche voraus. Meßtechnisch werden jedoch nur die Temperaturen des Kühlwassers am Ein- und Austritt exakt erfaßt. Die eingezeichneten Linien wurden berechnet für die mittlere Kühlwassertemperatur des Experimentes 1a'. Die örtliche Temperatur der Salzlösung ist in jedem Falle höher als die örtliche Temperatur des Kühlwassers. Die Abschätzung ist daher eher konservativ im Sinne von: dieser *NTU* -Wert wurde mindestens erreicht. Die Kühlwassertemperaturen in den anderen Versuchen differieren etwas. In der gewählten Auflösung ist die Abweichung jedoch kaum sichtbar, so daß die gewählte Abschätzung für die Interpretation der Daten genügen kann.

In Abbildung 7 ist die erreichte Speicherdichte für Entfeuchtungsenergie (siehe Kapitel 7), über dem Massenstromverhältnis *MR* von Luft zu konzentrierter Salzlösung aufgetragen. Wiederum sind die in einem Experiment aufeinander folgende Betriebszustände durch Linien verbunden und die Linien gleicher Anzahl von Stoffübergangseinheiten (*NTU*) als Schätzhilfe eingezeichnet.

## 8.5 Ergebnisse

### 8.5.1 Luftentfeuchtung

Das Experiment w mit den Betriebszuständen 1 und 2 war das erste Experiment und wurde noch am Ende der Phase 1 durchgeführt. Die Vliese auf den Austauschflächen waren neu. Die Dimensionierung der Fläche des Entfeuchters erfolgte nach den Meßergebnissen des Stoffaustauschkoeffizienten am Monokanal mit NTU = 4. Die Messungen zeigen, daß dieser Wert etwa erreicht wird. Die Abhängigkeit vom Solemassenstrom orientiert sich an der Linie NTU = konstant. Dies ist zu erwarten, wenn die benetzte Austauschfläche und der Stoffaustauschkoeffizient konstant bleiben. Der Stoffaustauschkoeffizient hängt bei gegebener Geometrie nahezu ausschließlich von der Luftgeschwindigkeit über der Austauschfläche ab. Die blieb in diesem Experient konstant. Die Verminderung der Luftentfeuchtung beim Übergang von Betriebszustand w1 zu w2 beruht also auf einem kapazitiven Effekt.

Die Experimente 1a' und 1b' wurden einige Monate später durchgeführt, nachdem schon einige Versuche stattgefunden hatten. Die Entfeuchtungsleistung ist gegenüber dem Experiment w deutlich zurückgegangen.

٤,

•

Der um den Faktor 2 reduzierte Wert für *NTU* deutet darauf hin, daß ca. die Hälfte der Fläche nicht mehr benetzt wird. Der Trend setzt sich zunächst fort (Experimente 3 und 4) und stabilisiert sich dann auf niedrigem Niveau.

Die Ursache für diese Verringerung der Austauschleistung ist mit großer Wahrscheinlichkeit das Auswaschen eines Benetzungsmittels, das vom Hersteller nicht deklariert und von uns, bei der Beurteilung des Vlieses, zunächst nicht bewertet wurde.

### 8.5.2 Benetzungsverfahren für die Austauschfläche

Besonderes Augenmerk war in den folgenden Untersuchungen darauf zu richten, daß die Vliese zu Beginn eines Experimentes vollständig benetzt waren und dieser Benetzungsgrad während des Betriebes nicht sinkt, damit die gesamte Fläche zum Austausch beiträgt.

Dazu wurden verschiedene Benetzungsmethoden entwickelt. Die Austauschflächen wurden vor Beginn eines Experiments mit einigen Litern Alkohol vollständig benetzt. Der Alkohol wurde anschließend mit ca. 20 l destilliertes Wasser ausgespült. Schließlich wurde auf die so gestarteten Flächen die konzentrierte Salzlösung aufgegeben. Trotz dieses aufwendigen Verfahrens läßt sich wie die Erfahrungen zeigten, eine vollständige Benetzung der Austauschfläche nicht sicher gewährleisten.

Dieses Vorgehen ist für einen experimentellen Betrieb des Soprtionsentfeuchters möglich, für eine Anwendung in einer Sorptionsklimanlage allerdings ungeeignet.

Mit der Austauschfläche, die durch eine gut durchgeführte Benetzung erschlossen wird, kann ein Austauschgrad des Sorptionsentfeuchters von ca. 55 % erreicht werden, entsprechend einer Luftentfeuchtung von ca. 6,2 g/kg (Experiment 7a).

### 8.5.3 Versuche zur Regelung der Luftentfeuchtung

In Experiment 3 und 4 wurde die Variation des Solemassenstroms untersucht. Nach vorhergehender Benetzung wurde einmal bei großem Solemassenstrom, d.h kleinem *MR* (Versuch 3a; MR = 57) bzw. bei kleinem Solemassenstrom (Versuch 4a; MR = 155) begonnen. Es zeigt sich, daß die einmal durch das Benetzungsverfahren erschlossene Austauschfläche unterschiedlich groß ist und daß sie über den Verlauf des Experiments etwa konstant bleibt. Dies gilt auch für Experiment 4, bei dem mit einem sehr kleinen spezifischen Solemassenstrom von ca. 100 ml/(hm<sup>2</sup>) begonnen wurde.

Die Experimente bestätigen, daß insbesondere bei einem kleinen Austauschgrad ( $NTU \approx 0,5$ ) der Solemassenstrom zur Regelung der Entfeuchtungsleistung nicht geeignet ist.

#### 8.5.4 Wassermassenbilanz

Es zeigt sich bei den Experimenten ein erheblicher Fehler in der Wassermassenbilanz (siehe Tabelle 2). Dieser ist u.a. auf folgende Gründe zurückzuführen.

- 1. Die Luftentfeuchtung wurde in dem Experiment W als Mittelwert über 10 Taupunktmeßstellen, die über den Luftquerschnitt verteilt sind ermittelt. Diese Mittelung berücksichtigt nicht die ungleichmäßige Durchströmung des Sorptionsentfeuchters mit der die jeweiligen Meßwerte gewichtet werden müßten. In den nachfolgenden Experimenten wurde eine für die Vermessung des mittleren Austrittstaupunkts aus dem Sorptionsentfeuchter geeignete Meßstelle benutzt, bei der die Austrittsluft gut durchmischt war.
- 2. Die anfangs verwendete Eindichtung des Sorptionsentfeuchter hat sich als unzureichend erwiesen. Ein Teil der eintretenden Luft mit hoher Wasserbeladung konnte so den Sorptionsentfeuchter seitlich passieren und, ohne mit der Salzlösung in Kontakt zu kommen, sich mit der entfeuchteten Luft aus dem Sorptionsentfeuchter vor der Meßstelle am Austritt aus dem Gehäuse des Sorptionsentfeuchters vermischen. Dieser Umstand führt zu einer Verschiebung des Massenstromverhältnisses MR innerhalb des Sorptionsentfeuchters. Ein geschätzter, maximaler Fehlerluftstrom von 10 % führt z.B. zu einer Verschiebung von MR = 80 auf MR = 72. Nachdem der Fehler erkannt war, wurde ab Experiment 3 ff. die Eindichtung des Sorptionsentfeuchters in die Versuchanlge verbessert.
- 3. Der verbleibende Fehler in der Massenbilanz ist damit nicht vollständig zu erklären. Schätzungswiese 10 % der im Volumenstromzähler gemessenen Zuluft geht im Bereich des Umgebungssimulators, bestehend aus Zuluftbefeuchter und Zulufterhitzer, verloren. Aufgrund der Konstruktion ist eine zuverlässige Abdichtung dieser Luftstrecke mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Aus der Wassermassenbilanz läßt sich der Luftverlust auf ca. 10 % bestimmen. Der Luftmassenstrom und damit MR müssen daher um diesen Faktor korrigiert werden. Die in Tabelle 2 angegebenen Werte sind die Meßwerte.

### 8.5.5 Energiespeicherung

Die oben beschrieben Probleme bei der Erstellung der Wassermassenbilanz zeigen sich auch in Abbildung 7 wieder. Die in Experiment w1/2 bestimmte Speicherdichte (735 MJ/m<sup>3</sup> bzw. 1000 MJ/m<sup>3</sup>) bleibt hinter den aus der Luftentfeuchtung zu erwartenden Werten zurück (ca. 900 MJ/m<sup>3</sup> bzw. ca. 1200 MJ/m<sup>3</sup>). Mit anderen Worten, die aufgrund des Verfahrens genauer bestimmte Beladungsänderung des Salzes hat die Probleme mit der Vermessung des Luftstroms aufgezeigt.

Die in den Experimenten erreichten Speicherdichten für MR = 80 liegen bei ca. 800 MJ/m<sup>3</sup> (Experiment 7a), das entspricht ca. 61 % des möglichen Potentials.


Abbildung 7: Speicherdichte für Luftentfeuchtungsenergie über dem Massenstromverhältnis für ausgewählte Absorptionsexperimente mit LiCl-H<sub>2</sub>O

٤,

### 8.6 Folgerungen

Mit der für den Sorptionsentfeuchter gewählten Konstruktion läßt sich eine hohe Luftentfeuchtung bei gleichzeitiger hoher Speicherdichte in der Salzlösung erreichen.

Das verwendete Material zur Verbesserung der Benetzbarkeit der Austauschfläche darf nicht mit auswaschbaren Benetzungsmitteln versehen sein.

Der Solemassenstrom ist bei guter Benetzung der Austauschfläche wenig geeignet, um die Leistung des Entfeuchters zu steuern, da die Linien gleicher *NTU*-Werte, an denen sich die Leistungsfähigkeit bemißt, eine zu geringe Steigung haben.

#### 8.7 Desorptionsexperimente am PSR1000

Die Desorptionsversuche wurden im Wechsel mit Absorptionsversuchen an dem selben Apparat (PSR1000) durchgeführt. Als Versuchsbedingungen wurden ebenfalls die *ARI*-Standardbedingungen gewählt [51].

Angestrebt ist eine Maximalkonzentration der LiCl-H<sub>2</sub>O Salzlösung von ca. 40 %. Bei dieser Konzentration ist einerseits eine Kristallisation der Salzlösung unter Laborbedingungen zuverlässig ausgeschlossen andererseits die Luftentfeuchtung sehr gut gewährleistet.

Abbildung 8 zeigt, daß mit Temperaturen von 55 °C, d.h. Übertemperaturen von ca. 8 K über der Gleichgewichtstemperatur, eine 32,7 %ige Salzlösung bereits in einem Durchgang durch den Desorber auf eine Soleaustrittskonzentration von ca. 41,4 % regeneriert werden kann. Steht Re-

generationswärme mit einer Temperatur von ca. 65 °C zur Verfügung, so kann bereits der doppelte Solemassenstrom in einem Durchlauf regeneriert werden.

Dieses niedrige Temperaturniveau ermöglicht die Regeneration der Salzlösung und den Antrieb des Sorptionstrockners sowie der Sorptionsklimaanlage mit solarer Energie. Die Verwendung von Fernwärme ist ebenfalls ganzjährig möglich, da die erforderlichen Desorptionstemperaturen auch im Sommer von den Fernwärmenetzen erreicht werden. Diese werden in vielen Fällen außerhalb der Heizperiode, auf die zur Warmwasserbereitung ausreichenden Temperaturen von 60 °C -80 °C heruntergefahren.



Abbildung 8: Massenstrom sowie Austrittskonzentration der Salzlösung bei der Desorption bei konstanter Eintrittskonzentration C = 32,7 %.

# 9 Entwicklung von Austauschflächen

# 9.1 Anforderungen

Aus den Anforderungen an den Sorptionsentfeuchter (vergl. Endbericht zur Phase I, Seite 61 ff. [46]) lassen sich die Anforderungen ableiten, die an die Austauschflächen zu stellen sind:

- Die Austauschflächen müssen den korrosiven Eigenschaften der verwendeten Salzlösungen widerstehen sowie bei den Sorptionsprozessen auftretenden Temperaturen einsetzbar sein.
- Die Austauschflächen müssen durch einen nicht am Sorptionsprozeß beteiligtes Wärmeträgermedium so gekühlt werden können, daß die Temperatur der Salzlösung und damit des Sorptionsprozesse kontrolliert werden kann (vergleiche Kapitel 11). Die Verwendung der gleichen Austauschflächen zum Aufbau eines Desorbers und damit der Energieeintrag der Desorptionswärme sollte möglich sein.
- Wenn Energie in nennenswertem Umfang in der Lösung gespeichert werden soll, muß die möglichst vollständige Benetzung der Austauschflächen mit einem sehr kleinen, spezifischen Salzlösungsstrom von ca. 0,2 l/(h m<sup>2</sup>) gewährleistet sein.

Stegdoppelplatten aus Polypropylen (PP) erfüllen wesentliche Eigenschaften und sind zudem preisgünstig, sie wurden deshalb als Ausgangsmaterial für den Aufbau der Austauschflächen verwendet. Unbehandeltes PP ist hydrophob. Wasser und wäßrige Lösungen benetzen PP-Flächen nicht. Da die möglichst vollständige Benetzung der Austauschfläche mit der Sorptionslösung von entscheidender Bedeutung für die Funktion des Sorptionsentfeuchters ist, wurden verschiedene Verfahren zur Verbesserung der Benetzung der Austauschfläche verfolgt.

# 9.2 Benetzung der Austauschfläche

Nach vorliegenden Erkenntnissen kommen zur Herstellung einer vollständigen Benetzung nur Beschichtungen in Frage, die gegenüber der Salzlösung eine Saugwirkung zeigen. Diese Saugwirkung kann zwei Ursachen haben:

- Die Salzlösung benetzt die Beschichtung auf Grund von van der Waals Kräften zwischen den polaren Molekülen der Lösung und den Oberflächenmolekühlen der Beschichtung. Dieser Effekt ist bei den verwendeten Lösungen und Kunststoffen sehr schwach, bzw. beim verwendeten PP praktisch gar nicht vorhanden.
- 2. Die Salzlösung benetzt die Beschichtung auf Grund von Kapillarkräften. Dieser Effekt ist von der Textur der Oberfläche z.B. von der Faserdicke und der Materialart eines Vlieses oder Gewebes abhängig, mit dem die Austauschfläche beschichtet ist.

Beide Effekte müssen genutzt werden, um eine gute Benetzung zu erzielen.

In der Phase I des Forschungsvorhabens haben Maßnahmen zur Verbesserung der Benetzbarkeit einer PP-Austauschfläche durch CaCl<sub>2</sub>-haltige Salzlösungen, wie Aufrauhen durch Schmirgeln oder Sandstrahlen, sowie Corona-Behandlung wenig oder nur kurzfristigen Erfolg gezeigt. Vergleichsweise gute Benetzung war durch Aufbringen eines Vlieses auf die Austauschfläche sowohl bei der Fa. Menerga als auch am ZAE Bayern, erreicht worden. Die Arbeiten zur Beschichtung konzentrierten sich daher auf eine intensive Untersuchung von Vliesen bzw. Gewebematerialien. Darüber hinaus wurden mit geringer Priorität weitere Verfahren wie z.B. die Möglichkeiten neuartiger Plasmaverfahren untersucht.

# 9.3 Test von Vliesen

Untersucht wurden 20 von verschiedenen Herstellern angeforderte Muster. Ein Teil der Firmen wurde einer Liste der Dokumentation "Wer liefert was" mit ca. 60 Einträgen zum Stichwort: "Vliese" entnommen, mit dem Ziel möglichst unterschiedliche Muster zu erhalten. Zusätzliche Vliese wurden von Herrn Röben, Universität Essen zur Verfügung gestellt. Ergänzend wurden auch Gewebe untersucht.

Aus den vorliegenden Mustern wurden über 200 verschiedene Vliese bzw. Gewebe ausgewählt, die entweder Materialstärken bis max. 1 mm hatten oder eine sonst in der Untersuchung noch nicht vorkommende Struktur oder Faser aufwiesen. Zu diesem Zeitpunkt auch zellulose- und viskosehaltige Vliese untersucht wurden, deren Stabilität in der Salzlösung fraglich ist.

# 9.3.1 Untersuchungsmethode

Untersucht wurde die Benetzung der Vliese/Gewebe mit:

- 1. H<sub>2</sub>O: Leitungswasser
- 2. LiCl: C = 40,3 %;
- 3. Klimat 3930S: C = 62 %; siehe Kapitel 13.

Firma	Vlies-Typ	gw	Material	Binder	Lsg.	min	max	Note	Note	Note	Flächen gewicht	ſ
						[5]	[5]	H20		KIIM	[g/m2]	
Binzer Papi	erfabrik Gmbi	8 Co. KG; 3	5115 Hatzfeld	/Eder								Γ
[	1380		?	Vlies				3	6	6	?	?
	1	0			H2O							
	1	0		1	Klimat							
		0		1	LiCI							Γ
		1		1	H2O							[
		1			Klimat		1					Γ
	1	1		1	LiCI						1	Γ

Tabelle 3: Beispiel des Versuchsprotokolls

Zur Versuchsdurchführung wurden auf die waagrecht liegenden, ungewaschenen, trockenen Proben jeweils mehrere Tropfen der drei Lösungen aufgesetzt und die Benetzungszeit bestimmt (Versuchstemperatur ca. 20 °C). Der Versuch wurde nach Waschen der Proben wiederholt. Dazu wurden die Proben mit Leitungswasser von ca. 60 °C etwa eine halbe Stunde gespült und wieder getrocknet. Die Versuchsergebnisse wurden protokolliert und wie in Tabelle 3 dargestellt.

# Erläuterung:

• Hersteller:	Name, Adresse
• Vliestyp:	Der Vliestyp ist entweder die Bezeichnung nach Herstellerangaben oder, wenn nicht bekannt ein eigener Bezeichner
• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	ungouvogehono Droho gy = 0: govogehonono Droho gy = 1
• gw.	ungewaschene Flobe gw – 0, gewaschenene Flobe gw – 1.
<ul> <li>Material:</li> </ul>	Soweit bekannt wurde der Fasertyp angegeben.
• Binder:	Soweit bekannt wurde der Bindertyp angegeben. Lagen keine Angaben vor, so wurde Vlies bzw. Gewebe eingesetzt, um eine grobe
	Unterscheidung zu ermöglichen.
• Lsg.:	siehe oben.
• min/max:	Die im Durchschnitt für die jeweils 2-3 Tropfen der unterschiedlichen Testlösungen gemessenen minimalen bzw. maximalen Zeiten bis zur vollständigen Aufnahme der Lösung in das Vlies.
• Note:	Die jeweilige Note bezieht sich immer auf die gewaschene Probe und wurde nach Versuchsdurchführung vergeben (siehe Abschnitt 9.3.2 Bewertungsmethode).
• Flächengewicht:	soweit bekannt
• Dicke:	soweit bekannt
• Bemerkung:	Anmerkungen zum Versuch

Die Angaben mit vorangestellter ~ liegen nicht schriftlich vor oder sind im Fall der Materialstärke des Vlieses mit der Schublehre selbstvermessene Werte.

•

# 9.3.2 Bewertungsmethode

Die einzelnen Ergebnisse der Untersuchung sind im Anhang dargestellt. Mit dem in Tabelle 4 angeführten Bewertungsmaßstab sind die Versuchsergebnisse bezüglich der Benetzungszeiten der gewaschenen Vliese bzw. Gewebe ausgewertet worden. In Tabelle 14 im Anhang (Kapitel 15) sind alle untersuchten Vliese/Gewebe mit Versuchsergebnissen aufgelistet.

Tabelle 4:	Bewertungsmaßstab
------------	-------------------

Note	H <sub>2</sub> O	LiCl-H <sub>2</sub> O	Klimat 3930S
1	0 - 3 s	0 <b>-</b> 3 min	0 - 30 min
2	3 - 10 s	3 - 10 min	bis 1 std
3	10 - 30 s	10 - 20 min	bis 2 std
4	30 - 120 s	20 - 30 min	-
5	bis 10 min	bis 1 std	-
6	über 10 min	über 1 std	über 2 std

Vlies	Material/	Flächengewicht/Di	Produktionsbreite	Preis pro lfdm
	Binder	cke		
T1702,	(PES)	24 g/m <sup>2</sup>	~ 1200 mm	<sup>1</sup> DM 1,55
Fa. Freudenberg	Vlies	0,07 mm		
T1704,	(PES)	40 g/m <sup>2</sup>	~ 1070 mm	<sup>1</sup> DM 3,16
Fa. Freudenberg	Vlies	0,07 mm		
T1709,	(PES)	70 g/m <sup>2</sup>	1000 mm	<sup>2</sup> DM
Fa. Freudenberg	Vlies	0,13 mm		
28F/1210,	PAN	136 g/m <sup>2</sup>	1050 mm	<sup>3</sup> DM 41,25
Fa. Bückmann	Gewebe	0,28 mm		
29F/1211,	PAN	150 g/m <sup>2</sup>	1050 mm	<sup>3</sup> DM 29,15
Fa. Bückmann	Gewebe	0,38 mm		
18F/886,	Nylon	79 g/m <sup>2</sup>	930 mm	<sup>3</sup> DM 17,60
Fa. Bückmann	Gewebe	0,14 mm		
Lila,	Polyamid	$? g/m^2$	1400 mm	<sup>3</sup> DM 18,00
Fa. Stoff-Markt	Gewebe	~ 0,3 mm		
Gewebpackung <sup>4</sup>	PAN/PP	? g/m <sup>2</sup>	~ 1200 mm	SF ~36,00
Fa. Sulzer	Gewebe	~ 0,5 mm		

9.3.3 Preisvergleich der geeigneten Muster

<sup>1</sup> Die angegebenen Preise gelten ab einer Abnahmemenge von ca. 3750 lfdm. Darunter wird ein Mindermengenzuschlag von DM 300,- erhoben.

- <sup>2</sup> Das Produkt ist z.Zt nicht mehr im Lieferprogramm.
- <sup>3</sup> Das Angebot bezieht sich auf eine Abnahmemenge von ca 300 500 lfdm. Bei größeren Mengen kann der Preis noch nachgeben..
- <sup>4</sup> Mit Gewebepackung ist hier eine Verarbeitungsvorstufe der untersuchten dreidimensionalen Gewebepackung gemeint, in der die eingewebte PP-Struktur noch nicht thermoplastisch verformt ist.

Gewebe sind im Vergleich zu Vliesen mindestens um den Faktor 10 teurer.

### 9.3.4 Ergebnisse des Benetzungstestes

Es zeigt sich:

- 1. Vliese oder Gewebe, die mit H<sub>2</sub>O nicht benetzen, auch nicht mit den Salzlösungen.
- 2. Die Benetzungsfähigkeit nimmt von H<sub>2</sub>O über LiCl-H<sub>2</sub>O zu Klimat 3930S ab.
- 3. Viele Vliese/Gewebe sind hydrophil ausgerüstet. Die Ausrüstung kann aufgebracht oder in die Faser eingebracht sein. Bei den untersuchten Vliesen/Geweben läßt sich die Ausstattung (z.T.) auswaschen. Alle untersuchten Vliese benetzen nach dem Waschen schlechter. Viele benetzen gar nicht mehr. Die hydrophile Ausrüstung kann auch durch Verkalken (gewaschen wurde mit Leitungswasser) wirkungslos werden. Dieser Effekt trifft jedoch alle Vliese/Gewebe aufgrund der einheitlichen Waschtechnik in gleicher Weise.
- 4. Es finden sich Vliese die nach dem Waschen noch befriedigend mit H<sub>2</sub>O benetzen. Das im Sorptionsentfeuchter PSR1000 eingesetzte Vlies gehört nicht dazu.

Es zeigt sich bezüglich der Faser:

- 1. Als Fasern haben sich: Polyester, Polyacrynitril sowie Polyamid als vorteilhaft erwiesen.
- 2. Die untersuchten Vliese/Gewebe aus PP benetzen mit keiner der drei Lösungen.
- 3. Die untersuchten Glasvliese benetzen nicht gut.
- 4. Die untersuchten zellulose-/viskosehaltigen Vliese benetzen gut.

Es zeigt sich bezüglich der Verarbeitungsart:

1. Wenig verfestigte Vliese (Nadelvliese) zeigen i.a. bessere Saugwirkungen als thermisch verfestigte Vliese. Nadelvliese sind i.d.R. nicht unter 1 mm Stärke erhältlich (herstellbar?). Die Vliese/Gewebe sollten nicht kalandriert sein. Die Verfestigung kann im Extremfall zu einer folienartigen Oberfläche führen, die überhaupt keine Flüssigkeit mehr aufnimmt. ÷

s

- 2. Schwerere Vliese zeigen i.a. bessere Saugwirkung, auch wenn Sie stärker verfestigt sind.
- 3. Eine feinere Spinnfaser sowie eine längere Faserlänge scheint geeigneter zu sein (die Angaben in den Datenblättern zu diesen Eigenschaften sind lückenhaft.)
- 4. Einige benetzende Gewebe zeigen eine deutliche Vorzugsrichtung in der Saugwirkung.

Der Benetzungstest zeigt, daß es Vliese und Gewebe gibt, die mit den untersuchten Lösungen gut oder sogar sehr gut benetzen. Leider können die besten, erhältlichen Vliese nicht eingesetzt werden. Das liegt z.T. an der wärmedämmenden Wirkung aufgrund der zu großen Vliesdicke, z.T. an der nicht ausreichenden Stabilität der Faser bezüglich der Salzlösungen.

Die Gewebe sind zu teuer.

Ein dünnes, unverfestigtes Vlies (0,1 bis 0,2 mm) bestehend z.B. aus feiner Polyacrylnitril-Faser konnte leider nicht gefunden werden.

Aufgrund dieses Standes der Untersuchungen wurde das Polyester Vlies: T 1702 der Fa. Freudenberg für den in dieser Phase aufgebauten Entfeuchter der Firma Menerga ausgewählt. Das Vlies ist extrem dünn, preisgünstig, lieferbar und verbessert die Benetzung gegenüber der unbehandelten Fläche. Zur Erschließung der Fläche mit Salzlösung muß das Vlies vorher mit Wasser benetzt werden.

# 9.3.5 Befestigung von Vliesen

Die Vliese oder Gewebe müssen auf der Austauschfläche so befestigt werden, daß die Vliese glatt an der Fläche anliegen und nicht verrutschen können. Ihre Saugwirkung darf nicht nennenswert beeinträchtigt werden.

Klebeverbindungen wurde bisher nicht näher untersucht, da PP schlecht bis gar nicht klebbar ist. Ultraschall- oder Heizelement-Schweißverbindungen wurden geprüft. Dazu wurden Proben von PP-Stegdoppelplatten an vier von acht angesprochenen Herstellern geeigneter Schweißmaschinen versandt.

Im Falle der Ultraschallverschweißung liegen gute Ergebnisse vor. Das Verfahren erscheint allerding zu aufwendig und teuer. Die maximale Sonotrodengröße liegt bei ca. 300 mm x 5 mm. Ein punktweises oder linienweises Verschweißen stellt einen erheblichen Verarbeitungsaufwand dar.

Die punkt- oder linienartige Verschweißung mit einem umfunktionierten, temperaturgeregelten Lötkolben wurde für die Anfertigung von Mustern im Labormaßstab verwenden. Auch diese Methode erscheint zu aufwendig für die Anwendung. Sie sollte sich jedoch mit vergleichsweise geringem Investitionsaufwand automatisieren lassen.

# 9.4 Weitere Verfahren zur Verbesserung der Benetzung

# 9.4.1 Plasmaaktivierung, Metalloxidbeschichtung, Plasmapolymerisation

Als alternatives Verfahren wurde eine Plasmaaktivierung der Austauschflächen untersucht. Die Erfahrung in Phase I war, daß die Aktivierung tatsächlich die Benetzung der Austauschfläche mit der Salzlösung deutlich verbessert, jedoch nur für kurze Zeit, einige Stunden, maximal Tage. Die Dauerhaftigkeit der Aktivierung wird jedoch von den Prozeßparametern des Plasmas wie Druck, Temperatur, Spannung, Schutzgasart, etc. wie auch von dem beschichteten Polypropylen an sich bestimmt.

Es gelang PP-Stegdoppelplatten (Mustergröße ca. DIN A4) mit einer Plasmaaktivierung hydrophil auszustatten, die auch nach 3 Monaten noch gute Wirksamkeit zeigte. Ein oben auf der Platte gut verteilter Solefilm lief auf einer benetzten Fläche flächig ab, ohne sich einzuschnüren. Auch eine trockene Fläche, Breite ca. 100 mm, wurde durch gleichmäßige Aufgabe von Sole nach einer Anlaufzeit nahezu vollständig von einem Solefilm bedeckt.

Nach Aussage des Herstellers ist jedoch mit einer Abnahme der Benetzung, wenn auch über einen vergleichsweise langen Zeitraum hinweg zu rechnen. Deshalb wurde für PP-Platten mit einer Abmessung von 0,3 m x 0,4 m eine Beschichtung der hydrophilierten Platten mit Metalloxiden in Auftrag gegeben, die die Hydrophilierung stabilisieren sollten. Die Zusammensetzung der Schicht ist uns nicht bekannt. Der Ablauftest mit Wasser und Klimat 3939S zeigte jedoch, daß diese Maßnahme nicht erfolgreich war. Es ist noch unklar, ob das am Verfahren selbst liegt, oder daran, daß bei der 2. Aktivierung ein anderes PP-Material verwendet wurde.

Es wurden auch plasmaaktivierte PP-Platten mit unterschiedlicher Oberflächenstrukturierung untersucht: 1. extrudiert ohne weitere mechanische Behandlung, 2. sandgestrahlt, 3. horizontal geschmirgelt, 4. kreuzweise diagonal geschmirgelt. Die geschmirgelten Platten zeigten eine Benetzung, die insbesondere bei der Verwendung von Klimat 3930S denen der besten Vliese vergleichbar, wenn nicht überlegen ist.

Es liegen Hinweisen vor, wonach eine dauerhafte der Aktivierung der Austauschflächen durch neuartige Plasmapolymerisationsverfahren möglich sein soll. Diesen konnte aus Zeitgründen noch nicht nachgegangen werden.

# 9.4.2 PU-Folie

Der Test einer hydrophilen PU-Folie brachte ein negatives Resultat. Die Folie nahm Wasser auf und kräuselte sich dabei. Trotz der hydrophilen, gut benetzenden Eigenschaft lief aufgebrachtes Wasser oder Sole in dünnen Rinnsalen und nicht als Film ab.

# 9.4.3 Industrielle Halbzeuge

Seit jüngster Zeit werden mit Geweben oder Vliesen flächig kaschierte Polypropylen-Stegdoppelplatten aus industrieller Fertigung angeboten. Die Platten werden als Verpackungsmaterial hergestellt. Deshalb ist unter dem Vlies eine dünne Schaumstoffschicht aufgebracht, die für den hier vorgesehenen Zweck stören würde. Nach Aussagen des Herstellers kann ein Vlies jedoch auch ohne diese Unterlage aufgebracht werden. Eine Preiskalkulation für diese Flächen liegt noch nicht vor.

Ein erster Test an vorliegenden Materialproben zeigte sehr gute Benetzungseigenschaften. Es ist jedoch noch nicht ausgeschlossen, daß das Material Zellulose enthält. Einen dreitägiger Test in Klimat 3930S bei 80 °C hat sowohl das Material als auch der Kleber überstanden.

Die bisher favorisierte Beschichtung mit einem Vlies könnten entbehrlich sein, wenn sich ein dauerhafter Erfolg der Plasmaverfahren zu Oberflächenaktivierung von PP erzielen und auf größere Flächen übertragen ließe.

# 10 Entwicklung von Lösungsverteilern

Aus der Plattengeometrie und den Auslegungsrechnungen für den zu entwickelnden Sorptionsentfeuchter [46] ergibt sich die Forderung einen Salzlösungsstrom (Solestrom) von ca. 0,2 l/h auf einer Länge von 1 m oben auf der Austauschfläche gleichmäßig zu verteilen. Der Verteiler soll darüber hinaus in einer Dimension die Abmessung von 5 mm nicht überschreiten, weil die erreichbare volumenspezifische Austauschfläche des Entfeuchters sonst unnötig eingeschränkt wird. Flüssigkeitsverteiler, die diese Anforderungen erfüllen, sind im Handel nicht erhältlich.

Es wurden zwei Ansätze verfolgt: 1. Verteilung durch transmembranen Druck und 2. Verteilung durch Bisektion des Strömungsquerschnitts. Eine weitere denkbare Variante, die Verteilung durch optimierte Austrittsöffnungen in einem Kanal, wurde nicht verfolgt, da eine starke Abhängigkeit der Qualität der Verteilung vom Durchsatz vermutet wurde.

# 10.1 Verfolgte Konzepte

### 10.1.1 Verteilung durch hinreichend hohen transmembranen Druck

Eine einfache Verteilerkonstruktion, die die geometrischen Vorgaben erfüllt, ist ein perforiertes Rohr, ein Kanal oder ein Schlauch. Die Lösung strömt dabei an einer Seite, oder an beiden Seiten in das Rohr ein und tritt durch die Perforation am Umfang des Rohres auf der gesamten Länge aus. Da die Länge des Rohres wesentlich größer ist, als die Breite und die in Frage kommenden Salzlösungen hochviskos sind, ist mit einer Veränderung des statischen Druckes in der strömenden Lösung über der Rohrlänge zu rechnen. Dies führt bei isotroper Perforation nur dann nicht zu einer wesentlichen Ungleichverteilung der austretenden Lösung, wenn die Druckdifferenz, die erforderlich ist, um die Perforation zu überwinden wesentlich höher ist, als die Druckdifferenz, die notwendig ist, um das Rohr zu durchströmen.

Da die Druckdifferenz, die aus energetischen Erwägungen zugelassen werden kann, vergleichsweise hoch ist (>2 bar), muß man nur die Anzahl und den Durchmesser der Austrittsöffnungen hinreichend klein dimensionieren, um das Problem im Prinzip zu lösen. Die Anzahl der Öffnungen darf ein Minimum nicht unterschreiten. In Versuchen an gut benetzenden Austauschflächen wurde die Breite der Bahn, die ein ablaufender Tropfen zieht, mit 5 bis 7 mm identifiziert. Die Öffnungen dürfen also nicht weiter als etwa 5 mm voneinander entfernt sein. Damit folgt automatisch, daß der Durchmesser der Öffnungen klein sein muß (< 0,5 mm), um die Druckbedingung zu erfüllen.

Eine konstruktive Wechselwirkung zwischen Austauschfläche und Verteiler ergibt sich insoweit, als eine Fläche, die selbständig breitere Ablaufbahnen erzeugt, mit einer geringeren Anzahl von Öffnungen gleichmäßig berieselt werden kann. Der Durchmesser der Öffnungen kann dann größer sein. Kleine Öffnungen verstopfen leicht und erfordern sehr gut gefilterte Lösungen, um störungsfrei betrieben werden zu können.

### 10.1.2 Verteilung durch Bisektion oder Mehrfachverteiler

Eine Alternative zur Verteilung der Salzlösung durch perforierte Rohre ist die geometrische Teilung eines Strömungsquerschnittes in mehrere gleiche Querschnitte, im einfachsten Fall die Bisektion. Dabei können vergleichsweise große Auslaßkanäle (z.B. d = 1 mm) verwendet werden, die hinreichend lang sein müssen. Der Filteraufwand wird dadurch erheblich reduziert.

Die Salzlösung tritt bei dieser Methode, wie bei der Lochung von Rohren oder Schläuchen, an diskreten Stellen aus. Da pro 1 m Breite der Austauschfläche 100 bis 200 Austrittsöffnungen erforderlich sind, um die Fläche gleichmäßig zu benetzen, ist eine solche Verteilung, wenn überhaupt, nur nach erheblichen fertigungstechnischen Entwicklungen (z.B. in Spritzgußtechnik) preiswert herzustellen, was große Stückzahlen erfordert. Trotzdem haben wir einige Versuche dazu durchgeführt.



Abbildung 9 Gliederungsprinzip der Verteilerebenen bei der Bisektion

# 10.2 Anforderungen an die Qualität der Lösungsverteilung

### 10.2.1 Örtliche Schwankungen der Lösungsverteilung

Eine Grundvoraussetzung für einen guten Stoffaustausch in einem Absorber ist eine vollständig benetzte Austauschfläche. Setzt man diese vollständige Benetzung und eine gleichmäßige Lösungsverteilung voraus, zeigt Abbildung 10 den Verlauf der erreichbaren Luftentfeuchtung und Speicherdichte in Abhängigkeit vom Loft-Sole-Massenverhältnis MR bei isothermer Absorption für verschiedene spezifische Absorbergrößen, dargestellt durch die Anzahl der Übertragungseinheiten, NTU (<u>N</u>umber of <u>T</u>ransfer <u>U</u>nits).

Örtliche Schwankungen der Lösungsverteilung führen zu lokalen Schwankungen des Luft-Sole-Massenverhältnisses und damit zu Schwankungen der erreichten Luftentfeuchtung. Wird in erster Nährung davon ausgegangen, daß dieser Prozeß ebenfalls weitestgehend isotherm verläuft, so bleibt bei einer solchen lokalen Änderung von MR die spezifische Austauschergröße gleich (NTU = const). Betrachtet man die Kurven der Luftentfeuchtung dY an dem für die Absorption günstigsten Bereich um MR = 84, stellt man einen weitgehend linearen Verlauf der Kurven für NTU =const. fest. Eine lokale Abweichung der Lösungsverteilung von ca. 30 % bewirkt bei NTU = 4 Extremwerte von MR<sub>min</sub> = 55 bzw. MR<sub>max</sub> = 112. Die an diesen Punkten erreichte Luftentfeuchtung von 10,15 bzw. 8,15 g/kg ergibt aber eine mittlere Luftentfeuchtung von 9,15 g/kg, welche bei absolut homogener Lösungsverteilung bei MR = 84 ebenfalls erreicht wird.

Solange also die Kurven der Luftentfeuchtung in dem betrachteten Bereich um MR = 84 annähernd linear verlaufen, ist eine Verschlechterung der mittleren Luftentfeuchtung durch Schwankung der Lösungsverteilung nicht zu erwarten.

Die Kurven der Speicherdichte sind in dem betreffenden Bereich von MR mit steigendem NTU zunehmend nichtlinear. Werden, für NTU = const., die zu MR<sub>min</sub> bzw. MR<sub>max</sub> korrespondierenden Punkte der Speicherdichte durch eine Sekante verbunden und die Speicherdichtewerte bei MR = 84 sowohl auf dieser Sekanten als auch auf der Speicherdichtekurve bestimmt (siehe Konstruktion

ų, L

u

in Abbildung 10), stellt man mit steigenden NTU eine zunehmende Abweichung dieser beiden Werte fest. Daher wird der verschlechternde Einfluß der Lösungsfehlverteilung auf die Speicherdichte mit steigender spezifischer Apparategröße, stärker. Beträgt für den Fall NTU = 4 die Abweichung von homogen und inhomogen verteilter Sole wieder 30%, resultiert daraus ein Verlust an Speicherdichte von ca. 10 kWh/m<sup>3</sup> bzw. ca. 3%.

Eine lokale Abweichung der Lösungsverteilung vom Mittelwert bis 30% scheint tolerierbar, soweit eine vollständige Benetzung der Austauschfläche gewährleistet ist. Größere Abweichungen können toleriert werden, solange der absolute spezifische Massentrom ausreicht, um die Austauschfläche vollständig zu benetzen. Dies ist bei den in Phase I verwendeten Flächen bei Werten unter 0,15 l/(h m<sup>2</sup>) nicht mehr gewährleistet.



Abbildung 10: Luftentfeuchtung dY [g/kg] und Energiespeicherdichte SC [kWh/m<sup>3</sup>] in Abhängigkeit vom Luft/Sole Massenstromverhältnis MR bei unterschiedlichen Werten von NTU=const.

#### 10.2.2 Zeitliche Schwankungen der Lösungsverteilung

Eine zeitliche Schwankung der örtlichen Lösungsverteilung ist tolerierbar, solange die im vorherigen Abschnitt festgesetzten Bedingungen eingehalten werden. Lediglich irreversible, zeitliche Änderungen, wie sie durch Ablagerung von Schmutzpartikeln in den Soleverteilern entstehen, müssen verhindert werden. Sie führen im ungünstigsten Fall zum Verstopfen des Verteilers und dadurch zum Trockenfallen der Austauschfläche.

Chemische bzw. physikalische Veränderungen der Werkstoffe während des Betriebes müssen nach endlicher Zeit (Einlaufphase der Anlage) beendet sein. Die Werkstoffe müssen sich dann in einem stabilen Zustand befinden. Ferner sollten die Ergebnisse eines solchen Einlaufprozesses hinreichend genau prognostiziert werden können.

# 10.3 Experimente

Es wurden mikroporöse und auf verschiedene Weise gelochte Schläuche, gebohrte Rohre, sowie ein Bisektionsverteiler untersucht. Eine gute Filterung der Lösung vor dem Eintritt in die Lösungsverteiler ist bei allen untersuchten Verteilungskonzepten, außer beim Bisektionsverteiler, unbedingt notwendig. Der Aufwand hierfür steigt mit abnehmender Porenweite der Filter und zunehmender Viskosität der Lösung stark an.

In konzentrierter Form war das Sorbens Klimat 3930S wegen seiner hohen Viskosität mit den für LiCl-H<sub>2</sub>O verwendeten Mikrofiltern nicht zu filtern. Die Salzlösung mußte mit destilliertem Wasser verdünnt, dann gefiltert und anschließend wieder aufkonzentriert werden. Aus diesen Gründen sollte speziell eine Verteilung für Klimat gegen Verschmutzung unempfindlich sein.

# 10.3.1 Versuchsaufbau

In dem verwendeten Versuchsaufbau nach Abbildung 11 wird der zu verteilende Lösungsmassenstrom mit Pumpe 1 aus dem Vorratsbehälter in den Lösungskreislauf des Verteilers gefördert. Pumpe 2 bewirkt hingegen lediglich eine Zirkulation der Lösung mit der Absicht die Strömungsgeschwindigkeit in dem Verteilerkreislauf so hoch zu halten, daß sich keine Schmutzpartikel an dessen Wand absetzen können. Das Verhältnis zwischen umgepumptem und zudosiertem Lösungsmassenstrom betrug bei den durchgeführten Versuchen etwa 25.



Abbildung 11 Versuchsanordnung für Schlauchverteiler

Die Lösung tritt durch den Verteilerschlauch aus, in der Skizze durch die gestrichelte Linie dargestellt, und wird in 10 Bechergläsern aufgefangen. Der Inhalt jedes einzelnen Becherglases wird anschließend gewogen. Es wurden Versuche mit eingeschalteter Pumpe 2 und Zirkulation (*crossflow*), sowie mit ausgeschalteter Pumpe 2 und verschlossener Zirkulationsleitung (*dead end* Betrieb) durchgeführt. Die Versuche mit dem Bisektionsverteiler wurden mit einem Versuchsaufbau nach Abbildung 12 durchgeführt. Die Salzlösung wird oben zentral in den Verteiler hineingepumt, tritt unten aus den Austrittslöchern aus und wird in den Messbechern aufgefangen.



Abbildung 12: Versuchsanordnung für Bisektionsverteiler

### 10.3.2 Übersicht über die getesteten Verteiler

Die folgende Tabelle ist eine Übersicht über die durchgeführten Versuche. Die Versuche wurden mit LiCl-Lösung (Dichte 1250 kg/m<sup>3</sup>) oder mit Klimat 3930S-Lösung (Dichte 1550 kg/m<sup>3</sup>) durchgeführt, wenn in den Einzelbeschreibungen nichts anderes angegeben ist.

Versuche mit auswertbaren Ergebnissen werden im Kapitel *Einzelergebnisse* ausführlich erläutert. Die Ergebnisse der übrigen Versuche sind bezüglich der in der Einleitung spezifizierten Anforderungen derart unzureichend, daß eine Darstellung nicht sinnvoll ist. Sie sind aber der Vollständigkeit halber in der Tabelle 5 aufgeführt.

Nr.	Verteiler- bezeichn.	Тур	Lösung	Volumen- strom [l/h]	cross- flow	ausge wertet
1	PVC weich 7x11mm	Schlauch gebohrt : Ø 0,7mm Ø 0,2mm, Ø 0,4mm Ø 1,2mm	LiCl	0,4; 0,8; 1,4	ja	ja nein nein
2	PVC hart Ø 5mm	Rohr gebohrt : Ø 0,2mm Ø 0,4mm,Ø 0,7mm Ø 1,2mm	LiCl	0,16;0,5;1,0	ja	ja nein nein
3	Gummi reißfest	Schlauch gebohrt: Ø 0,2 mm, Ø 0,3 mm Ø 0,7 mm	Klimat 3930S, LiCl	0,2; 0,4; 0,8	ja	nein ja
4	Gummi natur	Schlauch, Fa. Rehau ge- locht Ø 6mm; Ø 3mm	Klimat 3930S	0,2; 0,4	ja	ja ja
5a	PES/PVPP Typ1	Permanenthydrophiler Membranschlauch	Wasser	1,4	nein	ja
5b	PES/PVPP Typ1	Permanenthydrophiler Membranschlauch	LiCl	1	ja	ja
5c-1	PES/PVPP Typ1	Permanenthydrophiler Membranschlauch	Klimat 3930S	0,2	ja	ja
5c-2	PES/PVPP Typ1	Permanenthydrophiler Membranschlauch	Klimat 3930S	0,2	ja	ja
5c-3	PES/PVPP Typ1	Permanenthydrophiler Membranschlauch	Klimat 3930S	0,2	ja	ja
5d-1	PES/PVPP Typ1	Permanenthydrophiler Membranschlauch	Klimat 3930S	0,36	ja	ja
6	PES/PVPP Typ2	Permanenthydrophiler Membranschlauch	Klimat 3930S	0,25	ja	ja
7a,b,c	PMMA	Bisektionsverteiler	Klimat 3930S	0,18	nein	ja

Tabelle 5: Übersicht über die an Lösungsverteilern durchgeführten Versuche

, `

u 1

•

#### 10.3.3 Einzelergebnisse

#### 10.3.3.1 PVC Schlauch weich 7x11mm

Die Abbildung 13 zeigt den Einfluß von drei verschiedenen Lösungsmassenströmen, wie sie bei unterschiedlichen Werten von MR auftreten, auf die örtliche Verteilung der Lösung entlang des Verteilerschlauches. Dieser Schlauch aus weichem PVC (Øinnen x Øaußen: 7x11 mm, Länge 900 mm) wurde im Abstand von 5 mm mit handgebohrten Löchern vom Durchmesser 0,7 mm versehen. Der Versuch wurde mit eingeschalteter Pumpe 2, also mit *crossflow*, durchführt. Die starken Schwankungen in der Verteilung nehmen zwar mit steigendem Lösungsmassenstrom ab, bei 1,4 l/h ist aber, nach etwa 2/3 des Wegstrecke, trotzdem ein starker Einbruch der Verteilung zu beobachten. Dieses ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß sich das weiche Schlauchmaterial bei dem erhöhten Druck im vorderen Teil dehnt, die Löcher vergrößert werden und dadurch in diesem Bereich verstärkt Lösung austritt.



Abbildung 13: PVC Schlauch weich mit handgebohrten Löchern und konzentrierter LiCl Lösung



Abbildung 14: Abweichungen der Einzelmassen der Sole pro Meßbecher vom Mittelwert der jeweiligen Meßreihe

Abbildung 14 zeigt den Vergleich der relativen Abweichungen der gemessenen Einzelmassen vom Mittelwert pro Becher der jeweiligen Messreihe. Hier sind die örtlichen Schwankungen der Lösungsverteilung besonders gut zu erkennen. Die Schwankungen nehmen mit steigendem Lösungsmassenstrom ab, sind aber in der Spitze bei allen Durchsätzen über den zulässigen 30% Abweichung. Alle dargestellten Versuche wurden nach dem Verteilen von jeweils insgesamt etwa 2,8 kg Lösung ausgewertet.

÷

#### 10.3.3.2 PVC Rohr $\emptyset_i$ 5mm

Abbildung 15 zeigt das Verteilungsverhalten eines harten PVC Rohres mit  $\emptyset_{innen}$  5 mm und handgebohrten Löchern ( $\emptyset$  0,2 mm) im Abstand von 5 mm. Obwohl durch die Verringerung des Bohrungsdurchmessers auf 0,2 mm der Lochaustrittsdruck P<sub>trans</sub> im Rohr gesteigert und das Verhältnis von P<sub>trans</sub>/ $\Delta$ P dadurch verbessert wurde, ist die Verteilung immer noch schlecht. Die Abweichungen der aus den einzelnen Bereichen des Schlauches ausgetretenen Lösungsmassen zum Mittelwert pro Auffangtopf ist mit über 250 % nicht zu tolerieren. Ein negativer Einfluß der Strömungsdruckverluste ist hier nicht klar zu erkennen



Abbildung 15: PVC Schlauch hart mit handgebohrten Löchern und konzentrierter LiCl Lösung

Die eintretende Lösung wurde mit 0,2 µm vor Versuchsbeginn gefiltert. Die gesamte Versuchsdauer betrug 18,5 h. Die Abbildung 15 zeigt Verteilungsergebnisse eines Zeitausschnittes von 1 h 45 min nach einer Versuchslaufzeit von 1h. Anschließend wurde die aus dem Schlauch ausgetretene Lösung ungefiltert in den Ansaugbecher zurückgeleitet und im Kreislauf wiederverwendet. Die beim ersten Durchlauf aus der Umgebungsluft aufgenommene Schmutzpartikel reichten aus, die Austrittslöcher des Schlauches in einigen Bereichen zu verstopfen.

### 10.3.3.3 Gummi reißfest

Abbildung 16 zeigt einen Schlauch (Länge 1000 mm) aus reißfestem Gummimaterial, der mit handgebohrten Löchern (Ø0,7 mm, Lochabstand 5mm) versehen war. Bei diesem Versuch war die Pumpe 2 nicht eingeschaltet und die Zirkulationsleitung abgeklemmt. Aufgrund der gegenüber LiCl höheren Zähigkeit von Klimat 3930S wurde der Lochdurchmesser mit 0,7 mm entsprechend etwas größer gewählt. Es ist wie auch bei dem Versuch mit 1,4 l/h LiCl in Abbildung 14 eine relativ gleichmäßige Verteilung auf den ersten zwei Dritteln der Lauflänge zu beobachten. Im letzten Drittel fällt der Lösungsmassenstrom jedoch ebenfalls stark ab. Auch diese Verteilung entspricht nicht den geforderten Bedingungen.



÷

4

Abbildung 16: Gummischlauch mit handgebohrten Löchern Ø0,7mm

Der Versuch wurde nach etwa 0,5 h Anlaufzeit ausgewertet, die Dauer der Auswertung betrug ebenfalls noch einmal ca. 0,5 h. Nach einer Gesamtversuchszeit von etwa 4,5 h traten auch bei diesem Schlauch in einigen Bereichen irreversible Verstopfungen der Löcher auf.

#### 10.3.3.4 Gummi natur

Der maschinell gelochte Schlauch der Firma Rehau, aus dehnbarem Gummimaterial mit einem Innendurchmesser von 6 mm ist mit etwa 7 gestochenen Löchern über den Umfang und einem axialen Lochabstand von etwa 5 mm ausgestattet. Dies ergibt eine Gesamtzahl von ca. 1400 gestochenen Löchern bei 1 m Schlauchlänge. Der in Abbildung 17 dargestellte Versuch wurde nach ca.8 h 30 min wegen Verstopfungserscheinungen, abgebrochen. Zur Dokumentation der zeitlichen Änderung der Lösungsverteilung wurde nach jeweils etwa 1 h die in den einzelnen Töpfen aufgefangene Lösungsmenge gewogen. Das verwendete Klimat 3930S wurde vor Beginn des Versuches durch einen 0,2 µm feinen Filter gefiltert. Die durch den Schlauch ausgetretene Lösung wurde nicht wiederverwendet.

Abbildung 17 zeigt die örtliche Verteilung der Lösung, die sich aus der Addition dieser einzelnen Messungen über die gesamte ausgewertete Versuchsdauer von 7 h 40 min ergibt. Klar zu erkennen ist ein Abfallen des austretenden Lösungsmassenstroms von der Einströmseite zur Ausströmseite hin. Da dieser Versuch mit *crossflow* betrieben wurde kann dieses Abfallen auf den Einfluß des Strömungsdruckverlustes zurückgeführt werden. Ein Überlagern dieses Effektes mit einer Vergrößerung des Lochdurchmessers durch Dehnung des Materials auf den ersten 2/3 der Schlauchlänge ist wahrscheinlich. Insgesamt ist die örtliche Verteilung des Lösungsmassenstroms mit Spitzenwerten von knapp 50 % Abweichung zu schlecht.



Abbildung 17: Maschinell gelochter Schlauch, Innendurchmesser 6mm mit gebrauchtem konzentriertem Klimat, örtliche Verteilung gesamt

Bei der zeitlich aufgelösten Darstellung der örtlichen Verteilung in Abbildung 18 ist ein *Wandern* der örtlichen Verteilung mit der Zeit erkennbar. Dabei treten in jeder Messreihe Abweichungen vom jeweiligen Mittelwert pro Topf von mehr als 30 % auf.

Die Schwankungsbreiten der Abweichungen des Solemassenstromes in einem Abschnitt zu verschiedenen Zeiten, von ca. 30 % bei Messbecher 3 bis ca.90 % bei Messbecher 8, sind ebenfalls zu hoch.



Abbildung 18: Maschinell gelochter Schlauch, Innendurchmesser 6mm mit gebrauchtem konzentriertem Klimat, örtliche Verteilung zeitlich aufgelöst

Den Vergleich zwischen dem Betrieb mit und ohne *crossflow* des maschinell gelochten Schlauches  $(\emptyset_i=3mm)$  unter sonst gleichen Versuchsbedingungen (Lösung: Klimat 3930S) zeigt Abbildung 19. Beide Versuchsreihen wurden hier mit dem gleichen transmembranen Lösungsmassenstrom von 0,4 l/h aufgenommen. Es ist klar der verschlechternde Einfluß des *crossflow* auf die Verteilung zu erkennen. Die Spitzenwerte der Abweichungen liegen bei Betrieb mit *crossflow* deutlich höher. Legt man durch jede der beiden Kurven eine Trendgerade, stellt man beim *crossflow*, entsprechend der gestrichelten Linie, ein Abfallen dieser Geraden zur Ausströmseite hin fest. Dagegen liegt im Betrieb ohne *crossflow* die Trendgerade entsprechend der durchgezogenen Mittelwertgeraden horizontal. Dieser Sachverhalt spiegelt den Einfluß der beim *crossflow* stärkeren Unterschiede der örtlichen Druckverteilung aufgrund des Strömungsdruckverlustes wider.

÷,

÷

Vergleich Einzelgewichte der Sole bezogen auf den Mittelwert über die gesamte Messzeit mit und ohne Crosssflow maschinell gelochter Schlauch Di=3mm,Volumenstrom 0,4 L/h, P0,8bar



Abbildung 19: Maschinell gelochter Gummischlauch, Innendurchmesser 3 mm, Vergleich der Verteilung mit und ohne *crossflow* 

Abbildung 20 zeigt eine zeitliche Änderung der örtlichen Verteilung bei einem maschinell gelochten Schlauch der Firma Rehau mit 3 mm Innendurchmesser und einem Volumenstrom von 0,2 l/h Klimat 3930S mit *crossflow*. Die Abweichungen sind bei dieser Darstellung nicht auf den Mittelwert des einzelnen Zeitintervalls, sondern auf den Mittelwert der gesamten Messreihe bezogen. Bei dieser Darstellung läßt sich gut die Abnahme des gesamten Lösungsmassenstromes mit der Zeit zeigen. Die in den jeweiligen Zeitintervallen durch die Schlauchwand durchgetretenen Lösungsmassen nehmen mit fortschreitender Versuchszeit ab, bei gleichbleibender Pumpeneinstellung. Die entsprechenden Lösungsmassenströme betragen:

Zeitintervall (Versuchsbeginn10°°)	Lösungsmassenstrom [g/h]
11°°-12°°	78
12°°-13°°	76
13°°-14³°	58

Nach etwa 4 h Betrieb waren die ersten Bereiche des Schlauches komplett verstopft. Der Einfluß des *crossflow* ist wiederum gut zu erkennen.



1999 - 1999 - 1

•

Abbildung 20: Maschinell gelochter Gummischlauch Innendurchmesser 3 mm, Vergleich der Einzelgewichte der Lösung bezogen auf den Gesamtmittelwert des Versuches

#### 10.3.3.5 Permanenthydrophiler Membranschlauch Typ1

In der Phase I des Projektes "Klimatisierung über Sorption" wurden PTFE-Membranschläuche der Firma Gore zur Verteilung von LiCl verwendet. Schlauch aus diesem Material ist nicht permanenthydrophil, sondern muß nach längerer Stillstandsdauer der Anlage mit Alkohol bzw. Wasser hydrophiliert werden. Der untersuchte Membranschlauch der Firma X-Flow aus PES/PVPP ist dagegen, nach Auskunft des Herstellers permanenthydrophil und braucht nicht vor jedem Anfahren der Anlage "gestartet" werden. Es wurden sowohl Schläuche aus weniger hydrophilem Material (Typ1) als auch Schläuche aus stärker hydrophilem Material (Typ2) getestet.

Abbildung 21 zeigt die Massenverteilung im Betrieb eines solchen Schlauches mit Wasser, als niedrigviskosem Medium, und einem Volumenstrom von 1,4 l/h ohne *crossflow*. Es sind sehr starke Schwankungen in der Verteilung zu beobachten und bereits nach <sup>3</sup>/<sub>4</sub> der Wegstrecke ist fast die gesamte Wassermenge ausgetreten.



Abbildung 21: Permanenthydrophiler Membranschlauch Typ1 mit Wasser 1,4 l/h

Bei dem Versuch mit LiCl als nächst zäherem Medium und einem Volumenstrom von 1,0 l/h zeigt sich in Abbildung 22 eine sehr viel gleichmäßigere Massenverteilung, bis auf den Bereich des Messbechers 2 mit deutlich erhöhtem Lösungsmassenstrom. Der Einfluß der höheren Zähigkeit des Mediums wirkt sich im Vergleich zu Abbildung 21 dämpfend auf die Amplitude der Verteilungsschwankungen aus.



Abbildung 22: Permanenthydrophiler Schlauch Typ1 mit LiCl 1 l/h

Die Abbildung 23 zeigt ebenfalls den hydrophilen Schlauch Typ1 aber im Betrieb mit 0,2 l/h Klimat 3930S. In den Versuchen der Abbildung 21, Abbildung 22 und Abbildung 23 wurde die gleiche Pumpeneinstellung verwendet. Das Abnehmen des Volumenstromes ist eine Reaktion auf die verschiedenen Zähigkeiten der verwendeten Medien. Je zäher das Medium ist, desto höher ist der Druckverlust und desto niedriger der Volumenstrom. Nur der Versuch in Abbildung 22 wurde im *crossflow* durchgeführt. Er zeigt daher die charakteristische Abnahme des transmembranen Lösungsmassenstroms mit zunehmender Schlauchlänge aufgrund des durch die Zirkulation erhöhten Volumenstroms. •

Im Betrieb mit Klimat 3930S konnte die *crossflow*-Pumpe überhaupt nicht eingesetzt werden, da der Druckanstieg in dem Membranschlauch aufgrund des erhöhten Volumenstroms so stark war, daß die Schlauchverbindungen undicht wurden. Der Versuch in Abbildung 23 wurde mit ungefiltertem Klimat 3930S technischer Qualität, wie sie vom Hersteller SOLVAY Deutschland GmbH geliefert wurde, durchgeführt. Daher trat ein Verstopfen des Schlauches nach etwa 2,5 h auf.

In den Versuchen der Abbildung 21, Abbildung 22 und Abbildung 23 wurde derselbe Schlauch verwendet, der zwischen jedem Versuch kurz mit kaltem Wasser durchgespült wurde.



Abbildung 23: Permanenthydrophiler Schlauch Typ1 mit ungefiltertem Klimat 3930S 0,2 l/h

Der verstopfte Membranschlauch wurde nach diesen Versuchen zu Reinigungszwecken etwa 3 h lang mit heißem Wasser gespült. Abbildung 24 zeigt eine Wiederholung des Versuches aus Abbildung 23 mit gereinigtem Schlauch und Klimat 3930S, welches zuvor durch einen Feinfilter mit 2µ m Porenweite gefiltert wurde. Es zeigt sich eine klare Änderung der Verteilung gegenüber derjenigen in Abbildung 23. Das bedeutet, die Porosität des Membranmaterials wurde durch Spülen mit Wasser beeinflußt. Die Ablagerung von Schmutzpartikeln und damit das partielle Verstopfen des Membranmaterials spielen in diesem Fall keine Rolle, da das Auswerten der Versuche lange vor Eintreten der ersten Verstopfungen vorgenommen wurde. Ein Verbleiben von Verschmutzungsrückständen in oder an der Membran ist nach dreistündigem, intensiven Spülen unwahrscheinlich.

In dem Versuch Abbildung 24, nach dem Spülen mit heißem Wasser und bei Verwendung gefilterter Lösung, traten erst nach 5,5 h wiederum erste Verstopfungserscheinungen des Schlauches auf.



Abbildung 24: Permanenthydrophiler Schlauch Typ1 mit gefiltertem Klimat 3930S 0,2 l/h, gereinigter Schlauch

Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen die zeitlichen Veränderungen des Gewichts der Messbecherinhalte bei einem fabrikneuen Schlauch und einem im Vergleich mit Abbildung 24 um 30 % erhöhten Volumenstrom. Das Klimat 3930S wurde vor Versuchsbeginn mit einem Feinfilter der Porenweite 2  $\mu$ m gefiltert und der Schlauch mit wenig Wasser manuell von außen leicht hydrophiliert.

Es ist zu erkennen, daß die anfänglich auftretenden Fehlverteilungen mit zunehmender Zeit abnehmen, und sich gegen Ende des Versuchs stabilisieren. In Abbildung 26 ist die Änderung der Differenz zwischen den maximalen Abweichungen, Messbecher 2 und den minimalen Abweichungen, Messbecher 8, besonders gut zu erkennen. Der Betrag dieser Differenz ist im Verlauf des Versuchs von ca. 230 % auf ca. 140 % gefallen. Die Absolutabweichung ist mit ca.  $\pm$  75 % aber immer noch deutlich zu hoch.

Ś

`. .

•

Permanenthydrophiler Schlauch Typ1, neu Klimat 3930 S 2µm gefiltert Dichte 1,55 kg/l Volumenstrom : 0,274 L/(hm)



Abbildung 25: Permanenthydrophiler Schlauch Typ1 mit gefiltertem Klimat 3930S 0,27 l/h, fabrikneuer Schlauch, Abweichung des Mittelwertes abhängig vom Ort zu verschiedenen Zeiten



Abbildung 26: Permanenthydrophiler Schlauch Typ1 mit gefiltertem Klimat 3930S, Dichte 1,55 kg/l, 0,274 l/h, gereinigter Schlauch, Abweichung des Mittelwertes abhängig von der Zeit an verschiedenen Orten

### 10.3.3.6 Permanenthydrophiler Membranschlauch Typ2

Die Abbildung 27 zeigt die Ergebnisse, die mit einem permanenthydrophilen Membranschlauch Typ2 erzielt wurden, der im Vergleich zum Typ1 eine größere Porenweite aufweist. In diesem Versuch wurde ein Volumenstrom von 0,36 l/h Klimat 3930S eingestellt. Die eingezeichnete Trendgerade (gestrichelte Linie) zeigt den in Strömungsrichtung abfallenden austretenden Massenstrom. Die maximalen Abweichungen vom Mittelwert sind mit +50 bzw. -30 % deutlich besser als bei den Schläuchen des Typs1. Die Gesamtdauer des Versuchs betrug 6,5 h. Die dargestellten Ergebnisse umfassen eine Zeitspanne von ca. 1 h. Sie wurden nach dem ersten Drittel der Gesamtversuchszeit aufgenommen. Am Ende dieser Gesamtversuchszeit konnten erste Verstopfungserscheinungen beobachtet werden.



Abbildung 27: Permanenthydrophiler Schlauch Typ2 mit gefiltertem Klimat 3930S 0,36 l/h

Bei den Membranschläuchen ist es möglich die transmembrane Durchlässigkeit für die verwendeten wässrigen Salzlösungen durch die Benetzung mit Alkohol technischer Reinheit temporär stark zu erhöhen. Diese Effekte klingen nach etwa 10 - 15 Betriebsstunden vollständig ab. Eine irreversible Veränderung der chemischen oder physikalischen Eigenschaften der verwendeten Materialien konnte nicht festgestellt werden.

#### 10.3.3.7 Bisektionsverteiler

Bei der Bisektion wird der Lösungsmassenstrom durch Gabelung des Strömungskanals in zwei gleich große Massenströme geteilt. Bei dem hier verwendeten Verteiler wurde dieser Vorgang sieben mal wiederholt, so daß 128 Einzelkanäle erzeugt wurden. Der Einzelkanalquerschnitt wurde von einer Ebene zur nächsten verringert. Die kleinsten Kanäle und die Austrittsöffnungen hatten einen Durchmesser von 1 mm. Diese 128 Öffnungen waren auf 1 m Breite verteilt (siehe Abbildung 9).

Die in der Abbildung 28 dargestellten Kurven geben den Vergleich der Abweichung der ausgetretenen Salzlösungsmassen eines solchen Bisektionsverteilers vom jeweiligen Mittelwert bei dreimaliger Wiederholung des gleichen Versuchs wieder. Klimat 3930S mit einer Konzentration von 1,637 kg/l wurde mit einem kontinuierlichen Volumenstrom von etwa 0,18 l/h durch den Verteiler gepumpt und, analog zu den übrigen Versuchen, in 10 Messbechern gleicher Größe aufgefangen und ausgewogen. Bei allen drei Versuchen wurde dieselbe Lösung wiederholt verwendet, so daß von Versuch a über b nach c eine zunehmende Verschmutzung der Salzlösung eintrat.

Änderungen der Verteilung, wie sie bei den anderen Verteilersystemen bei diesem Vorgehen festgestellt wurde, konnte in diesem Fall nicht beobachtet werden. Zwischen den Versuchen a und b verging etwa ein Tag, zwischen den Versuchen b und c etwa drei Stunden. Dieser zeitliche Versatz, sowie die Tatsache, daß der Verteiler vor den Versuchen mit Wasser durchspült wurde, damit nach Abschalten der Anlage in die Kanäle des Verteilers eingedrungene Luft wieder herausgespült werden konnte, hatten keine offensichtliche Beeinträchtigung der Verteilung zu Folge.



Abbildung 28: Bisektionsverteiler, Volumenstrom 1,18 l/h Vergleich verschiedener Versuche mit gleichen Randbedingungen

# 10.4 Bewertung der Ergebnisse

In den bisher durchgeführten Versuchen konnte nur der Bisektionsverteiler die gestellten Anforderungen mit dem Sorbens Klimat 3930S in vollem Umfang erfüllen. Eine vergleichsweise grobe Filterung der Lösung sollte genügen, um Verstopfungen zu vermeiden. Die Herstellungskosten können nur bei hochautomatischer Fertigung, also bei großen Serien, im vertretbaren Rahmen liegen.

Relativ gute Verteilungsergebnisse konnte der permanenthydrophile Membran-Schlauch Typ2 erzielen. Die Salzlösung muß jedoch extrem gut gefiltert werden, um Verstopfungen zu vermeiden (vermutlich 0,2 µm Porenweite). Diese Filterqualität ist bei der hohen Viskosität von Klimat 3930S nur mit unvertretbarem Aufwand zu realisieren.

Nicht allzu weit von den Vorgaben entfernt waren auch die gelochten Gummischläuche, wobei die untersuchten Schläuche mit Außendurchmessern um 10 mm etwa um den Faktor 2 zu dick sind. Durch Variation der Lochdurchmesser, des Durchmesser/Wandstärke Verhältnisses, der Anordnung der Löcher und der Härte des Materials sollte es möglich sein einen Verteiler für Klimat 3930S zu konstruieren. Die notwendige Porenweite der Filterung wird im Bereich einiger µm liegen und muß auf das jeweilige Medium angepaßt sein. Bei den maschinell gelochten Schläuchen der Firma Rehau ist es wesentlich die Löcher genau radial zu stechen, da sich nicht radial verlaufende Kanäle unter Innendruck verschließen. Diese Vorgabe konnte durch die bis jetzt angewendete Herstellungsmethode noch nicht zufriedenstellend gelöst werden.

Eine Erhöhung der Verteilerstandzeiten durch den *crossflow* in Versuchsaufbau 1, die den verschlechternden Einfluß auf die Verteilungsqualität rechtfertigen würde, konnte bei den untersuchten Schläuchen nicht festgestellt werden.

Der *crossflow* hatte in Phase I die Verwendung von mikroporösen PTFE-Schläuchen der Firma Gore als Verteiler für LiCl-Lösung erst möglich gemacht.

# 11 Kühlung von Austauschflächen

### 11.1 Einfluß der Kühlung des Entfeuchters

Die Entfeuchtungsleistung eines Sorptionsentfeuchters wird zum einen durch das Sorptionsgleichgewicht bestimmt, zum anderen durch den vom Sorptionsprozeß erreichten Austauschgrad.

### 11.1.1 Sorptionsgleichgewicht

Ist das Sorbens eine Salzlösung, so bestimmt das Sorptionsgleichgewicht den Wasserdampfdruck über der Lösung in Abhängigkeit von ihrer Salzkonzentration und ihrer Temperatur. Die maximal verwendbare Salzkonzentration wird durch die Kristallisationsgrenze der Lösung festgelegt. Die Temperatur der Lösung stellt sich während des Sorptionsprozesses ein. Sie ist abhängig von der Eintrittstemperatur der Medien Luft und Lösung, von den Wärmekapazitätenströmen der Medien und von einer gegebenenfalls vorhandenen zusätzlichen Kühlung.

Ist keine zusätzliche Kühlung vorhanden, so erwärmt die freiwerdende Absorptionswärme sowohl die Luft als auch die Lösung. In dem zu entwickelnden Entfeuchter ist der Salzlösungsstrom so klein, daß seine Wärmekapazität vernachlässigt werden kann. Die Wärme wird über die Luft abgeführt.



# Abbildung 29: Sorptionsgleichgewichte gekühlte und ungekühlte Sorptionsprozesse

Abbildung 29 zeigt die Sorptionsgleichgewichte für einen ungekühlten und einen gekühlten Absorptionsprozeß im hx-Diagramm. Die Isosteren für LiCl-H<sub>2</sub>O und Klimat 3930S sind eingezeichnet. Gekühlt wird im dargestellten Fall gegen die Kühlgrenze der eintretenden Luft. Im ideal gekühlten Absorptionsprozeß kann die Luft unter den gegebenen Bedingungen um 11,2 g/kg entfeuchtet werden, im ungekühlten Fall um nur 3,5 g/kg

### 11.1.2 Austauschgrad

Der Austauschgrad des Sorptionsprozesses beschreibt inwieweit die Annäherung an das Sorptionsgleichgewicht im Sorptionsprozeß gelingt. Als treibende Kraft für den Stoffaustausch wird hier vereinfachend der Wassergehalt der Luft x angenommen. (vergleiche [46])

$$\varepsilon_x = \frac{x_{ein} - x_{aus}}{x_{ein} - x_{opt}}$$

Der Wassergehalt  $x_{opt}$  ist der Gleichgewichtswassergehalt bei der Eintrittskonzentration der Lösung und der Eintrittstemperatur des Kühlmediums.

Der erreichbare Austauschgrad ist einerseits abhängig von der spezifischen Größe des Entfeuchters und vom Kapazitätenstromverhältnis von Luft zu Salzlösung, andererseits von der Art der Strömungsführung, wie z.B. Gegenstrom oder Kreuzstrom.

Der gekühlte Sorptionsentfeuchter arbeitet zusätzlich auch als Luftkühler. Deshalb kann auch für den Wärmeaustausch ein Austauschgrad definiert werden.

$$\varepsilon_t = \frac{T_{ein} - T_{aus}}{T_{ein} - T_{opt}}$$

Die Temperatur  $T_{opt}$  ist dabei die Kühlwassereintritttemperatur.

### 11.2 Erforderlicher Austauschgrad des Entfeuchters

Bei der technischen Auslegung eines Sorptionentfeuchters ist zu klären, welcher Austauschgrad erforderlich ist, um die angestrebte Restfeuchte zu erreichen.

Die Tabelle 6 gibt in Abhängigkeit von der Kühltemperatur den Austauschgrad an, der erforderlich ist, um diese Restfeuchte zu erreichen.. Eine Eintrittsfeuchte in den Raum von 8 g/kg ist in vielen Fällen ausreichend, um die latenten Lasten abzuführen.

÷

s,

Für nicht zu hohe Eintrittsfeuchten, z.B. 12g/kg, ist bei Kühltemperaturen unter 25 °C ein Austauschgrad von ca. 70 % ausreichend, um eine Austrittsfeuchte von 8g/kg zu erreichen.

	Xaus	8	8
	Xein	12	14,5
	dX	4	6,5
Kühltemp.	Xopt	dXg/dXgopt	dXg/dXgopt
20	4,51	0,53	0,65
21	4,82	0,56	0,67
22	5,16	0,58	0,70
23	5,51	0,62	0,72
24	5,89	0,65	0,75
25	6,29	0,70	0,79
26	6,71	0,76	0,83
27	7,16	0,83	0,89
28	7,63	0,92	0,95
29	8,13	nicht mögl.	nicht mögl.
30	8,66	nicht mögl.	nicht mögl.

### Tabelle 6: Austauschgrad des Sorptionsprozesses als Funktion der Kühltemperatur

### 11.3 Kreuz- oder Gegenstromkühlung des Entfeuchters

Gegenstromwärmeübertrager haben in soweit Vorteile gegenüber Kreuzstromwärmeübertragern, als sie bei nahezu gleich großen Wärmekapazitätenströmen der beiden Medien gerade hohe Austauschgrade von über 60 % mit deutlich weniger Fläche realisieren können. Bei gleich großen Wärmekapazitätenströmen der beiden Medien sind Kreuzstromwärmeübertrager mit mehr als 60 % Austauschgrad praktisch nicht mehr realisierbar, weil der Flächenbedarf viel zu groß wird, ([1] S140).

Gerade dieser Fall ist jedoch interessant, denn als Wärmesenke für die Absorptionswärme steht der Abluftstrom aus dem klimatisierten Raum zur Verfügung. Wird die Rückkühlung des Absorptionsprozesses durch einen indirekten Verdunstungskühler (oder Kühlturm) im Abluftstrom realisiert, so sind die virtuellen Wärmekapazitätenströme (dH/dT) von sich befeuchtender Abluft einerseits und absorbierender Zuluft andererseits nahezu gleich groß. Aus diesem Grund wurde von den Projektpartnern entschieden eine Gegenstromkühlung anzuwenden.

Dies hat weitreichende Konsequenzen. Ein direkter Gegenstrom zwischen Luftströmen läßt sich mit vertretbarem Aufwand kaum realisieren. Meist wird ein Kreislauf mit einem flüssigen Wärmeträger eingeschaltet oder Wärmerohre (heat pipes) mit verdampfenden und kondensierenden Medien angewendet. Dies erhöht die spezifischen Kosten der Austauschfläche erheblich denn es müssen druckfeste, wasserdichte Verbindungen hergestellt werden. Ein Kreuzstromwärmetauscher zwischen Luftströmen ist hingegen einfach herzustellen und als Komponente schon im Lieferprogramm der Fa. Menerga vorhanden.

# 11.4 Einfluß von ungekühlter Austauschfläche

Die gekühlte Austauschfläche muß möglichst vollständig benetzt werden. Dies ist nicht einfach zu realisieren. In diesem Zusammenhang wurde die Frage diskutiert: Ist es sinnvoll zur vorhandenen gekühlten Austauschfläche zusätzliche oder ersatzweise nicht unmittelbar gekühlte Austauschfläche zusätzliche im Entfeuchter zu installieren?

Voraussetzungen, um diese Frage zu bejahen, sind:

- 1. Die ungekühlte Fläche muß kostengünstiger herzustellen sein als die gekühlte.
- 2. Die Erhöhung der Druckverluste im Entfeuchter und damit die Erhöhung des elektrischen Hilfsenergiebedarfes durch den Einbau zusätzlicher Flächen muß tolerierbar sein
- 3. Der Stoffumsatz auf der gekühlten Fläche muß durch den Stofftransport limitiert sein, nicht durch die Wärmeabfuhr, sonst ist jedenfalls keine Verbesserung zu erwarten.

#### Voraussetzung 1

ist mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt.

### Voraussetzung 2

Der Druckverlust über dem Entfeuchter setzt sich aus drei Anteilen zusammen, Verluste am Eintritt, am Austritt und dem Verlust über der Austauschfläche selbst. Mit der Annahme, daß der Einbau der ungekühlten Fläche den Strömungsquerschnitt nicht nennenswert verengt, werden sich Eintritts- und Austrittsverluste nicht wesentlich verändern. Der Verlust über der Austauschfläche wächst proportional zu ihrer Größe. Zu bestimmen ist die relative Größe dieses Verlustes bezogen auf den Gesamtdruckverlust und der Gesamtdruckverlust bezogen auf eine Übertragungseinheit (NTU). Diese Rechnung wurde bisher nicht durchgeführt.

#### Voraussetzung 3

ist (bei Absorption) dann erfüllt, wenn die gekühlte Fläche nicht vollständig benetzt ist. Sobald der Sorptionsprozeß als nicht isotherm angesehen werden muß, sind Wärme- und Stofftransport gekoppelt zu berechnen.

Dies wurde für ein Beispiel mit dem Simulationsprogramm ASR [47] für zwei verschiedene Kühlfälle ausgeführt. Dabei wurde im ersten Fall die benetzte Austauschfläche über die Luft gekühlt, die wiederum vom Kühlwasser gekühlt wurde, im zweiten Fall wurde die Sole direkt vom Kühlwasser gekühlt. Die Berechnungsparameter sind in Tabelle 7 dargestellt. Der erzielte Austauschgrad wurde in Abhängigkeit von der Austauschfläche in Abbildung 30 dargestellt.

Abbildung 30 zeigt, daß bei einem Austauschgrad von 60 % unter den gegebenen Annahmen die erforderliche, nur über die Luft gekühlte Fläche ca. 3,5 mal größer ist, als eine die Fläche, die direkt vom Kühlwasser gekühlt wird. Die direkt gekühlte Fläche ist also wesentlich effizienter. Deshalb wurde eine direkt gekühlte, stoffaustauschende Fläche entwickelt.



Abbildung 30: Austauschgrad eines Sorptionspozesses in Abhängigkeit von der Art der Kühlung

Luftmassenstrom	0,277 kg/s
Lufteintrittstemperatur	35 °C
Lufteintrittswassergehalt	14,5 g/kg
Solemassenstrom	0,004629 kg/s
Soleeintrittstemperatur	35 °C
Soleeintrittskonzentration	40%
Kühlwassermassenstrom	2,7 kg/s
Kühlwassereintrittstemperatur	24 °C
Stoffaustauschkoeffizient Luft-Sole	20 mm/s
Wärmeaustauschkoeffizient Luft-Sole	20 W/(m <sup>2</sup> K)
Wärmeaustauschkoeffizient Sole-Kühlung	200 W/(m <sup>2</sup> K)
Wärmeaustauschkoeffizient Luft-Kühlung	20 W/(m <sup>2</sup> K)

Tabelle 7: Eintrittsparameter für Absorption an LiCl-H<sub>2</sub>O
### 12 Konstruktion und Bau eines Sorptionsentfeuchters

### 12.1 Auslegung

Die Auslegungsdaten für den in Phase II hergestellten Entfeuchter sind in Tabelle 8 wiedergegeben. Der Entfeuchter wurde für eine Luftgeschwindigkeit von 2 m/s ausgelegt.

.

abolic o. Ausicguilgsuaton fui don borphonsonnicuonic	Tabelle 8:	Auslegungsdaten f	ür den	Sorptionsentfeuchter
---	------------	-------------------	--------	----------------------

Geometrische Vorgaben:						
Plattenanzahl	N	49				
Breite der Platten	В	500	mm			
Höhe der Platten	H	1000	mm			
Dicke der Platten	S	5,4	mm			
Abstand der Platten	d	5,0	mm			
Auslegungsfall:						
mittlere Luftgeschwindigkeit	v	2	m/s			
Kühlwassermassenstrom	mw	4000	kg/h			
Salzlösungsstrom	ms	12,5	kg/h			
Kapazitätenstromverhältnis	CR	1	-			
Luft zu Sole						
Stoffaustauschkoeffizient bei	β(v)	0,02	m/s			
Auslegungsgeschw.						
Abgeleitete Größen für den	Ausleg	gungsfall				
Teilung des Platten Paketes	T	10,4	mm	T = d + s		
netto Länge des Plattenpa-	L	509,6	mm	$L = N \cdot T$		
ketes						
Austauschfläche	As	49	m <sup>2</sup>	$As = N \cdot B \cdot L$		
netto Austauschvolumen	Vs	0,2548	m <sup>3</sup>	$Vs = N \cdot B \cdot H \cdot T$		
vol.spezifische Fläche	Av	192	$m^2/m^3$	AV = As / Vs		
freier Anströmquerschnitt	Aq	0,1225	m <sup>2</sup>	$Aq = N \cdot B \cdot T$		
Auslegungsluftstrom	VI	0,245	m <sup>3</sup> /s	$V = Aq \cdot v$		
	Vl	882	m³/h			
Luftmassenstrom	ml	997	kg/h	$ml = Vl \cdot \rho$		
Anzahl der Übergangsein-	NTU	4		$NTU = (H \cdot \beta \cdot 2) / (v \cdot d)$		
heiten						
max. Austauschgrad	ε <sub>x</sub>	0,8		$\varepsilon_x = f(NTU, CR)$		

Aus den geometrischen Vorgaben und dem für diese Geschwindigkeit in Phase I experimentell bestimmten Stoffaustauschkoeffizienten für eine vollbenetzte Austauschfläche wurden die für den Sorptionsprozeß maßgebenden Größen abgeleitet. Dabei wurde das vereinfachte, isotherme Modell [46] verwendet. Wegen der guten Ankopplung der Sole an das Kühlwasser und wegen des hohen Kühlwassermassenstroms ist es hinreichend genau. Der Kühlwasserstrom ist ausreichend, um die Absorptionswärme mit einer Temperaturdifferenz von weniger als 1,5 K abzuführen. Bei voll benetzter Fläche und angepaßten Kapazitätenströmen von Luft und Salzlösung kann mit diesem Entfeuchter ein Austauschgrad von maximal  $\varepsilon_x = 0.8$  erreicht werden.

### 12.2 Konstruktion

Der Luftentfeuchter besteht aus einer wassergekühlten Austauscheinheit, die in ein Gehäuse eingebaut ist. Auf die Austauscheinheit ist der Lösungsverteiler demontierbar aufgesetzt.

### 12.2.1 Austauscheinheit

Die Austauscheinheit besteht aus 49 Polypropylen-Stegdoppelplatten mit einer Breite von 0,5 m und einer Länge von 1 m in einem Gehäusequerschnitt von 0,5 m x 0,52 m. Die Wandstärke der Platten beträgt ca. 0,3 mm. Auf die Platten ist ein Vlies (Freudenberg 1702) thermisch aufgeschweißt. Die Platten sind untereinander mit einem Abstand von 5 mm zu einem Paket verklebt. Das Plattenpaket ist wasserdicht und druckfest in kastenförmige Seitenteile eingeklebt, die aus Polypropylen -Platten geschweißt sind. Eingeschweißte Stege in den Seitenteilen lenken das Kühlwasser so um, daß es horizontal in fünf Durchgängen im Kreuz-Gegenstrom zur Luft durch die Kanäle der Stegdoppelplatten strömt.

### 12.2.2 Gehäuse

Das Gehäuse ist dreiteilig, aus Polypropylenplatten (5 mm Wandstärke) luft- und wasserdicht geschweißt. Die Teile werden über Flansche und eine Flachdichtung luftdicht verbunden. Das Gehäuse des Luftentfeuchters ist in Abbildung 31 dargestellt

### В А 520 620 R 몿 1.-Ohlwasser ein 8 8 н В A Schnitt B-B Teilschnitt A-A rechts vom hinten links

# Luftentfeuchter



### Abbildung 31: Skizze Luftentfeuchter 11/95

An das Kopfteil des Gehäuses wird der Luftauslaß angeschlossen. Die Luftzu - und abführung erfolgt in Wickelfalzrohren. Durch Abnehmen des Kopfteils ist die Soleverteilung zugänglich. Es kann eine Solepumpe für den *crossflow* und einen Solefilter aufnehmen.

•

Das Mittelteil ist mit der Austauscheinheit fest und dicht verschweißt. Die Austauscheinheit in Verbindung mit dem Gehäusemittelteil muß die durch einen Wasserdruck von 1 bar entstehenden Kräfte von ca. 50 kN aufnehmen (bei einer Bauteilabmessung von 1 m x 0,5 m).

Im Unterteil des Gehäuses wird die Luft zugeführt und die ablaufende Sole gesammelt. Der Solesumpf sollte möglichst klein sein, um die aktuelle Austrittssalzkonzentration ohne Verzögerung messen zu können. Dazu muß der Boden des Mittelteils in zwei Dimensionen abgeschrägt sein, so daß es einen definierten tiefsten Punkt im Boden gibt. Dort sollte der Soleauslauf angebracht sein. Der Boden des ausgeführten Entfeuchters war nur in einer Dimension abgeschrägt. Im Unterteil ist eine Revisionsöffnung vorgesehen, durch die ein Höhenstandsmesser und eine Probenentnahme einjustiert werden können.

### 12.2.3 Lösungsverteiler

Der vom ZAE Bayern hergestellt Lösungsverteiler besteht aus 49 mikroporösen PTFE-Schläuchen, wie sie in Phase I verwendet wurden, mit ca. 5 mm Durchmesser und 500 mm Länge. Die mikroporösen Schläuche sind beidseitig an Verteilerrohre von 20 mm Durchmesser und 500 mm Länge angeschlossen. Sie sind jeweils mit ca. einem Drittel ihres Umfangs in den oberen, halb offenen Kanal einer Austauschplatte eingedichtet. Sie wurden in *crossflow* Technik durchströmt, vgl. Kapitel 10.

### 12.3 Fertigung und Inbetriebnahme

Der erste Entfeuchter wurde von Menerga Apparatebau GmbH Ende September 95 geliefert, in der ersten Oktoberwoche im Labor des ZAE Bayern an die Versuchsanlage angeschlossen und in Betrieb genommen. Der Kühlwasserkreis, der den Abdrücktest der Fa. Menerga bestanden hatte, war undicht. Der Entfeuchter wurde zur Reparatur an Menerga zurückgesandt. Der Schaden am Entfeuchter wurde bei Menerga analysiert. Die Verklebung zwischen zwei Platten im Bereich des eintretenden Kühlwassers war herausgedrückt worden, was vermutlich auf den sehr kleinen Kühlwassereintritt zurückzuführen war (Durchmesser ca. 20 mm) und die damit verbundene hohe Strömungsgeschwindigkeit.

Ein zweiter Entfeuchter wurde von Menerga unter weitgehender Verwendung der vorhandenen Teile hergestellt. Im Bereich des Kühlwassereintritts, der nunmehr auf drei Anschlußstellen hatte, waren Prallplatten vorgesehen, die einerseits die Verklebungen schützen, andererseits die Strömung besser verteilen sollten.

Der zweite Entfeuchter wurde am 3.11.95 im ZAE angeliefert, an die Versuchsanlage angeschlossen, die Soleverteilung auf Maß gefertigt und eingebaut. Anschließend wurden der Luft- und Solekreis in Betrieb genommen, sowie der Kühlwasserkreis befüllt und entlüftet.

Unter statischem Wasserdruck von ca. 0,2 bar kam es zu starken Verformungen des Gehäuses. Das Gehäuse wurde daraufhin, zur Vermeidung von Beschädigungen, mit aufgespannten Platten versteift,. Da der Kühlwasserkreis nach dem Einschalten 0,5 bis 1 bar Betriebsdruck verursacht, verzichtete man wegen der Gefahr des Bauteilversagens durch Gewaltbruch auf einen Betieb. Bei einem ungekühlten Absorptionsversuch mit LiCl- $H_2O$  als Sorbens trat, trotz dieser unterstützenden Maßnahmen, ein Leck im Kühlwasserkreis auf. Der Versuch war nicht auswertbar, da aus diesem Grund kein stationärer Zustand erreicht wurde. Das vorgesehene Versuchsprogramm konnte nicht durchgeführt werden.

### 13 Physikalische Eigenschaften von Klimat 3930S

Für die Anwendung in Sorptionsentfeuchtern wurde nach Erfahrungen der Phase I die Salzlösung Klimat 3930 der Firma SOLVAY Deutschland mit einem neuen Zusatz zusammengestellt, der nach Angaben des Herstellers bei gleichbleibenden Sorptionseigenschaften die Oberflächenspannung reduzieren und die Kristallisationsneigung bei hohen Konzentrationen verringern soll.

Zusammensetzung Klimat 3930S nach Herstellerangaben: SOLVAY Deutschland (Angaben in Gewichtsprozent):

CaCl <sub>2</sub>	:	39 %
$Ca(NO_3)_2$	:	18 %
Emulgator S	:	5 %
H <sub>2</sub> O	:	Rest ad 100

Die angegebene Zusammensetzung entspricht einer Konzentration von 62 Gew.%. Salzlösung dieser rechnerischen Konzentration wurde als Referenzlösung maximaler Konzentration für die Bestimmung der physikalischen Eigenschaften verwendet.

Eine Überprüfung durch Eindampfen der Salzlösung auf den Salzanteil wurde nicht durchgeführt. Nach Angaben von Herrn Dr. Kipping, SOLVAY Deutschland hat die 62 % ige Salzlösung einen Siedepunkt von ca.148 °C bei 1000 hPa Umgebungsdruck. Bis zu dieser Temperatur sollte der Emulgator S, dessen chemische Zusammensetzung nicht mitgeteilt wurde, stabil sein. Diese Temperatur ist allerdings nicht ausreichend z.B. das Hexahydrat  $[Ca(H_2O)_6]Cl_2$  zum wasserfreien CaCl<sub>2</sub> zu entwässern, so daß der reine Salzanteil sich nicht hinreichend genau bestimmen läßt. Darüber hinaus kann eine zu schnelle Erwärmung zu einer teilweisen Hydrolyse unter Bildung von Chlorwasserstoff führen [48].

### 13.1 Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung wurde mit einer der Drahtbügelmethode ähnlichem Verfahren mit Federwaage und Kupferring gemessen. Der Ablesefehler beträgt  $\pm$  6 mN/m. Die Temperatur der Salzlösungen wurde mit einem Quecksilberthermometer gemessen. Zur Überprüfung der Meßmethode wurde die Oberflächenspannung von destilliertem Wasser mit diesen Genauigkeiten erfolgreich vermessen.

Tabelle 9:	Meßwerte	Oberflächens	pannung
------------	----------	--------------	---------

Flüssigkeit	Oberflächenspannung [mN/m]	Temperatur °C
H <sub>2</sub> O, destilliert	73	20,9
Klimat 3939; Lieferung 9/92 $\rho = 1,505 \text{ g/cm}^3$ bei 20 °C d.h. C = 58,5 %	103	21,8
Klimat 3939S; Lieferung 11/94 $\rho = 1,610 \text{ g/cm}^3$ bei 20 °C d.h. C = 62 %	95	16,8
LiCl $\rho = 1,252 \text{ g/cm}^3$ bei 20 °C d.h. C = 40,3 %	87	21,6

#### 13.2 Dichte

Die Dichte wurde mit einem DMA 38 Dichtemeßgerät der Firma A. Paar, das nach der Biegeschwinger-Methode arbeitet auf  $\pm 1.10^3$  kg/m<sup>3</sup> genau gemessen. Die Präzision der internen Thermosstatisierung der Meßzelle beträgt  $\pm 0,1.K$ . Die Dichte wurde für Meßtemperaturen zwischen +15 °C und 40 °C in Temperaturschritten von 5 K bestimmt.

Nach [46] kann für die Dichte eine Interpolation mit 6 Parametern verwendet werden:

$$\rho(C, T_{Lsg}) = \frac{1}{(p_{g,2}T_{Lsg} + p_2)C^2 + (p_{g,1}T_{Lsg} + p_1)C + p_{g,0}T_{Lsg} + p_0}$$

Tabelle 10: Parameter zur Dichteinterpolation Klimat 3930S

$p_{g,2}$	=	-4,742734 ·10 <sup>-7</sup>	m <sup>3</sup> /(kg °C)
$p_{g,1}$	=	3,182172 ·10 <sup>-7</sup>	m <sup>3</sup> /(kg °C)
$p_{s,0}$	=	2,797017 ·10 <sup>-7</sup>	m³/(kg °C)
n.	=	$2.287352 \cdot 10^{-4}$	m <sup>3</sup> /kg
<b>F</b> 2		<b>1</b> , <b>1</b> 0,000 <b>1</b> 0	,g
$p_1$	=	<b>-</b> 7,575631 ·10 <sup>-4</sup>	m <sup>3</sup> /kg

mittlerer Fehler:  $\overline{\sigma} = 1,306502 \text{ kg/m}^3$ maximaler Fehler:  $\sigma = 2,267717 \text{ kg/m}^3$ 



Abbildung 32: Dichte von Klimat 3930S Meßwerte und Interpolation

### 13.3 Gleichgewichtstaupunkt / Isosteren

Zur Vermessung des Taupunktes von mit Salzlösung im Gleichgewicht stehender Luft wurde in Phase I eine Meßanlage neu konzipiert und aufgebaut. Meßgrößen sind die Temperatur der Salzlösung und der Taupunkt von Luft über der temperierten Salzlösung [46][49].

Die funktionsuntüchtige und veraltete Meßdatenerfassung der Meßanlage (Firma Kontron) wurde in Phase II durch eine PC gestützte Meßdatenerfassung sowie ein neues Meßprogramm ersetzt.

In der ursprünglichen Meßanlage wurde die Wassertemperatur mit einem individuell kalibriertem Pt100-Widerstandsthermometer mit einer Genauigkeit von 0,07 K und der Taupunkt in einer kontrollierte Luftströmung mit einem kalibriertem DEW 10 Taupunktmeßgerät der Firma General Easter vermessen. Durch Vermessung des Taupunktes von Luft über reinem Wasser wurde eine Kalibriergenauigkeit der reinen Taupunktmessung auf 0,2 K erreicht.



Abbildung 33: Schematische Darstellung des Luftkreislaufs in der Meßanlage

Zur zusätzlichen und unabhängigen Kontrolle des Taupunktmeßwertes wurde in Phase II darüber hinaus ein Hygro M3 Präzisionstaupunktmeßgerät mit einem D2-Sensor der Firma General Eastern in den Luftkreislauf integriert. Die absolute Meßgenauigkeit des Gesamtsystems wird werkseitig mit 0,2 K angegegeben, die vom M3 ermittelte Taupunktstemperatur ist auf 0,05 K stabilisiert. Zusätzlich ermöglicht ein beheiztes Mikroskop die optische Kontrolle des Taupunktes. Der verwendete Meßaufbau ist in Abbildung 33 gezeigt.

Ş

۰.

•

Zur Überprüfung der erweiterten Meßtechnik wurden wieder Taupunkte von Luft über reinem (vollentsalztem) Wasser für Wassertemperaturen zwischen 10 °C und 45 °C durchgeführt. Es zeigte sich, daß die beiden unabhängigen Taupunktmeßgeräte über den gesamten Meßbereich besser als 0,1 K übereinstimmen, die gemessene Taupunkstemperaturen allerdings linear steigend von zunächst ca. 0,05 K bei 10 °C Wassertemperatur bis zu ca. 0,3 K bei 45 °C von der Wassertemperatur abweichen.

Dieser Effekt beruht wahrscheinlich auf einem unerwünschten Wärmeeintrag durch die Luft des Luftkreislaufes in das temperierte Wasser. Um Kondensation zuverlässig auszuschließen, wird im Luftkreislauf der Meßanlage die Luft durch eine Regelung auf eine Temperatur gehalten, die geringfügig über der Wassertemperatur liegt (zwischen 3 K ... 7 K). Diese erwärmte Luft erwärmt die Wasseroberfläche beim Überströmen. Um diesen Effekt zu verringern, wird das Wasser mit einem Magnetrührer gerührt. Die Oberflächentemperatur weicht aber offenbar von der Temperatur der Meßstelle ab.

Da weder Mittel noch Zeit zum weiteren Umbau der Meßanlage vorhanden waren, wurden die Meßanlage in diesem Zustand zur Vermessung eingesetzt, um eine prinzipielle Aussage über die Sorptionseigenschaften von Klimat 3930S zu machen. Der Meßfehler für die Wassertemperatur muß daher mit 0,3 K (Meßgenauigkeit Pt100: 0,07 K), der Meßfehler für die Taupunktmessung mit 0,2 K angegeben werden.



Abbildung 34: Meßwerte für Taupunkt in Luft über Klimat 3930S, Meßwerte für 62 %, Vergleichswerte für Wasser berechnet mit Dampfdruckfunktion aus [50]

Tabelle 13 zeigt die Meßwerte für den Taupunkt in Luft über Klimat 3930S mit einer Konzentration von 62 %, dargestellt als Isostere im lnp - 1/t Diagramm. Zum Vergleich ist der Dampfdruck von reinem Wasser als Funktion der Wassertemperatur mit aufgetragen.

Konzentration	Temperatur	Dichte	Konzentration	Temperatur	Dichte
C	$T_{Lsg}$	$ ho_{Lsg}$	C	$T_{Lsg}$	$ ho_{Lsg}$
[1]	[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[1]	[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]
0,620	15,0	1,6146	0,490	15,0	1,4613
0,620	20,0	1,6106	0,490	20,0	1,4578
0,620	25,0	1,6067	0,490	25,0	1,4544
0,620	30,0	1,6028	0,490	30,0	1,4510
0,620	35,0	1,5991	0,490	35,0	1,4476
0,620	40,0	1,5956	0,490	40,0	1,4444
0,599	15,0	1,5887	0,435	15,0	1,3999
0,599	20,0	1,5847	0,435	20,0	1,3966
0,599	25,0	1,5808	0,435	25,0	1,3934
0,599	30,0	1,5770	0,435	30,0	1,3901
0,599	35,0	1,5734	0,435	35,0	1,3870
0,599	40,0	1,5699	0,435	40,0	1,3840
0,544	15,0	1,5242	0,382	15,0	1,3395
0,544	20,0	1,5205	0,382	20,0	1,3364
0,544	25,0	1,5168	0,382	25,0	1,3334
0,544	30,0	1,5132	0,382	30,0	1,3305
0,544	35,0	1,5099	0,382	35,0	1,3275
0,544	40,0	1,5065	0,382	40,0	1,3247

Tabelle 11: Dichte von Klimat 3930S, Meßwerte

 Tabelle 12: Tabellenwerte Dichte von reinem Wasser [52]

<b></b>	Konzentration	Temperatur	Dichte
	Ronzenuanon	Temperatur	Dicitie
	C	$T_{w}$	$ ho_w$
	[1]	[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Γ	0,00	15,0	0,9991
	0,00	20,0	0,9982
	0,00	25,0	0,9970
	0,00	30,0	0,9956
	0,00	35,0	0,9940
L	0,00	40,0	0,9922

Tabelle 13:Meßwerte für Taupunkt in Luft über Klimat 3930S, Meßwerte für 62 %, Ver-<br/>gleichswerte für Wasser berechnet mit Dampfdruckfunktion aus [50]

Konzentration	Temperatur	Taupunkt	Dampfdruck	Wasserdampfdruck
С	$T_{Lsg}$	$\widetilde{T}_{Lsg}$	P <sub>Lsg</sub>	P <sub>w</sub>
-	°C	°C	Pa	Pa
0,62	20,28	-3,59	452,17	2377,38
0,62	30,40	4,52	843,30	4338,67
0,62	40,31	13,20	1516,69	7499,01
0,62	50,57	22,16	2667,91	12690,36
0,62	60,06	30,69	4412,63	19978,75

## 14 Verzeichnisse

### 14.1 Nomenklatur

Symbol	Einheit	Erläuterung
A	m <sup>2</sup>	Austauschfläche
ASMR	-	Luft zu Salz - Massenstromverhältnis
В	m	Breite des Sorptionsentfeuchters
С	-	Massenkonzentration der Salzlösung
$\Delta h$	kJ	spezifische Enthalpie Differenz
$\Delta H$	kJ	Enthalpiedifferenz
Δ <i></i> Ħ	kW	Enthalpiestrom
H	m	Höhe des Sorptionsentfeuchters
'n	kg/h	Massenstrom
MR	kg/kg	Massenstromverhältnis - Luft zu Salzlösung
$r_0$	kJ/kg	Verdampfungsenthalpie von reinem Wasser bei 0°C
Ρ	Pa	Druck
$\Delta p$	Pa	Druckdifferenz
SC	MJ/m <sup>3</sup>	Speicherdichte für Luftentfeuchtungsenergie
$\widetilde{T}$	°C	Taupunkt
Γ.	°C	Temperatur
Т	m	Tiefe des Sorptionsentfeuchters
.V	m³/h	Volumenstrom
x	-	Wassergehalt
Δx	-	Differenz im Wassergehalt
<i>x</i> *	-	Gleichgewichtswassergehalt über der Salzlösung
β	m/s	Stoffübergangskoeffizient
ε	-	Austauschgrad
ĸ	-	Massenbilanzquotient
ρ	kg/m <sup>3</sup>	Dichte

ŝ,

٩

#### Indizes

. 1. . 1

17.19.4

. . ..

.

Symbol	Enauterung
٥′	Zustand am Eintritt in den Sorptionsentfeuchter
◊″	Zustand am Austritt aus dem Sorptionsentfeuchter
$\Diamond^k$	Kanal
¢ <sub>e</sub>	Entfeuchtung
$\diamond_1$	Luft
♦ <sub>Lsg</sub>	Salzlösung
$\diamond^{U}$	Umgebung
$\diamond_{Tot}$	gesamt
¢ <sub>P</sub>	Prozeß
¢ <sub>s</sub>	Salz, sensibel
٥ <sup>ν</sup>	verdünnt
♦ <sub>w</sub>	Wasser

80

- - -

.

### 14.2 Literatur

- 1 Recknagel, Sprenger, und Hönmann, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Hrsg. E.R.Schramek, Oldenbourg Verlag, München, 66. Auflage, 1992.
- 2 Yazaki Corporation, Water Fired Single Effect and Direct Fired Double Effect Absorption Chiller CH-SD20. Technischer Bericht, Yazaki Corporation, Swiss Office, Zürich, 1984.
- 3 Ishida Masaharu, Operating Results for a Solar Cooling System Using a Combined Single-Double Effect Absorption Chiller. In Intersol 85, Montreal, ISES Congress, S.~700--707, Int. Solar Energy Society., Pergamon Press, 1985.
- 4 M.L Warren and M. Wahlig, Cost Performance Goals for Commercial Active Solar Absorption Cooling Systems. Transact.ASME, Journal of Solar Energy Engineering, 107:136--140, May 1985.
- 5 M. Wahlig, J. Rasson, M. Warren, K. Dao, R. Armer, P. Brothers, and P.L. Chen. Active Solar Cooling. Report, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, 1986.
- 6 S. Shelton, Residential Space Conditioning with Solid Sorption Technology. In *Solid Sorption Refrigeration, IIR Congress, Paris*, S.55, Int. Inst. of Refrigeration, 1992.
- 7 F. Meunier, La Sorption Solide, Une Alternative Aux CFCs. In Solid Sorption Refrigeration, IIR Congress, Paris, S.44--52, Int. Inst. of Refrigeration, 1992.
- 8 J.J. Jurinak, J.W. Mitchell, and W.A.Beckman, Open-Cycle Desiccant Air Conditioning as an Alternative to Vapor Compression Cooling in Residential Applications. *Transact.ASME, Journal of Solar Energy Engineering*, **106**:252--260, Aug. 1984.
- 9 M. Epstein, M. Grolmes, K. Davidson, and D. Kosar, Desiccant Cooling System Performance: a Simple Approach, *Transact.ASME*, *Journal of Solar Energy Engineering*, 107:21--28, Feb. 1985.
- 10 ASHRAE, Energy Conservation in New Building Design, ANSI/ASHRAE/IES Standard 90A1980, The American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, and Illuminating Engineering Society of North America, New York, 1980.
- J.E. Clark, A.F. Mills, and H. Buchberg, Design and Testing of Thin Adiabatic Desiccant Beds for Solar Air Conditioning Applications. *Transact.ASME*, *Journal of Solar Energy Engineering*, 103:89--91, May 1981.
- 12 Vaikuntam Raghavan and Dimitri Gidaspow, Diffusion and Adsorption of Moisture in Desiccant Sheets, AIChE Journal, 31(11):1791--1800, Nov 1985, Dep. of Chem. Engineering, Illinois Inst. of Tech, Chicago, IL 60616.
- 13 P.R. Burns, J.W. Mitchel, and W.A. Beckman, Solar Hybrid Desiccant Cooling System in Supermarket Applications, In Intersol 85, Montreal, S.700--707, Int. Solar Energy Soc., Pergamon Press, 1985.
- 14 T.S. Kang and I.L. Maclaine-cross, High Performance Solid Desiccant, Open Cooling Cycle, *Transact. ASME, Journal of Solar Energy Engineering*, **111**:176--183, May 1989.
- 15 I.L. Maclaine-cross, High Performance Adiabatic Desiccant Open Cooling Cycles, *ASME Journal* of Solar Energy Engineering, **107**:102--104, 1985.
- 16 B. Shelpuk, The Technical Challenges for Solid Desiccant Cooling, In *Solid Sorption Refrigeration, IIR Congress, Paris*, S.263--269, Int. Inst. of Refrigeration, 1992.
- 17 D.J. Close and R.V. Dunkle, Energy Storage Using Desiccant Beds, In Conference of the Int. Solar Energy Soc., Melbourne, International Solar Energy Society, 1970.

- 18 D.J. Close and T.L. Pryor, The Behavior of Adsorbent Energy Storage Beds, Solar Energy, 18:287--292, 1976.
- 19 T.L. Pryor and D.J. Close, Measurements of the Behavior of Adsorbent Energy Storage Beds, Solar Energy, 20:151--155, 1978.
- 20 Juan Bassols-Rheinfelder, Experimentelle und numerische Untersuchung eines offenen Adsorptionssystems zur solaren Raumkühlung, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1982.
- 21 Noureddine Khelifa, Das Adsorptionspaar Silicagel-Wasserdampf, Anwendung als solares Klimatisierungssystem, Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München, 1984.
- 22 E. Lävemann, R. Schneewind, and R. Sizmann, Low Temperature Driven Open Air Conditioning with Solid Adsorbents, In *Advances in Solar Energy Technology, ISES Congress, Hamburg*, S.2622--2626, Int. Sol. Energy Society, 1987.
- 23 E. Lävemann and R. Sizmann, Energy Storage in Open Cycle Desiccant Cooling Systems, Comparison of Liquid and Solid Desiccants, In *Solid Sorption Refrigeration, IIR Congress, Paris*, S.270--275, Int. Inst. of Refrigeration, 1992.
- 24 G.O.G. Löf, Cooling with Solar Energy, In The Congress on Solar Energy, Tucson, Arizona, S.171--189, Int. Solar Energy Soc., 1955.
- 25 S. Patnaik, T.G. Lenz, and G.O.G. Löf, Performance Study for an Experimental Solar Open-Cycle Liquid, Desiccant System, *Solar Energy*, 44 (3):123--135, 1990.
- 26 A. Kakabaev and A. Khandudyev, Absorption Solar Refrigeration Unit with Open Regeneration of Solution, *Applied Solar Energy*, **5**(4):69--72, 1969.
- 27 A. Kakabaev, O. Klyshchaeva, and A. Khandurdyev, Refrigeration Capacity of an Absorption Solar Refrigeration Plant with Flat Glazed Solution Regenerator. *Applied Solar Energy*, 8(2):90--95, 1972.
- 28 A. Kakabaev, O. Klyshchaeva, and A. Khandurdyev, Refrigeration Capacity of an Absorption Solar Refrigeration Plant with Flat Glazed Solution Regenerator, *Geliotekhnika*, 8:60--67, 1972.
- 29 A. Kakabaev, O. Klyshchaeva, O. Tuiliev, and A. Khandurdyev, Experimental Study of Thermotechnical Characteristics of Glazed, Solution Regenerator, *Geliotekhnika*, 14:42--45, 1978.
- 30 P. Gandhidasan, V. Sriramuhu, and M.C. Gupta, Buoyancy Effects in a Solar Regenerator, *Solar Energy*, **22**:9--14, 1979.
- 31 S. Peng and J.R. Howell, The Performance of Various Types of Regenerators for Liquid Desiccants, *Trans. ASME, Journel of Solar Energy Engineering*, **106**:133--141, 1984.
- 32 K.S. Novak, B.D. Wood, and D.J. Nelson, Experimentally Determined Correlations for SolarCollector/Regenerator Heat and Mass Transfer, paper No. 85-WA/Sol-7, ASME, 1985.
- 33 K.S. Novak and B.D. Wood, Solar Collector/Regenerator Performance Based on Experimental Heat and Mass Transfer Correlations, In *Intersol 85, Montreal, ISES Congress*, S.669--673, Int.Solar Energy Soc., Pergamon Press, 1985.
- 34 D.J. Nelson and B.D. Wood, Evaporation Rate Model for a Natural Convection Glazed Collector/Regenerator, Trans. ASME, Journal of Solar Energy Engineering, 112:51--57, 1989.
- 35 B.D. Wood and Chen L.T. Performance Characteristics of Open-Flow Liquid Desiccant Solar Collector/Regenerator for Solar Cooling Applications, Part I. Final Report for DOE Contract, DE-AC03-82SF11691 N001, Arizona State University, 1983.
- 36 B.D. Wood, D.A. Siebe, M.A. Applebaum, K.S. Novak, and L.M. Ballew, Performance Characteristics of Open-Flow Liquid Desiccant Solar Collector/Regenerator for Solar Cooling Applications,

Part II. Final Report for DOE Contract, DE-AC03-82SF11691 N001, Arizona State University, 1983.

- 37 B.D. Wood, K.S. Novak, and Nelson D.J., Open Cycle Absorption Cooling, Part I. Final Report for DOE Contract, DE-AC03-84SF12223, Arizona State University, 1986.
- 38 B.D. Wood, Nelson D.J. and R.K. Collier, Open Cycle Absorption Cooling, Part II., Final Report for DOE Contract, DE-AC03-84SF12223, Arizona State University, 1986.
- 39 B.D. Wood, D.A. Siebe, and R.K. Collier, Open Cycle Absorption Cooling, Part III., Final Report for DOE Contract, DE-AC03-84SF12223, Arizona State University, 1986.
- 40 D.I. Stevens, J.E. Braun, and S.A. Klein, An Effectiveness Model of Liquid-Desiccant System Heat/Mass Exchangers, *Solar Energy*, **42**(6):449--455, 1989.
- 41 G.C. So'Brien and S. Satcunanathan, Performance of a Novel Liquid Desiccant Dehumidifier/Regenerator System, *Transact. ASME, Journal of Solar Energy Engineering*, **111**:345--352, Nov. 1989.
- 42 R. Yang and W.J. Yan, Simulation Study for an Open Cycle Absorption Solar Cooling System Operated in Humid Area, In *Clean and Safe Energy Forever*, *ISES Congress*, *Kobe*, S.885--889, Int. Solar Energy Soc., Pergamon Press, 1989.
- 43 K.H. Choi and K. Kimura, Experiments of a Dryness Storage Tank in a Solar Heated Dehumidification/Drying System of Open Cycle Absorption Type, In *Clean and Safe Energy Forever, ISES Congress, Kobe*, S.860--864, Pergamon Press, 1989.
- 44 N. Khelifa and R. Sizmann, Combined Open Air Loop Refrigeration and Air Conditioning by Low Temperature Solar Process Heat, In *Clean and Safe Energy Forever, ISES Congress, Kobe*, S.816--820, Int. Solar Energy Soc., Pergamon Press, 1989.
- 45 N. Khelifa, E. Lävemann, T. Milasinovic und R. Sizmann, Raumklimatisierung im offenen Umlauf mit Niedertemperaturwärme, In 7. Int. Sonnenforum, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, Frankfurt, S.712--717, 1990.
- 46 E.Lävemann, W. Keßling, B. Röhle, C. Kink, Klimatisierung über Sorption, Endbericht zur Phase I des Forschungsvorhabens 032 9151 B des BMBF, 1993.
- 47 ASR, Simulationsprogramm f
  ür Sorptionsentfeuchter mit fl
  üssigen Absorbentien, 1995 ZAE Bayern, Abt. 4
- 48 Hofmann und Rüdorff, Anorganische Chemie, Vieweg Verlag, 21. Auflage, 1973.
- 49 C. Kink, Vermessung der Isosterenfelder von Absorbentien, *Diplomarbeit* Ludwig Maximilians Universität München, 1991.
- 50 W. Spirkl, DataP ASCII Data Processor, Insitu Scientific Software Vers. 2.6b, 1996.
- 51 G. Hartbauer, Analysen des Wärme- und Stoffaustausches in einem Sorptionsreaktor mit flüssigem Sorbens, *Diplomarbeit* Technische Universität München, 1994.
- 52 H. Bettin F. Spieweck, Die Dichte des Wassers als Funktion der Temperatur nach Einführung der Internationalen Temperaturskala von 1990, PTB-Mitt. 100 (1990), S. 195-196 zitiert nach Bedienerhandbuch zu DMA 38, Firma A. Paar

# 15 Anhang

Tabelle 14. Test volt vitesell und Gewebell, versuchsergebilisse (vergi. ikapiter 2.	Tabelle 14:	Test von Vliesen und Gewei	ben, Versuchsergebnisse	(vergl. Kapitel 9.
--	-------------	----------------------------	-------------------------	--------------------

Firma	Vlies-Typ	Material	Binder	Note	Note	Note	Flächen	Dicł
				H2O	LiCI	Klim	gewicht [g/m2]	[mn
Dingo	Poniorfobrik Cro		fold/Edor					
Dilizei	1380	2		2	6	6	2	2
	1341_V/H166	2	Vlies	6			:	2
]	1410_\/H166	2	Vlies	6			2	2
	890/H	2	Vlies	6			2	2
		•					•	•
Bückn	ann GmhH: 4123	8 Mönchengladbach						
Buonan	8001	PP	Gewebe	4	4	6	490	1
	8001-K	PP	Gewebe	4	6	6	510	0.9
	8002	PP	Gewebe	5	4	6	500	0.(
	8002-K	PP	Gewebe	4	6	6	525	0.9
	5211-K	PP	Gewebe	4	3	6	560	0,1
	6016-K	PP	Gewebe	4	6	6	600	0.9;
	8802	IPP III III III III III III III III III	Gewebe	5	6	6	520	0.9
	8802-K	PP	Gewebe	5	6	6	525	0,9!
	9F/824	PAN	Gewebe	1	1	2	245	0,44
	9F/824/K	PAN	Gewebe	2	1	2	245	0,3
	28F/1210	PAN	Gewebe	1	1	2	136	0,1
	29F/1211	PAN	Gewebe	1	1	2	150	0,:
	2F/131	Nylon	Gewebe	1	2	2	120	0,26
	2F/186	Nylon	Gewebe	2	6	6	123	0,2'
	2F/1273	Nylon	Gewebe	4	6	6	120	0,28
	2F/946	Nylon/PES	Gewebe	4	6	6	128	0,2€
	3K	Nylon** (Plansichter Mans	Gewebe	3	3	6	125	0,1
	4F	Nylon	Gewebe	2	6	6	72	0,12
	6F	Nylon	Gewebe	2	6	6	87	0,17
	7F/822	Nylon	Gewebe	1	1	3	222	0,:
	15F/864	Nylon	Gewebe	1	2	6	300	0
	18 <b>F/8</b> 86	Nylon	Gewebe	1	?	6	79	0,1
	21F/898	Nylon	Gewebe	1	1	3	420	0,71
	32F/1270	Nylon	Gewebe	3	6	6	85	0,1
1	T-712	Nylon	Gewebe	3	6	6	65	0,1
1	1001	Nylon	Gewebe	1	1	6	370	0,68
	4802	Nylon	Gewebe	1	3	6	102	0,13
	PA/CF9754	PA/Carbon	Gewebe	3	6	6	168	0,27
	3710	Nylon** (Plansichter Mans	Gewebe	2	6	6	262	0,7
	19F/890	Nomex	Gewebe	4	6	6	135	0,21
	20F/891	Nomex	Gewebe	3	6	6	178	0,24
[	30F1213	Nomex	Gewebe	4	6	6	115	0,2
ł	U887W-300	PVK	Gewebe	6			310	0,48
	U926K-70	PVK	Gewebe	6			560	0,58
	3900-115		Gewebe	6			500	0,7
ł	3901K-80	LX	Gewebe	6			545	<u>    0,</u> £

e.

Firma Vlies-Typ	Material	Binder	Note	Note	Note	Flächen	Dicke
						gewicht	
			H2O	LiCI	Klim	[g/m2]	[mm]
3902W-63	LX	Gewebe	6			435	0.54
3903SK-60	LX	Gewebe	6			545	0,56
3904K-39	LX	Gewebe	6			430	0,37
3905SK-27	LX	Gewebe	6			420	0,35
3909W-65	PVDF	Gewebe	6			535	0,53
3910K-40	PVDF	Gewebe	6			500	0,44
PFK-2000	PFK (Hostaflon)	Gewebe	6			375	1,13
PFK-1800	PFK (Hostaflon)	Gewebe	6			375	1,13
PFK-1000	PFK (Hostaflon)	Gewebe	6			480	1
PFK-850	PFK (Hostafion)	Gewebe	6			180	0,505
PFK-710	PFK (Hostaflon)	Gewebe	6			205	0,505
PFK-590	PFK (Hostaflon)	Gewebe	6			240	0,485
FEP-590	FEP	Gewebe	6			330	0,555
PFK-500	PFK (Hostaflon)	Gewebe	6			270	0,5
PFK-420	PFK (Hostaflon)	Gewebe	6			260	0,45
PFK-300	PFK (Hostaflon)	Gewebe	6			230	0,385
COP-250	COP (Aflon)	Gewebe	6			165	0,29
COP-210	COP (Aflon)	Gewebe	6			88	0,2
COP-180	COP (Aflon)	Gewebe	6			100	0,2
COP-150	COP (Aflon)	Gewebe	6			110	0,2
COP-130	COP (Aflon)	Gewebe	6			110	0,17
COP-120	COP (Aflon)	Gewebe	6			113	0,17
COP-105	COP (Aflon)	Gewebe	6			115	0,175
COP-85	COP (Aflon)	Gewebe	6			135	0,195
COP-70	COP (Aflon)	Gewebe	6			135	0,2
COP-52	COP (Aflon)	Gewebe	6			96	0,125
<b>BWFTextil GmbH &amp; Co</b>	. KG; 89362 Offingen						
TAN 1212	PP 354	Vlies	6			?	~1,8
TAN 2437	PP/PE 354	Vlies	6			?	~0,9
Corovin GmbH; 31201	Peine						
Corosoft plus H	PP?	Vlies	6			17	?
Corosoft plus	PP?	Vlies	6			17	?
	· · ···						
Freudenberg; 69465 W	einheim						
FO 2401	UP	thermisch	6			60	0,15
FO 2403	UP	thermisch	6			100	0,23
FO 2406	UP	thermisch	5	6	6	180	0,26
FO 2407	UP/mit Polyäthylenhaftma	thermisch	6			205	0,37
FO 2430	Polyolefin	thermisch	6			100	0,23
FO 2431	Polyolefin	thermisch	6			60	0,14
C 1917	IUP	thermisch	6			100	0.58

Firma	Vlies-Typ	Material	Binder	Note	Note	Note	Flächen	Dicl
		1					gewicht	
	}			H2O	LiCI	Klim	[g/m2]	[mn
	FFM 2688	überwiegend zellulosisch	chemisch	6			120	(
Î.	FS 2130	(PES)	Vlies	6			160	(
	FS 2131	(PES)	Vlies	6			155	0,
	FFK 2652	überwiegend Zellulose	Kunstharz	6			17	?
•	FFK 2654	überwiegend Zellulose	Kunstharz	5	6	6	35	?
i	FFK 2663	überwiegend Polyester	Kunstharz	6			37	?
	FFK 2666	überwiegend Polyester	Kunstharz	4	6	6	60	?
1	FFK 7250	Polyester	Spinnvlies	6			50	?
	FFK H 7210	Polyester	Spinnvlies	6			100	?
	FE 2503	Polyester	thermisch	3	6	6	100	0,
	FE 2510	überwiegend Viskose	synthetischer Kautschu	3	6	6	230	
	FE 2511	überwiegend PA	synthetischer Kautschu	1	2	2	400	1
	FE 2513	Polyester	genadelt	6			300	
	FE 2525	Polyester	genadelt	1	2	2	300	
1	FE 2545	PP	thermisch	6			280	(
	FE 2570	Viskose	synthetischer Kautschu	4	6	6	30	0,
	T 1710	CV	Acrylat styrolunlöslich	1	2	6	45	0,
	T 1702	(PES)	thermisch styrolunlöslig	2	6	6	24	0,
	T 1704	(PES)	thermisch styrolunlöslig	2	1	6	40	0,
	T 1706	(PES)	thermisch styrolunlöslic	6			25	<u>0,</u>
	T 1707	(PES)	thermisch styrolunlöslig	6			60	0,
1	T 1709	(PES)	thermisch styrolunlöslig	2	6	6	70	0,
	T 1730	(PES)	mechanisch styrolunlö:	6			40	0,
1	Т 1744	(PAC) PolyacryInitril	Acrylat styrolunlöslich	6			40	
	T 1745	(PAC) PolyacryInitril	Acrylat styrolunlöslich	5	6	6	35	0,
	T 1748	(PES)	Acrylat styrolunlöslich	5	6	6	18	(
	T 1772	(PAC) PolyacryInitril	Acrylat styrolunlöslich	6			21	0,
	T 17 <b>7</b> 3	(PAC) PolyacryInitril	Acrylat styrollöslich	6			22	0,
	T 1775	E-Glas	Acrylat styrollöslich	6			30	(
	Т 1776	C-Glas	Acrylat styrolunlöslich	6			45	0,
	T 1777	C-Glas	Acrylat styrollöslich	6			30	(
	T 1778	C-Glas	Acrylat styrolunlöslich	6			20	0,
	T 1779	C-Glas	Acrylat styrolunlöslich	6			50	(
	T 1780	(PES)	Acrylat styrolunlöslich	6			27	0,
	T 1782	C-Glas	Acrylat styrolunlöslich	6			22	0,
1	Т 1786	E-Glas	Acrylat styrolunlöslich	6			50	(
1	T 1788	C-Glas	Acrylat styrollöslich	6			19	0,
	T 1790	ECR-Glas	Acrylat styrollöslich	6			30	0,
	T 1791	ECR-Glas	Acrylat styrolunlöslich	6			30	0,
	TAT 2789	PAN	Vlies	3	6	6	?	~0,4
	FS 2114	PA	Vlies	2	6	6	110	0,
	FS 2116	PA	Vlies	2	6	6	65	0,
	FS 2145 WI	PA	Vlies	1	6	6	80	0,

Firma	Vlies-Typ	Material	Binder	Note	Note	Note	Flächen	Dicke
							gewicht	
				H2O	LiCl	Klim	[g/m2]	[mm]
	FS 2182	Polyvinylalcohole	Vlies	2	4	2	55	0,2
	FS 2183	Polyvinylalcohole	Vlies	1	6	6	70	0,35
	FS 2217	PA	Vlies	2	6	6	70	0,35
	FS 2267	PA	Vlies	5	6	6	72	0,25
	FS 2527	PA	Vlies	2	6	6	70	0,27
	FO 2450/025 V 87	PP/PE	thermisch	6			89	0,65
	FO 5120	(PES)	thermisch	1	6	6	125	0,54
	FO 5121	(PES)	thermisch	1	6	6	116	0,74
	FFK 2653	Zellulose	Vlies	6			25	?
	FFK 2662	Polyester	Vlies	6			25	?
	FFK 2664	Polyester	Vlies	6			50	?
	FFK 7270	Polyester	Vlies	6			70	?
	FFM 2614	Synthesefasem	thermisch	6			65	0,22
	FFM 2640	Polyester	thermisch	5	6	6	100	0,23
	FFM 2641	Polvester	chemisch	1	6	6	150	0,6
	FFM 2681a	Zellulose überwiegend	Kunstharz-Polymer	3	6	6	30	0,25
	FFM 2681b	Zellulose überwiegend	Kunstharz-Polymer	3	6	6	30	0,25
	FFM 2684	überwiegend synthetisch	chemisch	6			60	0,44
	FFM 2685	zellulosisch und synthetise	chemisch	6			55	0,4
	FFM 2686	zellulosisch und synthetise	chemisch	6			- 75	0,45
	FFM 2692	zellulosisch und synthetise	chemisch	6			130	0,7
	FFM 2697	zellulosisch und synthetise	chemisch	6			85	0,5
	FFL 2545	Polyolefin	thermisch	6			280	0,8
Gizeh	Spuntec							
	keine Vliesproben	erhalten						
Cleafe	oor Doorohurry	Ombili 02055 Degeneburg						
Giasia	Ser Regensburg	Sindh; 93055 Regensburg		E		6	50	2
	GH 50.502		Viles	0	0	6	50	?
	GH 60.502		Viles	0 C			120	?
	GH 120.302	E/C Glas	Viles	0			120	?
		E/C Glas	VIIES	0			50	:
	GH30.PE 23 N	E /C Glas/PE Deschichlun	VIIES	0				?
Imaga	Finwognroduldo	Cmbl + Co + 62764 Höck	ach					
Ineco	Verbandetuch			6			30	0.31
L	Verbanustuch		VIIC5					0,01
Kahne	s & Co.: 66864 Ki	use						
	DT-PES-ML	PES/PP	Vlies	6			140	0.8
	DT B C F orange	PP/PES/Viskose	Vlies	4	6	6	130	1.1
<u>}</u>			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		<u> </u>			ليتسمعهم
Lantor	GmbH; 63808 Ha	libach						

Ś

ч ,

•

Firma	Vlies-Typ	Material	Binder	Note H2O	Note LiCl	Note Klim	Flächen gewicht [g/m2]	Dick [mn
	387279	PP Spinnvlies	thermisch gebunden	6			40	0,:
	381013	PES/PP	mechanisch	6			63	0
	SB 540 F	Spinnvlies 100% Polyeste	thermisch gebunden	6			55	0,:
	SB 630	Spinnvlies PES	thermisch gebunden	6			30	Ō
	385014	PES	mechanisch	3	6	6	150	1,0

Lohmann GmbH; 5651	3 Neuwied						
RK 20	Polyester	thermisch	4	6	6	20	0,1
RK 30	Polyester	thermisch	6			30	0,1
RK 40	Polyester	thermisch	6			40	0,1
RK 50	Polyester	thermisch	6			50	0,1
RK 60	Polyester	thermisch	6			60	0
RK 70	Polyester	thermisch	6			70	0,3
RT 70	Polyester	thermisch	6			70	0,2
RK 20 + G	Polyester	thermisch	6			40	0
RK 30 + G	Polyester	thermisch	6			50	0,3
RK 50 + G	Polyester	thermisch	6			70	0,3
N 260/150	Polyester	vernadelt	6			150	1,9
N 334/150	Polyester	vernadelt	6			150	
N 051/100	Zellwolle/Viskose	vernadelt	1	1	1	100	1,6
N 352/80	Polyester	vernadelt	6			80	0
N 260/140	Polyester	vernadelt	6			180	1,3
S 130 BE soft	Polyester mit Austattung	vernadelt	2	6	6	?	?

Naue Fasertechnik; Gm	bH & Co. KC	; 32312 Lübbec	ke				
Secutex 151-1	PP	Vli	es	6		150	2
Secutex 151 R	PES	Vli	es	6		150	1

Nowotex				
noch keine Vliesp	roben			

Polo Filter; 28211 E	Bremen			1		
Polo 280	?	Vlies	6		?	?
Polo 290	?	Vlies	6		?	?
Polo 310	?	Vlies	6		?	?

							AND ALL DRAWN
Polyvlies F. Beyer G	6mbH & Co. KG; 44	46 Hörstel-Bevergern					
sw1-PES/060/	100 PES	Vlies	6			100	?
sw2-PES/O	PES	Vlies	1	6	6	150	~ 1,2
PES/0/73/017	0 PES	Vlies	6			170	?
PES/0/60/130	PES	Vlies	6			130	?
PES/0/73/010	0 PES	Vlies	3	6	6	100	?

Firma Vlies	-Тур М	aterial Binde	· Note	Note	Note	Flächen	Dicke
						gewicht	
			H2O	LiCl	Klim	[g/m2]	[mm]

	1111 1 1 4 1 11 14				· · ·		
Reinmann Spinnerei un	ia Weberei GmbH; 482	282 Emsdetten	· · · · ·		<u> </u>		
Nr. 19	PES	Vlies	6			100	0,73
Royalin GmbH; 79725 L	aufenburg						
B 16/50	Zellwolle/Zellstoff	Vlies				50	0,29
G 6/60	Polyester	Binder	1	6	6	60	0,56
G 5/100	Polyester	Binder	2	6	6	100	0,76
G 39/120	Polyester	Binder	1	5	6	120	0,83
G 38/145	Polyester	Binder	1	6	6	145	0,73
G 34/180	Polyester	Binder	4	6	6	180	1
H 5/50	Acryl/Zellulose	Binder	6			50	0,34
PG 4/75 CLF	PA/PES/Zellulose	Binder	6			75	0,4
		•					
Scherf GmbH; 63714 As	schaffenburg		·				
V24 050 K1	Viskose	Vlies	1	1	1	100	~ 1,0
V31 050	Viskose	Vlies	4			50	?
PPK 150 K1 grau	PP	Vlies	6			150	?
Stoff-Markt; 81667 Mün	chen						
Oker	Polyester	Gewebe	6			?	?
ToxicNeon	Polyester/Polyamid	Gewebe	6			?	?
Lila	Polyamid	Gewebe	2	1	1	?	~ 0,3
SM 1	Polyester	Gewebe	5	6	6	?	?
SM 2	Polyester	Gewebe	2	6	6	?	?
SM 3	Polyester	Gewebe	2	6	6	?	?
	4						
Sulzer Chemtech AG; 8	0687 München						
Gewebepackung	PP/PAN	3D-Gewebe	1	1	2	?	?
		•					
Textilwerke Emsdetten:	48272 Emsdetten						
1507	PES/PP	Vlies	6			110	~ 0.7
1500	Viskose/PES/PP	Vlies	1	1	1	120	~ 1.1
1510	PES	Vlies	6			120	~ 0,7
L	I	<u>1</u>	L			<u> </u>	<u> </u>
Vilesco GmbH: 63801 K	leinostheim	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					1
5025	Polvester	Vlies	6		-	?	?
5040	Polvester	Vlies	6			?	?
5070	Polvester	Vlies	6			?	?

89

.

,. .

. .