Entwicklung, Bau, Optimierung und Feldtest einer neuartigen solarthermischen Meerwasserentsalzungsanlage mit mehrstufiger Wärmerückgewinnung (AQUASOL)

Förderkennzeichen: 02WT0605 02WT0606

Zuwendungsempfänger: Ingenieurbüro für Energie und Umwelttechnik (IBEU) Prof. Dr. Klemens Schwarzer Tuchbleiche 12 52428 Jülich

Solar-Institut Jülich (SIJ) Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt Fachhochschule Aachen, Campus Jülich Heinrich-Mußmann-Str. 5 52428 Jülich

Kooperationspartner:

Ingenieurbüro für Energie- und Umwelttechnik (IBEU) Fh-Aachen, Solar-Institut Jülich (SIJ) Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN), Brasilien The Energy and Resources Institute (TERI), Indien Thames Water, Great Britian Instituto Tecnologico de Canarias (ITC)

Autoren:

Prof. Dr. Klemens Schwarzer Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt Dipl. Ing. Tarik Schwarzer Dr. Ing. Christoph Müller

Laufzeit:

01.04.2005 - 28.02.2011 (einschl. Verlängerung)

"Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde aus den Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 02WT0605 und 02WT0606 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor"

Teile des Berichtes sind Inhalt einer im Rahmen des Projektes durchgeführten Promotion bzw. eines noch nicht abgeschlossenen Promotionsverfahrens.

Ι.	Kurze I	DARSTELLUNG ZUM PROJEKT "AQUASOL"	8
	1.	Einführung	8
	2.	Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	9
	3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	9
	4.0	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	. 10
	4.1	Solarthermische Kleinanlagen	.11
	4.1.1	Solardestillen (SS)	.11
	4.1.2	Solardestillen in Großformat (Water Pyramid)	. 12
	4.1.3	Feuchtluftdestillation (MEH)	. 13
	4.1.4	Membrandestillation (MD)	. 13
	4.1.5	Mehrstufendestillationsanlage (MSD)	14
	5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
11.	Einherg	EHENDE DARSTELLUNG ZUM PROJEKT AQUASOL	17
	1.	Erzielte Ergebnisse	. 17
	1.1	Solarthermische Entsalzungsanlage mit mehrstufiger	
		Wärmerückgewinnung Mehrstufendestille (MSD)	.17
	AP.1	Anlagenbau und Durchführung von Feldtests /Labortests	. 19
	1.	Grundlagenexperimente zur Destillation	. 19
	2.	Die Experimentaldestille für Edelstahlkondensatorflächen	. 20
	2.1	Versuchsdurchführung	. 21
	2.2	Rücktropfverluste	. 23
	2.2.1	Physikalische Grundlagen	. 23
	2.2.2	Bestimmung über die Winkelabhängigkeit	. 25
	2.3	Einfluss der Rücktropfverluste auf den GOR-Wert	. 28
	2.3.1	Kennzahlen zur Beschreibung der Wärmerückgewinnung	. 28
	2.3.2	Zusammenhang Produktionsrate und Rücktropfverluste	. 28
	3.	Anlagenbau und Durchführung von Feldtests / Labortests	. 30
	3.1	Kollektorwirkungsgrad Flachkollektor – Vakuumröhren	. 33
	3.2	Temperaturverläufe in der Anlage (Edelstahlanlage)	. 35 2

3.3	Produktionsrate (Edelstahlanlage)	36
3.4	Destillatproduktion in Abhängigkeit von der Einstrahlung	40
3.5	Einfluss der Salzkonzentration auf die Produktionsrate	41
3.6	Optimierungsschritte bei den Anlagen mit Edelstahlkondensatorflächen	43
3.7	Untersuchungen der Trinkwasserqualität im Langzeitbetrieb plus	
	Dekontaminationsuntersuchungen	45
3.8	Übertragung der Ergebnisse auf größere Anlagen	48
AP 2.:	Stufenweise Untersuchungen zur Wärmerückgewinnung durch Rückspeisung	5
	der Wärme aus dem Kondensat oder der Sole	49
AP 3.:	Instationäre Wärmerückgewinnung mit Hilfe der gesammelten Wärme-	
	kapazität aus Sole und Kondensat für den Nachtbetrieb	51
AP 4.:	Reduzierung der Herstellungskosten durch optimales Design und moderne	
	Produktionstechnik	51
AP. 5:	Untersuchung der Trinkwasserqualität im Langzeitbetrieb plus	
	Dekontaminationsuntersuchungen	53
AP. 6:	Feldtest Indien: 2 Anlagen (Edelstahlvariante); Dekontamination von mit	
	Fluoriden belastetem Grundwasser in Zusammenarbeit mit dem indischen	
	Partner "The Energy and Resources Institute" (TERI) Indien	53
Zusamn	nenfassung folgender Arbeitspunkte AP.7, AP.8, und AP.9:	57
AP. 7:	Materialuntersuchungen: Hydrophile Folien; Mikrostrukturierte	
	Kapillarfolien;	57
AP. 8:	Bau von 2 mehrstufigen Kapillarstufenanlagen	57
AP. 9:	Untersuchung der Destillatproduktion an Foliensystemen in Abhängigkeit de	r
	Stufenzahl (elektrisch)- Möglicher Betrieb als Hybridsystem	57
AP.10: 1	Feldversuche in Brasilien	70
	1. Feldtest in Brasilien	70
	2. Feldversuch mit Ganzwandsystemen in Brasilien	73
AP. 11:	Weiterentwicklung eines Simulationsprogramms	76
	Erstellung eines Wärmeübertragungsmodells	80
AP. 12:	Aufbau einer Verwertungsstrategie –Edelstahl- Folienversion	81
AP. 13: Workshop		
Fazit und Ausblick		

BEU

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Funktionsprinzip der einfachen Solardestille	11
Abbildung 2: Funktionsprinzip der Wasserpyramide (Quelle Aq-Aero Watersystems BV).	12
Abbildung 3: Schema einer solaren Feuchtluftdestillationsanlage	13
Abbildung 4: Schema einer MD-Destillationsanlage (Fraunhofer ISE)	14
Abbildung 5: Funktionsweise der Mehrstufendestille (MSD)	15
Abbildung 6: Mehrstufendestille mit Wärmerückgewinnung	18
Abbildung 7: Schema der Destillationskammer zur Grundlagenuntersuchung	20
Abbildung 8: Destillatproduktion, Grundtemperatur und Temperaturdifferenz	
über die Zeit	21
Abbildung 9: 3D-Kennfeld: 17° Neigungswinkel, 14 cm Abstand, Süßwasser	22
Abbildung 10: 2-D Kennfeld: 17° Neigungswinkel, 14 cm Abstand, Süßwasser, Edelstah	l22
Abbildung 11: Benetzungsformen	24
Abbildung 12: Destillatausbeute in Abhängigkeit von der Produktionsrate	26
Abbildung 13: Destillatausbeute in Abhängigkeit vom Neigungswinkel	27
Abbildung 14: Destillatausbeute in Abhängigkeit vom Neigungswinkel	27
Abbildung 15: Destillatausbeute in Abhängigkeit vom Neigungswinkel	29
Abbildung 16: Entsalzungssysteme beim Feldtest auf Gran Canaria (ITC)	30
Abbildung 17: Entsalzungsbereich mit Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren	31
Abbildung 18: Innenaufbau der Systeme beim Feldtest (System1 mit Speicher)	31
Abbildung 19: Homepage mit Anlagenschema und Messgrößen	32
Abbildung 20: Vergleich Wirkungsgrad Flachkollektor- Vakuumröhrenkollektor	33
Abbildung 21: Vakuumröhre mit Füllrohr	34
Abbildung 22: Integration der Vakuumröhre	34
Abbildung 23: Wirkungsgradkennlinie des Gey- Vakuumröhrenkollektors	35
Abbildung 24: Verdampfertemperaturen Entsalzungssysteme	36
Abbildung 25: Destillatproduktion der Systeme 1, 2, 3 und 4 (Edelstahlflächen)	37
Abbildung 26: Spezifische Produktion der Entsalzungssysteme	38
Abbildung 27: Tatsächliche und berechnete Kollektorfläche Vakuumröhren	39
Abbildung 28: Abhängigkeit Destillatproduktion- Einstrahlung System 1, 2 und 4	40
Abbildung 29: Abhängigkeit Destillatproduktion- Einstrahlung System 1 und 2	41
Abbildung 30: Laboruntersuchung zum Einfluss des Salzgehaltes auf die	
Destillatproduktion	42
Abbildung 31: Siedepunkterhöhung in Abhängigkeit vom Salzgehalt wässriger Lösunger	า .43
Abbildung 32: Neue Zulaufkonstruktion Meerwasser	44
Abbildung 33: Rostbildung an Außenabdeckung	45

Abbildung 34:	Rostbildung in den Stufen	45
Abbildung 36	Versuchsdestille (PLI-Schaumprofilvarinate $2m^2$)	4 0 49
Abbildung 37	Abhängigkeit GOR-Wert von Heizleistung und verschiedenen	
	Zulauftemperaturen (Edelstahlvariante)	49
Abbildung 38 [.]	Destillatproduktion in Abhängigkeit von der Heizleistung für verschieden	10
Abbildung 39:	Ausschnitt aus dem Schaumprofilrahmen der MSD-Anlage	
Abbildung 40:	Vergleich von alter und neuer Kondensationsfläche (schematisch)	52
Abbildung 41:	Wasserkontamination im indischen Bundesstaat Karnataka	53
Abbildung 42:	Gesundheitliche Beeinträchtigung durch kontaminiertes Grundwasser	54
Abbildung 43:	Entsalzungssystem zur Trinkwassergewinnung aus mit Fluoriden belastete	em
	Grundwasser im Dorf Nidasesi, Südindien	54
Abbildung 44:	Mehrstufendestille mit Erläuterungshinweisen	55
Abbildung 45:	Prinzip der Anlage mit Ganzrahmenprofilen	58
Abbildung 46:	Versuchsanordnung mit Kapillarfolien und Kunststoffrahmen	59
Abbildung 47:	Versuchsanlage mit Kunststoffschaumprofil und kapillarstrukturierten	
	Kondensationsflächen	59
Abbildung 48:	MSD- Anlage – 2m² Verdampfergrundfläche	61
Abbildung 49:	Destillatstundenproduktion mit Gitter und zwei Folien	61
Abbildung 50:	Nachtproduktion der einzelnen Stufen mit Gitteraufbau	63
Abbildung 51:	Stunden - / Nachtproduktion verschiedener Modifikationen im Vergleich	64
Abbildung 52:	Spez. Kondensationsraten für Edelstahlblech	66
Abbildung 53:	Spez. Kondensationsraten für nanobeschichtetes Edelstahlblech	67
Abbildung 54:	Spez. Kondensationsrate für Folien/ Streckgittervariante	67
Abbildung 55:	Destillatproduktion einer 6- stufigen Anlage	69
Abbildung 56:	Stufenwirkungsgrad, Produktion und Stufentemperatur der MSD- Anlage	69
Abbildung 57:	Standort der Entsalzungsanlage in Fortaleza, Brasilien	71
Abbildung 58:	Kompletter Aufbau der vier Entsalzungsanlagen (1. Feldtest)	71
Abbildung 59:	Innenaufbau der Ganzwandvariante	74
Abbildung 60:	Anlagen in Fortaleza (Ganzwandsysteme)	75
Abbildung 61:	Temperaturverlauf im Entsalzungssystem (7 Stufen)	75
Abbildung 62:	Kondensationsrate als Funktion der Einstrahlung	76
Abbildung 63:	Thermodynamisches Modell einer Stufe in MATLAB/SIMULINK	77
Abbildung 64:	7-stufiges System	78
Abbildung 65:	Gemessene und simulierte Temperaturen im Vergleich	79
Abbildung 66:	Gemessene und simulierte Stufenproduktion im Vergleich	80
Abbildung 67:	Weepeetend IV World Weter Forum 2006 Mexike City	۲۵ دە
	Conference Decelipation and Depowerla Energies in Tulich	ø∠
		o∠ 5

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Spezifische Kondensationsraten4	10
Tabelle 2:	Chemisch – physikalischen Analyseergebnisse Destillat, Sole und Meerwasser 4	6
Tabelle 3:	Mikrobiologische Analyseergebnisse Destillat, Sole und Meerwasser4	16
Tabelle 4:	Wasseranalyseergebnisse zum Abschluss des Feldtestes Oktober 20064	ł7
Tabelle 5:	Wasseranalyse: "Visit report (Testing of Water Quality and to rectify the	
	feeding mechanism of Solar Still) on Nidasesi village (15th - 16th June 2007)"5	56
Tabelle 6:	Meßergebnisse der PU-Rahmendestille	30
Tabelle 7:	Vergleich der Spez. Kondensationsraten für verschiedene Kondensations-	
	flächen bei verschiedenen Kondensationswinkeln6	38
Tabelle 8:	Auswertungsdaten Test mit Salzwasser vom 25.01.20087	'2
Tabelle 9:	Mikrobiologische Untersuchung7	73
Tabelle 10	: Physikalisch- chemische Analyse7	'3

BEU

Abkürzungsverzeichnis

BW	Brackwasser
COP	Coefficient of Performance
ED	Elektrodialyse
FhG	Fraunhofer Gesellschaft
GOR	Gained Output Ratio (Wärmerückgewinnungsfaktor)
ISE	Institut für Solare Energisysteme
MD	Membrandestillation
MED	Multi Effect Distillation (Vielfache Effekt-Destillation)
MED-TVC	Multi Effect Distillation mit Thermal Vapour Compression
MEH	Multi Effect Humification (Feuchtluftdestillation)
MSD	Multi Stage Destillation (Mehrstufenverdampfung)
MSF	Multi Stage Flash (Vielfacheffekt-Entspannungsverdampfung)
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetraflourethylen
PV	Photovoltaik
RO	Reverse Osmosis (Umkehrosmose)
R&D	Research and Development
SS	Solar Stills (einfache solare Verdampfung in einer Destille)
SIJ	Solar-Institut Jülich
SW	Salzwasser
TDS	Total Dissolved Solids (Gesamtmenge gelöster Feststoffe)
VC	Vapour Compression (Dampfkompression)
ZAE	Zentrum für Angewandte Energieforschung

I. Kurze Darstellung zum Projekt "Aquasol"

1. Einführung

Die Trinkwasserversorgung, aber auch die Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen, stellt in vielen Küstenorten und ariden Gebieten der Erde ein zunehmendes Problem dar. Überbevölkerung, Tourismus, die zunehmende Industrialisierung und der Einsatz von Chemikalien in der Landwirtschaft bewirken, dass sich die Qualität des Süßwassers ständig verschlechtert. Die steigende Nachfrage nach der begrenzten Ressource sauberes Trinkwasser und Brauchwasser erhöht den Wasserpreis und führt jetzt schon zu politischen Spannungen zwischen verschiedenen Ländern. Unabhängig von einem notwendigen nachhaltigeren Umgang mit unseren natürlichen Trinkwasserguellen ist in vielen Regionen für die Trinkwasserversorgung der Menschen die Bereitstellung von Trinkwasser aus Meerwasser oder salzhaltigem Grundwasser unumgänglich. Angesichts dieser Wasserknappheit wurden zahlreiche Verfahren zur großtechnischen Meer- und Brackwasserentsalzung entwickelt. Wegen der hohen Investitions- und Betriebskosten und der oft nicht vorhandenen notwendigen Infrastruktur ist der Einsatz dieser großtechnischen Anlagen in vielen ländlichen Regionen der Erde, besonders für den dezentralen Einsatz in Entwicklungs- und Schwellenländern, nicht geeignet. Für diesen Anwendungsbereich besteht ein Bedarf an wartungsarmen, preisgünstigen und leistungsfähigen dezentralen Kleinanlagen. Mit Hilfe von kleinen thermischen Meerwasserentsalzungsanlagen kann in ariden Regionen die Trinkwasserversorgung von Siedlungen, Hotels, Farmen, Industrie usw. verbessert werden.

Neben der Trinkwassergewinnung aus Meer-, Brack- und salzhaltigem Grundwasser besteht ein großer Bedarf an Kleinanlagen für die Trinkwasserbereitung aus mit Fluor, Arsen und Blei kontaminierten Grundwässern. Besonders betroffene Länder sind zum Beispiel Indien, Nordbrasilien, Chile, Bangladesh, Mexiko, und Regionen in Nordafrika.

2. Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

IBEU und das Solar Institut Jülich arbeiten seit einigen Jahren im Bereich der thermischen Meerwasserentsalzung zusammen. Erste Untersuchungen in diesem Bereich im SIJ und die Erfahrungen aus anderen Projekten auf dem Gebiet der Solarthermie legten die Grundlage für eine Vertiefung bzw. Weiterführung der Forschung auf diesem Gebiet /1,2, 3,4, 5, 6, 7, 8/.

Die Thematik der Wasserversorgung, insbesondere die unzureichende Versorgung der Menschen in vielen Regionen der Erde mit sauberem Trinkwasser, führte zu der Erkenntnis der Notwendigkeit der weiteren Forschung und Entwicklung von solarthermischen Entsalzungsanlagen für den Globalen Markt.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines kleinen bis mittleren solarthermischen Entsalzungssystems nach dem **Mehrstufendestillationsverfahren (MSD-Anlage)** mit Wärmerückgewinnung zur Trinkwassergewinnung aus Meer- und Brackwasser. Das Entsalzungssystem soll kostengünstig, wartungsarm, energieautark und für den dezentralen Einsatz geeignet sein. Im Rahmen des Projektes soll das bisherige Entsalzungskonzept weiterentwickelt, optimiert und an Feldteststandorten so weit getestet werden, dass am Ende des Projektes ein marktfähiges erprobtes Produkt vorhanden ist.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

In dem Vorhaben soll untersucht werden, inwieweit mit geringen technischen Mitteln und Know- How eine wirtschaftliche Trinkwassergewinnung aus Meer- oder Brackwasser im kleinen Maßstab möglich ist. Dabei soll die mehrstufige Wärmerückgewinnung den Energieverbrauch soweit senken, dass auch eine solare Energieversorgung eine wirtschaftliche Alternative darstellt. Das System soll bei Umgebungsdruck arbeiten um den technischen Aufwand klein zu halten.

Um die mehrstufige Destillationsanlage energetisch optimieren zu können, müssen die Einflussgrößen beim Destillationsvorgang richtig verstanden und bewertet werden. Dazu werden die Einflussgrößen anhand von verschiedenen Modelldestillen experimentell untersucht. Zu den zu untersuchenden Einflussgrößen zählen die Kondensationsraten, die Rücktropfverluste und der Wärme und Stoffübergang. Untersuchungsparameter sind u.a. die Abhängigkeit vom Neigungswinkel, die Art der Kondensationsfläche und die

Temperaturverhältnisse. Eine Weitere wichtige Einflussgröße ist der Salzgehalt des Rohwassers.

Nach Erfassung bzw. Kenntnis der verschiedenen Auslegungsparameter sind entsprechende Solardestillen gebaut worden und in Feldversuchen in Jülich, in Spanien (Gran Canaria) /9/ und in Brasilien (Fortaleza) /10,17/ bei den beiden Kooperationspartnern vermessen worden. Danach erfolgte eine Optimierungsphase. Auf Wunsch des Kooperationspartners Thames Water wurde ein zusätzlicher Feldversuch zur Trinkwasseraufbereitung aus mit Fluor kontaminierten Grundwasser in Südindien zusammen mit dem Projektpartner "The Energy and Resources Institute" (TERI) durchgeführt.

Aufgrund der stark angestiegenen Edelstahlpreise und der Korrosionsanfälligkeit der Edelstahlwannen, sowie einer verbesserten Nutzerfreundlichkeit bei Aufbau, Wartung und Betrieb, wurden zusätzlich andere Kondensationsflächen in die Untersuchungen aufgenommen und als mögliche Anlagenvarianten in Labor und Feldtest erprobt und weiter optimiert. Bei den Kondensationsflächen handelt es sich um neuartige Flächen mit kapillarstrukturierten hydrophilen Oberflächen bzw. um oxydische hydrophile Oberflächen. Zusätzlich wurden Kunststoffrahmenprofile entwickelt, welche die Kondensationsflächen tragen und gleichzeitig die Isolierung der Entsalzungsanlage nach außen darstellen. Eine weitere Verbesserung stellten die am Ende des Projektes entwickelten Ganzwandprofile dar. Anlagen mit diesen Elementen wurden im zweiten Feldversuch in Brasilien eingesetzt. Diese Änderungen bzw. Ergänzungen im Arbeits- und Zeitplan erfolgten in enger Abstimmung mit den Projektpartnern und den Projektförderern.

4.0 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Derzeitige Entsalzungsanlagen werden zum Großteil mit fossiler Energie bzw. Strom aus dem Netz betrieben. Von dem weltweit entsalzten Trinkwasser werden nur etwa 0,02% regenerativ erzeugt. Steigende Öl- und Gaspreise werden jedoch in Zukunft einen höheren Kostendruck auf energieintensive Verfahren wie die Meerwasserentsalzung ausüben. Eine interessante Alternative bietet die Nutzung erneuerbarer Energien aus Sonne und Wind, da die Entsalzung meistens gerade dort benötigt wird, wo ausreichend Sonnenenergie zur Verfügung steht.

Großtechnische solarthermische Anlagen nach dem MSF- Verfahren (Multi Stage Flash) und MED- Verfahren (Multi Effect Distillation) sind bereits seit den 90 Jahren in Erprobung und Einsatz, solarthermische Kleinstanlagen für den dezentralen Markt jedoch kaum vorhanden.

4.1 Solarthermische Kleinanlagen

In verschiedenen Ländern (Spanien, Kuwait, Abu Dhabi, Mexiko, USA) sind Versuchsanlagen mit größeren Kollektorfeldern mit MSF- bzw. MED- Entsalzungsanlagen errichtet worden. Bei den Kollektoren handelte es sich um Parabolrinnen-, Vakuumröhrenund auch um Flachkollektoren. Einige Anlagen wurden auch mit Solar Ponds betrieben. Im Bereich kleiner solarthermischer Entsalzungsanlagen spielt die MSF und MED- Technik keine Rolle, da es sich bei den Kleinanlagen nur um Anlagen mit einer geringen (einige Liter/Tag bis einige Kubikmeter/Tag) handelt. In diesem Tagesproduktion Größenbereich arbeiten die meisten Anlagen nach dem Prinzip der Feuchtluftdestillation (Multi Effekt Humidification MEH), der Membrandestillation (MD), der Mehrstufendestillation (MSD) oder nach dem Prinzip der einfachen solaren Destille (Solar Still SS).

4.1.1 Solardestillen (SS)

Die einfachste und schon seit Ende des letzten Jahrhunderts genutzte solarthermische Entsalzungsanlage ist die einfache Solardestille (Solar Still), ein einfacher Behälter mit schwarzem Boden und Glasabdeckung, in dem das Meerwasser nach dem Gewächshaus-Prinzip verdunstet und an der Glasscheibenabdeckung wieder kondensiert (Abb.1).



Abbildung 1: Funktionsprinzip der einfachen Solardestille

Nachteile der einfachen Solardestillen sind ihre nur geringen Produktionsraten von etwa 2 bis 5 Liter /m² und Tag je nach Strahlungsangebot und die geringe Lebensdauer der Anlagen. Einfache Solardestillen sind auf Grund ihrer geringen Trinkwasserproduktion nicht

geeignet, größere Trinkwassermengen im Bereich von 500 Liter bis 5000 Liter/Tag bereitzustellen. Für diese Anlagen wären Kollektorflächen von 100 bis 1200 qm erforderlich. Die größte solare Meerwasserentsalzung nach dem Greenhouse-Prinzip wurde von 1877 vom Schweden C. Wilson gemeinsam mit einem chilenischen Team in Las Salinas (Chile) mit einer Fläche von 4.460 m² errichtet.

4.1.2 Solardestillen in Großformat (Water Pyramid)

Die Wasserpyramide (Water Pyramid) ist im Prinzip eine einfache Solardestille in einer größeren Ausführung (Abbildung 2). Sie besteht aus einer gespannten transparenten Folie in Pyramidenform. Das Salzwasser im Beckenbereich erwärmt sich durch die eintretenden Sonnenstrahlen und verdunstet. Das Kondensat wir an den Seiten abgeführt und kann als Trinkwasser mit entsprechender Nachbehandlung genutzt werden. Zusätzlich dient das Dach der Pyramide als Sammelfläche für Regenwasser, welches ebenfalls als Trinkwasser genutzt werden kann. Die Wasserpyramide hat eine Gesamtgrundfläche von 650m² und eine Produktion an Trinkwasser von ca. 1-1,2m³ pro Tag bei guter Einstrahlung. Die Wasserpyramide kommt u.a. in Afrika und Indien zum Einsatz.



Abbildung 2: Funktionsprinzip der Wasserpyramide (Quelle Aqua-Aero Watersystems BV)

4.1.3 Feuchtluftdestillation (MEH)

Ein weiterer Anlagentyp zur thermischen Entsalzung mit Wärmerückgewinnung arbeitet nach dem Feuchtluftprinzip und wurde u.a. vom ZAE Bayern /11/ und von der Universität Bochum entwickelt /12/. Dieses Verfahren ist auch als Multi Effect Humidification- Verfahren bekannt (MEH). Das zulaufende Salzwasser wird in dem Kondensator durch Aufnahme der Kondensationswärme des Destillates erwärmt. Danach wird das Rohwasser durch Solarkollektoren oder durch Abfallwärme aus einem Wärmeprozess weiter aufgeheizt und in einen Verdunster geleitet. Das verdunstete Wasser wird von dem zirkulierenden Luftstrom aufgenommen und kondensiert wieder am Salzwasserzulauf.



Abbildung 3: Schema einer solaren Feuchtluftdestillationsanlage (Quelle Sonnenwerft GmbH)

4.1.4 Membrandestillation (MD)

Bei der Membrandestillation handelt es sich um ein thermisches Verfahren, dass unter anderem auch seit einigen Jahren am Fraunhofer ISE /13/ in Freiburg und bei der Firma TNO Science and Industry in Holland /14/ weiterentwickelt wird. Erste Prototypen davon sind in der Anwendung. Die Trennung von Wasser und Salz geschieht durch die Verdampfung von Wasser durch eine mikroporöse, hydrophobe Membran (z.B. aus PTFE), die einerseits durch ihre Oberflächeneigenschaften von flüssigem Wasser nicht benetzt wird, andererseits durch ihre hohe Porosität Wasserdampf sehr gut durchlässt. Die treibende Kraft hierbei ist die von der Temperatur abhängige Differenz der Partialdampfdrücke zwischen Verdampferund Kondensatorfläche. Zwischen den beiden Flächen liegt der Destillatkanal, der durch die dampfdurchlässige Membrane von der heißen Sole und durch eine wasserdichte Folie vom zulaufenden Wasser im Kondensator getrennt ist. Die Betriebstemperatur liegt zwischen 60-90 °C am Verdampfereintritt. Da nur Dampf die Membrane durchdringen kann, entsteht reines Destillat. Abbildung 4 stellt das Verfahrensschema für eine MD-Anlage dar. Ein ähnliches MD-Verfahren, allerdings ohne Wärmerückgewinnung, wendet Solar Dew International an.



Abbildung 4: Schema einer MD-Destillationsanlage (Fraunhofer ISE) SolarSpring GmbH

4.1.5 Mehrstufendestillationsanlage (MSD)

Eine Weiterentwicklung der Solardestille ist die Wärmerückgewinnung in Mehrstufendestillen in Etagenbauweise, welche im Solar- Institut Jülich zusammen mit IBEU im Zeitraum vor dem Aquasolprojekt bereits im kleinen Maßstab entwickelt und untersucht wurde. Sie arbeiten mit mehreren übereinander gestapelten Böden und verwerten die Kondensationswärme der jeweils tiefer liegenden Stufe. Da es sich um ein offenes System handelt, entspricht der Druck in jeder Stufe dem Umgebungsdruck. Anders als bei MSF- oder MED-Anlagen kann die Siedetemperatur nicht durch Änderung der Stufendrücke angepasst werden. Durch die Wärmezufuhr wird das Salzwasser in der untersten Stufe auf etwa 95100°C erhitzt und zum Verdampfen (Verdunsten) gebracht. Der Dampf in der aufsteigenden, feuchten Luft kondensiert an der Unterseite der darüber liegenden Verdunsterstufe. Die durch die Kondensation freiwerdende Verdampfungsenthalpie wird an die darüber liegende Stufe abgegeben und erwärmt das darin befindliche Salzwasser. Das Kondensat läuft, an der Unterseite der Kondensatorstufen ab, wird aufgefangen und in einen Sammelbehälter am tiefsten Punkt der Anlage geleitet. Abbildung 5 zeigt den Aufbau der Versuchsdestille, welche bereits vor Projektbeginn als Grundlage für die Erstellung der weiterführenden Arbeitsschritte im Aquasolprojekt diente.



Abbildung 5: Funktionsweise der Mehrstufendestille (MSD)

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt Aquasol ist ein internationales Projekt mit Partnern aus verschiedenen Ländern. Thames Water Great Britain, der größte Wasser Ver- und Entsorger in Großbritannien, unterstützte das Aquasol Projekt mit viel Engagement und finanziellen Mitteln beim Feldtest in Spanien (Gran Canaria) und in Indien (Bangalore). Das Institutsgelände des Instituto Tecnologico de Canarias (ITCc) Spanien, Gran Canaria, diente als erster Feldteststandort und die betriebsinterne Infrastruktur ermöglichte eine gute Zusammenarbeit mit dem Institut bei der Durchführung dieses Feldtests. Die Erfahrungen des Feldtests und die Ergebnisse der fortlaufenden Laboruntersuchungen in diesem Projektzeitraum sind Grundlage zweier Doktorarbeiten und mehrerer Diplomarbeiten.

Das "The Energy and Resources Institute TERI", Indien, unterstütze den Feldtest in Karnataka, Indien, und vermittelte Kontakte zu Regierungsinstitutionen und zur Privatwirtschaft in Hinblick auf die Vermarktung des Entsalzungssystems. Ein gemeinsam durchgeführter Workshop in Bangalore, Indien, verdeutlicht die gute Zusammenarbeit der Projektpartner. Ein Student der RWTH- Aachen erstellte in seiner Diplomarbeit eine Vermarktungs- bzw. Bedarfsanalyse für das vom SIJ und IBEU entwickelte System für den indischen Markt.

Das Laboratório de Energia Solar e Gás Natural, Brasil, arbeitet schon seit einigen Jahren mit dem Solar- Institut Jülich und IBEU im Bereich regenerativer Energien auf den Gebieten der solaren Kühlung, des solaren Kochens und als Schwerpunkt auf dem Gebiet der solaren Meerwasserentsalzung zusammen. Mit dem brasilianischen Partner kommt es vermehrt zum Austausch von Studenten und zur Abwicklung von Diplomarbeiten mit dem Schwerpunktthema "Meerwasserentsalzung in Brasilien".

Zusätzliche Partner sind Firmen aus dem Bereich Maschinenbau, die für die Fertigung der Entsalzungsanlagen (Edelstahlvariante) zuständig sind. Der Metallverarbeitende Betrieb Carlier aus Aachen fertigte die Entsalzungsanlagen für die Laborversuche und den Feldtest in Spanien, Indien und Brasilien.

Das Marktumfeld, insbesondere der starke Anstieg des Edelstahlpreises, führte zur Forschung im Bereich alternativer Materialien für den Bau der Entsalzungssysteme. Als Partner ist die Zusammenarbeit mit der Firma ISO- Protect zu erwähnen, welche die Stufenprofile für das neue Entsalzungsanlagen Design (Kunststoffvariante) fertigte.

II. Einhergehende Darstellung zum Projekt Aquasol

1. Erzielte Ergebnisse

Die wissenschaftliche Koordinierung der folgenden Arbeitspunkte des Verbundprojektes erfolgt durch Prof. Dr. K. Schwarzer vom Ingenieurbüro für Energie und Umwelttechnik (IBEU). Aufgrund der veränderten Randbedingungen, besonders durch die enormen Kostensteigerungen bei den Hauptmaterialien Edelstahl und Kupfer, wurden verschiedene Arbeitspunkte inhaltlich verändert bzw. neue Arbeitspunkte in Absprache mit dem Förderer aufgenommen und zeitlich in der Bearbeitung teilweise vorgezogen. Das veränderte Arbeitsprogramm wurde mit den Projektpartnern abgestimmt. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der jeweiligen Arbeitspunkte des Forschungsprojektes Aquasol dargestellt.

1.1 Solarthermische Entsalzungsanlage mit mehrstufiger Wärmerückgewinnung Mehrstufendestille (MSD)

Als Grundlage für diesen Endbericht wird zu Beginn das von IBEU und dem Solar-Institut Jülich entwickelte Entsalzungssystem (Mehrstufendestille MSD) in Aufbau und Funktion vorgestellt. Die Charakterisierung der thermodynamischen Einflussgrößen des Systems wird im Anhang ausführlich dargestellt.

Die Mehrstufendestille (MSD- Anlage) besteht aus einem Kollektorbereich und einem Entsalzungsbereich. Über ein Kollektorfeld aus Flachkollektoren wird die Solarwärme in die Entsalzungseinheit eingekoppelt. Die Entsalzungseinheit besteht aus einem Verdampferraum mit mehreren übereinander angeordneten Kondensationsstufen (7-14 Stufen entsprechend Versuchsdurchführung) aus salzwasserbeständigem Edelstahl.

Auf die neu entwickelte Variante der MSD- Anlage, welche aus einem alternativen Material (Polyurethan PU) aufgrund des stetig steigenden Edelstahlpreises gefertigt wird, wird in der Dokumentation in den entsprechenden Arbeitspunkten detailliert eingegangen.

Vorteil der Mehrstufendestille gegenüber anderen solarthermischen Entsalzungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ist, dass die Kollektoren nicht mit Salzwasser sondern mit dem gesammelten Kondensat oder Frischwasser betrieben werden und somit im Kollektorsystem keine Korrosion stattfindet. Bei anderen solarthermischen Entsalzungsanlagen wird der Kollektor direkt mit Salzwasser betrieben bzw. es sind teure Wärmetauscher zwischen geschaltet, um Korrosion zu verhindern. Die Kollektoren, vom Destillat durchströmt, sind unterhalb des Verdampferraumes angebracht. Dies führt zur Zirkulation des Destillats durch Eintrag der Sonnenenergie aufgrund natürlicher Konvektion. Erwärmtes Wasser besitzt eine geringere Dichte als kaltes, das heißt, es findet eine Wasserbewegung während der Aufheizund Betriebsphase vom Kollektorfeld in den Entsalzungsbereich statt. Das aufgeheizte Destillat-Frischwasser im Bodenbereich des Entsalzungsmoduls dient gleichzeitig als erste Stufe der Verdampferkolonne. Das aufgeheizte Destillat ist die Wärmequelle für den Entsalzungsprozess. Der Meerwasserzulauf erfolgt im oberen Bereich des Entsalzungsmoduls. Das Meerwasser wird in die erste Kondensationsstufe geleitet. Ist ein definierter Wasserstand in dieser Stufe erreicht, fließt das Meerwasser über einen Ablauf in die darunter angeordnete Stufe, bis auch diese mit Meerwasser bedeckt ist, dabei nimmt die Salzkonzentration von Stufe zu Stufe zu.



Abbildung 6: Mehrstufendestille mit Wärmerückgewinnung

Die mehrstufige Anordnung der Kondensationsstufen ermöglicht einen energieeffizienten Betrieb der Anlage. Dies wird durch Wärmerückgewinnung erreicht. Die Kondensationswärme des Dampfes in der Verdampferwanne (Destillatauffangbehälter) wird an die oberhalb angeordnete Kondensationsstufe übertragen, die mit Salzwasser gefüllt ist. Das Salzwasser erwärmt sich und es kommt zu einem Verdunstungsprozess. Der aufsteigende Wasserdampf kondensiert an der Unterseite der oberhalb befindlichen Kondensationsstufe und es kommt erneut zu einer Erwärmung, das heißt zu einer Übertragung der Kondensationswärme an das Salzwasser, welches die Entsalzungsanlage von oben nach unten durchströmt. Das Kondensat, aufgrund von Adhäsion- und Kohäsionskräften, läuft an der schrägen Unterseite der Stufe an den Rand des Entsalzungsmoduls und als Wasserfilm entlang der Außenwände in den Destillatauffangbehälter. Dieser Vorgang wiederholt sich entsprechend der Anzahl der eingebauten Kondensationsstufen. Die Wärmerückgewinnung der Kondensationswärme führt zu einer erheblichen Ertragssteigerung der in Destillatproduktion (Trinkwasserproduktion) gegenüber einfachen solarthermischen Entsalzungsverfahren.

AP.1 Anlagenbau und Durchführung von Feldtests /Labortests

1. Grundlagenexperimente zur Destillation

Im Rahmen des Aquasol Projektes wurden zur Bestimmung des Wärmeüberganges bzw. Stofftransportes (Destillat) verschiedene Experimentaldestillen für die Versuchsparameter zur Anlagenoptimierung entwickelt. Die ausreichende Kenntnis der verschiedenen Einflussgrößen auf den Stoff- und Wärmetransport ist eine wichtige Voraussetzung zur Anlagenoptimierung.

Die unten beschriebene Destille für Kondensationsflächen aus Edelstahl und deren Ergebnisse ist u.a. Grundlage für die von C. Müller im Aquasol-Projekt durchgeführte Promotion an der RWTH-Aachen /15/. Die später entwickelten Expermientierdestillen wurden speziell für andere Kondensationsflächen wie hydrophile Folien mit Stützgitter und oxydische metallische Bleche entwickelt. Die entsprechenden Grundlagen für die Bestimmung des Stoff- und Wärmetransport werden im Folgenden kurz beschrieben.

Der bestimmende Wärmeübergang in einer Destillationsstufe findet über den Stofftransport vom Verdampfer zum Kondensator und die damit verbundene Übertragung der Kondensationswärme statt. Der Stofftransport wird durch verschiedene Faktoren, wie die Verdampfungs- und Kondensationstemperatur, den Salzgehalt, die Oberflächenbeschaffenheit des Kondensators und die Geometrie der Destillationskammer beeinflusst. Weitere Verlustmechanismen, wie das Rücktropfen des Destillats vom Kondensator in den Verdampfer verringern den Destillatertrag, jedoch nicht den Stofftransport. Parallel zum Stofftransport findet zwischen Verdampfer und Kondensator ein Wärmetransport über Strahlungsaustausch und freie Konvektion statt. Dieser Wärmestrom ersetzt einen Teil des Stoffübergangs und schmälert damit den Destillatertrag.

2. Die Experimentaldestille für Edelstahlkondensatorflächen

Ein Schnitt durch die Experimentaldestille ist in Abbildung 7 zu sehen. Die Destille besteht aus einem abgeschlossenen Edelstahlkasten, der im unteren Teil mit 50mm PU-Schaum isoliert ist. Lediglich der Destillatausgang bildet eine Verbindung zur Umgebung. Der Verdampfer hat eine Verdampferfläche von 0,15 m². Die Verdampfertemperatur kann über einen Heizstab mit 700 W elektrisch geregelt werden. Der Kondensator besteht aus einem 1 mm starken Blech aus Edelstahl 1.472, über dem sich ein Wasserkissen mit 6 kg Inhalt befindet. Bei konstant gehaltener Verdampfertemperatur erwärmt sich das Wasserkissen über dem Kondensator. Gemessen wurde die Abhängigkeit der Destillatrate von der der Verdampfertemperatur Temperaturdifferenz, und dem Neigungswinkel der Kondensationsflächen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Erwärmung des Kondensators so langsam erfolgt, dass quasistationäre Zustände vorliegen.



Abbildung 7: Schema der Destillationskammer zur Grundlagenuntersuchung

Der mittlere Abstand zwischen Verdampfer und Kondensator kann über den Wasserstand zwischen 7 und 15 cm eingestellt werden. Der Neigungswinkel des Kondensators lässt sich zwischen 0° und 30° variieren.

2.1 Versuchsdurchführung

Die Charakteristik des Stofftransports wird durch ein Kennfeld beschrieben, in dem die Destillatrate in Abhängigkeit von der Verdampfertemperatur und der Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator dargestellt wird. Es werden Kennfelder bei verschiedenen Neigungswinkeln des Kondensators von 17°, 14°, 10° und 7° und bei Abständen zwischen den Flächen von 14 cm bzw. 10 cm vermessen. Weitere Versuche gelten dem Einfluss des Salzgehalts sowie den Flächenverhältnissen von Kondensator- und Verdampferfläche. Eine typische Messreihe zeigt Abbildung 8. Hier wurde die Verdampfertemperatur konstant auf ca. 90°C gehalten.



Abbildung 8: Destillatproduktion, Grundtemperatur und Temperaturdifferenz über die Zeit

Bei Verdampfertemperaturen von 50, 60, 70, 80, 85, 90 und 95°C wurden die Messungen wiederholt. Die Messreihen können in einer dreidimensionalen Darstellung zusammengefasst werden. Abbildung 9 zeigt das Ergebnis für Süßwasser, einen Kondensatorwinkel von 17° und einen Abstand von 14 cm. Deutlich erkennbar ist der überproportionale Anstieg der Produktion bei Verdampfungstemperaturen über 80°C, während die Temperaturdifferenz über dem gesamten Arbeitsbereich näherungsweise linear eingeht. Quantitativ wird dieser Sachverhalt in einer 2-dimensionale Darstellung deutlicher. Abbildung 10 zeigt eine geglättete Darstellung der Messergebisse. Aus dieser Abbildung kann die Kondensationsrate bei einer bestimmten Verdampfertemperatur und einer Temperaturdifferenz zur nächsten Stufe abgeschätzt werden.



Abbildung 9: 3D-Kennfeld: 17° Neigungswinkel, 14 cm Abstand, Süßwasser. (Die Punkte markieren Messwerte)



Abbildung 10: 2-D Kennfeld: 17° Neigungswinkel, 14 cm Abstand, Süßwasser, Edelstahl (Kurven geglättet)

2.2 Rücktropfverluste

Die Rücktropfverluste des Destillates sind bei einer Thermodynamischen Betrachtung der Entsalzungsdestille nicht zu vernachlässigen. Ursache der Rücktropfverluste sind unter anderen der Einfluss der Wahl der Kondensationsfläche, aber auch eine Beeinflussung des Temperaturniveaus in den verschiedenen Stufen hat Auswirkungen auf die Rücktropfverluste. Aus vergangenen Messungen am SIJ wurden in den oberen Stufen, bei niedrigen Temperaturniveaus und Produktionsraten, Rücktropfverluste von bis zu 50% abgeschätzt. Bei Vernachlässigung der Rücktropfverluste wird der effektive Wärmeübergang unterschätzt und damit die real übertragene Destillatmenge in Form von Wasserdampf in der feuchten Luft. Energie geht durch die Rücktropfverluste nicht verloren, da die Wärme an die obere Stufe übertragen wird. Die Verluste sind mengenbezogen und verringern die Destillatproduktion.

2.2.1 Physikalische Grundlagen

Wird ein Flüssigkeitstropfen mit einer Feststoffoberfläche in Kontakt gebracht, so können folgende Situationen unterschieden werden:

- Der Tropfen zerfließt, d.h. er breitet sich auf der Oberfläche aus und ist nicht mehr zu erkennen. Dieses Verhalten wird auch als Spreiten bezeichnet und ist charakteristisch für eine ideale Benetzung.
- Der Tropfen verbreitert sich, bleibt aber als Tropfen noch zu erkennen, was charakteristisch f
 ür eine normale Benetzung ist.
- Der Tropfen bleibt als solcher erhalten oder perlt von der Oberfläche ab. In diesem Falle findet keine Benetzung statt.

Ein derartiges Verhalten an Kontaktbereichen zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen wird durch sogenannte Grenzflächeneffekte hervorgerufen. Bei der Benetzung von Festkörpern mit Flüssigkeiten spielt das Zusammenwirken von Kohäsion und Adhäsion und deren Vektorsumme, als resultierende Kraft eine Rolle. Dadurch bildet sich zwischen Grenzfläche des Körpers und Tangentialebene der Flüssigkeit ein Randwinkel α.

$$\cos(\alpha) = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{12}}{\sigma_{23}}$$

- σ_{12} = Grenzflächenspannung zwischen Festkörper Flüssigkeit
- σ_{13} = Grenzflächenspannung zwischen Festkörper Gas = Oberflächenspannung des Festkörpers
- σ₂₃ = Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit Gas = Oberflächenspannung der Flüssigkeit

 α = Randwinkel

Benetzung liegt dann vor, wenn der Kontaktwinkel zwischen einer Flüssigkeit und einem Feststoff < 45° beträgt oder gegen 0° geht, so dass die Flüssigkeit auf der Feststoffoberfläche spreitet. Hydrophile Oberflächen haben gegenüber Wasser einen Kontaktwinkel, der kleiner als 90° ist. Hydrophile Stoffe sind entweder Salze (Ionenverbindungen) oder polare Substanzen, die sich im polaren Wasser lösen. Es findet gar keine Benetzung statt, wenn der Kontaktwinkel 90°- 180° beträgt, so dass die Flüssigkeit abperlt. Schematisch ist dies in Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 11: Benetzungsformen

Die übereinander angeordnete Bauweise von Verdampfer- und Kondensatorflächen kommt dem natürlichen Wärmestrom durch die Anlage, der Wasserführung und einer einfachen Bauweise entgegen. Ein wesentlicher Nachteil besteht jedoch darin, dass sich das Kondensat an der Unterseite des beinahe horizontalen Kondensators bildet. Das Kondensat wird nur durch Adhäsions-Kräfte vom Rücktropfen in die Verdampferwanne abgehalten. Die Rücktropfverluste haben zwar keinen direkten Einfluss auf den Wärmeübergang, verringern aber die Destillatausbeute.

Die Ermittlung der Rücktropfverluste ist schwierig. Unter Laborbedingungen, im quasistationären Betrieb, kann die theoretisch erreichbare Destillatmenge abgeschätzt werden. Der Wärmestrom in der folgenden Gleichung wird durch die elektrische Leistung der Heizspirale \dot{Q}_{el} ersetzt. Der Verlustwärmestrom durch Wärmeleitung $\mathbf{Q}_{\mathbf{V}}$ über die Außenwände lässt sich sehr genau abschätzen. Für die Masse der trockenen Luft ergibt sich somit:

$$\dot{m}_{L_{tr}} = \frac{\dot{Q}_{el} - \dot{Q}_{V}}{\Delta h_{1+x}}$$
 [kg_{L,tr}/s]

Mit der Annahme, dass der Wasserdampf vollkommen kondensiert, gilt für die theoretische Destillatmenge:

$$\Delta \dot{m}_{Dest,Theorie} = \Delta x_{1-2} \cdot \dot{m}_{L_{tr}}$$
 [kg_{Dest}/s]

Folglich ergeben sich die Rücktropfverluste aus:

. .

$$\Delta \dot{m}_{V,Riicktropf} = \Delta \dot{m}_{Dest,Theorie} - \Delta \dot{m}_{Dest,gemessen}$$
 [kg_{V,Riick}/s]

Die Destillatsausbeute bzw. der Kondensationswirkungsgrad η_{K} ist:

$$\eta_{K} = \frac{\Delta m_{Dest, gemessen}}{\Delta m_{Dest, Theorie}}$$
%

2.2.2 Bestimmung über die Winkelabhängigkeit

Um die Rücktropfverluste quantitativ zu erfassen wurde die Abhängigkeit der Produktionsrate von der Kondensatorneigung für verschiedene Winkel bestimmt.

Abbildung 12 zeigt das Ergebnis für eine Kondensatorneigung von 5°, 12° und 20°. Eine Destillatausbeute von 100 % entspricht der gleichen Produktionsrate wie unter gleichen Randbedingungen bei einem Kondensatorwinkel von 30°. Es wird angenommen, dass bei 30° Neigung kaum noch Rücktropfverluste stattfinden. Die Destillatausbeute verbessert sich annähernd linear mit zunehmender Produktion. Bei hoher Produktionsrate gehen die Verluste unabhängig vom Winkel auf wenige Prozent zurück.



Abbildung 12: Destillatausbeute in Abhängigkeit von der Produktionsrate bei einer Kondensatorbreite von 10 cm (Edelstahl)

Der Zusammenhang zwischen Produktionsrate und Rücktropfverlusten fällt besonders bei erhöhter Stufenzahl ins Gewicht. Aus je mehr Stufen ein System besteht, desto kleiner ist aufgrund der kleineren Temperaturdifferenz die Produktion pro Stufe. Die Gesamttemperaturdifferenz der Gesamtanlage bleibt jedoch konstant. Besonders bei kleinen Winkeln verschlechtert sich trotz erhöhtem Rückgewinnungsgrad die Destillatausbeute.

Die Abbildungen 13 und 14 zeigen die Destillatausbeute in Abhängigkeit vom Kondensatorwinkel für zwei verschiedene Kondensationsraten. Deutlich erkennbar ist die wesentlich geringere Destillatausbeute bei der kleineren Kondensationsrate bei gleichem Kondensatorwinkel. Die Destillatausbeute verbessert sich annähernd linear mit der zunehmenden Produktionsrate. Bei hohen Produktionsraten, d.h. bei Filmkondensation gehen die Verluste winkelunabhängig auf wenige Prozent zurück.



bei einer mittleren Produktionsrate von 1,5 kg/(m²h)



Abbildung 14: Destillatausbeute in Abhängigkeit vom Neigungswinkel bei einer mittleren Produktionsrate von 6 kg/m²h

2.3 Einfluss der Rücktropfverluste auf den GOR-Wert

2.3.1 Kennzahlen zur Beschreibung der Wärmerückgewinnung

Durch mehrstufige Wärmerückgewinnung erhöht sich der Systemnutzungsgrad im Vergleich zu einer einfachen Solardestille ohne Wärmerückgewinnung. Zur Bestimmung des Wärmerückgewinnungsgrades sind zwei Kennwerte maßgebend. Der *Gained Output Ratio (GOR)* stellt den Nutzungsgrad der bereitgestellten Energie dar. Er ist ein Maß für den Wärmerückgewinnungsgrad.

$$GOR = \frac{\sum_{1}^{n} m_{Des,i} \cdot \Delta h}{Q_{zu}}$$

Der *Coefficient of Performance (COP)* gibt das Verhältnis der Destillatproduktion der gesamten Anlage im Vergleich zur ersten Stufe an.

$$COP = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_{Des,i}}{m_{Des,1}}$$

2.3.2 Zusammenhang Produktionsrate und Rücktropfverluste

Der Zusammenhang zwischen Produktionsrate und Rücktropfverlusten wird besonders deutlich bei erhöhter Stufenzahl ins Gewicht. Da die Gesamttemperaturdifferenz über der Anlage konstant bleibt, nehmen bei zunehmender Stufenzahl die Temperaturdifferenz und damit die Produktionsrate pro Stufe ab. Besonders bei kleinen Winkeln verschlechtert sich damit trotz erhöhtem Rückgewinnungsgrad die Ausbeute, da die Rücktropfverluste bei niedriger Produktionsrate stark zunehmen. Abbildung 15 zeigt den theoretisch erreichbaren Rückgewinnungsgrad über der Stufenanzahl bei einem Kondensatorneigungswinkel von 12° mit und ohne Einfluss der Rücktropfverluste. Es ist zu erkennen, dass der GOR- Wert schnell um bis zu 40 % abnimmt. Ein System mit 15 Stufen und 90 % Stufenwirkungsgrad erreicht

so statt des theoretisch erreichbaren GOR 7 nur noch GOR 4,3. Die Rücktropfverluste stellen somit einen ausschlaggebenden Einflussfaktor dar.



Abbildung 15: Destillatausbeute in Abhängigkeit vom Neigungswinkel bei einer mittleren Produktionsrate von 6 kg/m²h

- 3. Anlagenbau und Durchführung von Feldtests / Labortests
 - Bau der Anlagen, Transport, Aufbau Spanien mit Edelstahlstufen

Nach den Grundlagenversuchen wurde mit den Bau einer Nullserie zur Durchführung von längeren Feldtests begonnen. Der Aufbau der Entsalzungsanlagen auf dem Testgelände des Instituto Tecnologico de Canarias (ITC) auf der Insel Gran Canaria erfolgte im Juli 2005. Der Feldtest endete November 2006. Vier Entsalzungsanlagen kommen beim Feldtest in Gran Canaria zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um zwei Systemvarianten, Entsalzungsanlage mit Flachkollektor- und Vakuumröhrenbetrieb. Die Anlagen mit Flachkollektoren haben eine Kollektorfläche von 4,2 m², die mit den Vakuumkollektoren von 2,2 m². Abbildung 16 zeigt die Entsalzungsanlagen auf dem Testfeld. Bei System 1 und 2 handelt es sich um Entsalzungsmodule mit Flachkollektor, System 3 und 4 werden mit Vakuumröhren betrieben. Parallel dazu wurden umfangreiche Labortest in Jülich durchgeführt.



Abbildung 16: Entsalzungssysteme beim Feldtest auf Gran Canaria (ITC)

Der Unterschied der Systeme liegt in der Kollektorart für die Solarenergieeinkoppelung, der innere Aufbau des Entsalzungsbereichs ist bei allen vier Systemen nahezu identisch. Ein Anlagentyp mit Flachkollektor unterscheidet sich zu den anderen installierten Anlagen durch seinen größeren Destillatspeicher (System 1, Abb. 18), der ein zusätzlicher Wärmespeicher ist.



Abbildung 17: Entsalzungsbereich mit Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren

Die Prinzipskizze (Innenaufbau-Abb. 18) verdeutlicht den Aufbau und die Funktion der Entsalzungsanlagen, die beim Feldtest in Gran Canaria eingesetzt wurden. Vor Ort wurden drei Entsalzungssäulen mit je sieben Kondensationsstufen aus Edelstahl eingesetzt. Die Kondensationsfläche beträgt je Stufenebene 1 m². Das Funktionsprinzip der Wärmeübertragung und Kondensation an den Verdampferstufen unterscheidet sich nicht. Eine Variierung der Stufenanzahl in den Entsalzungssystemen wird durchgeführt und deren Einfluss auf die Destillatproduktion im Laufe der Testreihen in der einjährigen Versuchsdauer untersucht.



Abbildung 18: Innenaufbau der Systeme beim Feldtest (System1 mit Speicher)

Die thermodynamischen- und Betriebsoptimierungen sind im Laufe der Projektphase durchgeführt worden. Eine thermodynamische Charakterisierung des Gesamtsystems setzt eine messtechnische Erfassung der relevanten Einflussgrößen voraus. Die erfassten Einflussgrößen werden über ein Datenaufzeichnungsgerät (Datenlogger) gespeichert. Ein Webdaq, ein Gerät, welches die Daten speichert und abrufbar für eine Internetverbindung zur Verfügung stellt(Abbildung 19), ermöglicht einen Zugriff auf die Daten. Folgende Messgrößen können auf der Webpage eingesehen werden:

Systemtemperatur (Stufentemperatur), Außentemperatur, Meerwasserzulauftemperatur, Meerwasserzulaufmenge, Destillatproduktion, Leitfähigkeitswert des Destillates, Einstrahlungsstärke und Windgeschwindigkeit. Dies hatte den Vorteil, dass die Messgrößen von Deutschland aus, aber auch von den internationalen Projektpartnern, eingesehen werden konnten. Auf einer Webseite mit Anlagenschema, siehe Abbildung 19, werden die Messgrößen in bestimmten Zeitabständen aktualisiert.



Abbildung 19: Webpage mit Anlagenschema und Messgrößen

3.1 Kollektorwirkungsgrad Flachkollektor – Vakuumröhren

Für die Berechnung der Energie bzw. Wärmeströme der Mehrstufendestille ist die Kenntnis über die Wirkungsgrade der verwendeten Kollektorsysteme notwendig. Mit der gemessenen Einstrahlung vor Ort lässt sich die wirkliche Kollektornutzleistung bestimmen. Die folgenden Darstellungen zeigen die Wirkungsgrad Kennlinie der eingesetzten Flachkollektoren der Firma Arcon (siehe Abb. 20) und der Vakuumröhrenkollektoren der Firma Gey Solar (siehe Abb. 22). Die Flachkollektoren der Firma Arcon zeichnen sich durch einen guten Wirkungsgrad aus. Für den eingesetzten Flachkollektor ergibt sich zum Beispiel bei einer Umgebungstemperatur von 20°C, einer mittleren Kollektortemperatur von 100°C und einer Einstrahlung von 800 W/m² ein Wirkungsgrad von ca. 55%. Der Verlustkoeffizient einer Vakuumröhre liegt etwa bei der Hälfte eines Flachkollektors.



Abbildung 20: Vergleich Wirkungsgrad Flachkollektor- Vakuumröhrenkollektor

Die einfachen Vakuumröhren arbeiten ohne Wärmetauschermedium und werden direkt von dem Rohwasser durchströmt. Eine Vakuumröhre mit Füllrohr ist in Abbildung 21 dargestellt.

BED

Die Integration der Vakuumröhren in die Entsalzungseinheit zeigt Abbildung 22. Sie werden direkt in den Speicher des Entsalzungsmoduls gesteckt.





Abbildung 21: Vakuumröhre mit Füllrohr

Abbildung 22: Integration der Vakuumröhre

Die Vakuumröhre besteht aus zwei Glasröhren, deren Zwischenraum evakuiert ist. Durch das Vakuum werden die Wärmeleitungsverluste sowie konvektiven Verluste zwischen Absorber und Glasabdeckung minimiert. Die innere Röhre stellt den Absorber dar und ist beschichtet.

Die Vakuumröhren werden mit dem Speicherbecken direkt verbunden und durch Dichtungsringe zwischen Glas- und Edelstahloberfläche abgedichtet.

Der verwendete Vakuumkollektor hat einen optischen Wirkungsgrad von ca. 0,63 (vgl. Abb. 23). Als Grundlage für die Berechnungen der relevanten Einflussgrößen werden für die Wirkungsgrade des Flachkollektor 50 % und für die Vakuumröhre 55 % angesetzt. Mit steigender Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung steigen die thermischen Verluste. Je höher die Einstrahlung auf den Kollektor, desto höher sind Betriebstemperatur und Temperaturdifferenz zur Umgebung. Der Anstieg der thermischen Verluste verringert den Wirkungsgrad des Kollektors.



Abbildung 23: Wirkungsgradkennlinie des Gey- Vakuumröhrenkollektors

3.2 Temperaturverläufe in der Anlage (Edelstahlanlage)

In folgender graphischer Darstellung (Abb. 24) sind die Verdampfertemperaturen (Destillattemperatur) der vier Entsalzungsanlagen bei entsprechender Einstrahlung über einen Zeitraum von vier Tagen dargestellt. Erkennbar ist ein Tag- Nacht Rhythmus. Er gliedert sich in eine Aufheizphase (8⁰⁰-13⁰⁰), eine quasi stationäre Produktionsphase (13⁰⁰-18⁰⁰) und in eine Nachtphase (18⁰⁰-8⁰⁰), in der die Temperatur wieder absinkt. Ein Vergleich der vier Systeme zeigt bei gleicher Einstrahlungsintensität Unterschiede im Temperaturverlauf über den betrachteten Zeitabschnitt.

Die Temperatur von System 1, mit einem Speichervolumen von 105 Litern, fällt erwartungsgemäß in der Nachtphase im Vergleich zu den Systemen 2, 3 und 4 mit kleineren Speichern, nicht so weit ab. Ursache ist die größere Destillatwassermasse im Speicherbereich, welche aufgrund der hohen Wärmekapazität von Wasser als Wärmespeicher fungiert.


Abbildung 24: Verdampfertemperaturen Entsalzungssysteme

Die Wärmeverluste, die zu einem Absinken der Temperatur in allen vier Systemen führt, setzten sich aus den konvektiven Wärmeverlusten und Wärmeverlusten aus Leitung und Strahlung zusammen. Bei System 2 werden über Nacht die niedrigsten Temperaturen aufgezeichnet, auch im direkten Vergleich mit System 3 und 4, welche annähernd über die gleichen Speichervolumen verfügen. Das Kollektorfeld von System 2 besteht aus Flachkollektoren, die Wärmeverluste sind daher größer als bei den Systemen (3 und 4) mit Vakuumröhren. Aufgrund des Vakuums zwischen Absorber und Außenhülle können die Konvektionsverluste der Systeme 3 und 4 stark reduziert werden. Eine Betrachtung der Aufheizphase der vier Systeme, insbesondere ein Vergleich von System 1 und 2 in den ersten Testtagen, zeigt, dass durch das kleinere Speichervolumen in System 2 die Destillatmaximaltemperatur schneller erreicht wird. Die aufzuheizende Destillatmasse ist um ein vielfaches geringer und daher bei Wärmezufuhr schneller auf einem hohen Temperaturniveau.

3.3 **Produktionsrate (Edelstahlanlage)**

Die Effektivität einer Solardestille ist gekennzeichnet durch seine Trinkwasserproduktion in Abhängigkeit von der auf die Kollektorfläche eingestrahlten Solarenergie. Als Maß werden dafür nicht die stündlichen Produktionsraten, sondern die tägliche Destillatproduktion und die Summe der täglichen Einstrahlung herangezogen.

Vergleich der Destillatproduktion der 4 Systeme

Die Entsalzungsmodule sind sowohl für Brackwasser als auch für Meerwasser ausgelegt. In Abbildung 25 ist die Destillatproduktion der vier Entsalzungssysteme dargestellt. Die Einstrahlung liegt zwischen 7,3-7,9 kWh/m². System 1 produziert etwa 55-60 l pro Tag, das 2. System 31-41 l/d, das 3. System 33-38 l/d und System 4 zwischen 10-21 l/d. System 1 liefert die höchste Destillatproduktion. Der große Speicher ermöglicht eine höhere Nachtproduktion im Vergleich zu den Systemen 2, 3 und 4, welche mit kleineren Speichern ausgeführt sind. System 2 und 3 weisen ungefähr die gleiche Produktionsrate auf, obwohl die Flachkollektorfläche von System 2 größer ist als bei System 3 mit Vakuumröhrenkollektoren. Die Wärmeverluste bei System 2 sind über Nacht größer als bei System 3, entsprechend geringer ist die Speichertemperatur in System 2 und folglich die Destillatnachtproduktion. System 3 und 4 müssen aufgrund der Baugleichheit annähernd gleiche Produktionsraten liefern. Ursache für den Unterschied in den Produktionsraten von System 3 und 4 liegen in einer nicht ausreichenden Salzwasserzufuhr im System 4, welche zeitweise zu einemTrockenlaufen der Anlage führte.



Abbildung 25: Destillatproduktion der Systeme 1, 2, 3 und 4 (Edelstahlflächen)

In Abbildung 26 ist die spezifische Trinkwasserproduktion $m_{spe,Des.}$ bezogen auf die eingestrahlte Energie in kg/kWh dargestellt. Die spezifische Trinkwasserproduktion ergibt sich aus:

BEU

$$m_{spe,Des.} = \frac{m_{Ges,Des}}{A_K \cdot E_{Ges}}$$

mit

*m*_{*Ges,Des*}: Gesamte Destillatmenge [kg/d]

 $A_{KFlach} = 5,2m^2$ Fläche Flachkollektor

 $A_{KVak} = 2,2m^2$ Fläche Vakuumröhre

 E_{Ges} : Eingestrahlte Solarenergie [kWh/m²d]

m_{spe,Des}.: Spezifische Trinkwasserproduktion [kg/kWh]



Abbildung 26: Spezifische Produktion der Entsalzungssysteme

Es zeigt sich, dass die spez. Produktionsrate bei System 3 (Vakuumröhre) mit etwa 2-2,2 kg/kWh den höchsten Wert erreicht. Zu beachten ist, dass bei den Vakuumröhren nur die tatsächliche Fläche der Vakuumröhren betrachtet wird. Der Abstand zwischen den einzelnen Röhren wird nicht zur Kollektorfläche gerechnet, obwohl bei seitlicher Einstrahlung diese Annahme nicht richtig ist (vgl. Abbildung 27). Dadurch ergibt sich gegenüber dem Flachkollektor einen Berechnungsvorteil im Bezug auf die spezifische Produktionsrate.



Abbildung 27: Tatsächliche und berechnete Kollektorfläche Vakuumrohren

Der spezifische Wert der einfachen Destille liegt bei etwa 0,32 kg/kWh bei einem Destillenwirkungsgrad von 50%. Das heißt, System 3 liefert eine um den Faktor 6-7 höhere Destillatproduktion bei gleicher Einstrahlung. Der Faktor bei System 1 beträgt 4-5, der von System 2 etwa 3. Bei diesen Werten ist zu beachten, dass die Anlagen sich im ersten Feldtest befinden, und die Optimierungsphase noch nicht abgeschlossen war. Die spezifische Produktion von System 4 ist wesentlich niedriger im Vergleich zu den anderen Entsalzungsanlagen. Erwartet wird eine spezifische Produktion die im Bereich der Werte von System 3 liegt aufgrund der Baugleichheit der Module. Wie bereits zuvor beschrieben, traten zu Beginn der Versuchsphase vermehrt Zulaufprobleme in System 4 auf bzw. die regulierte Durchlaufmenge des Meerwassers durch die Entsalzungsstufen war nicht ausreichend, um eine kontinuierlichen Füllung der Entsalzungsstufen zu gewährleisten. Aus diesem Grund geben die gemessenen Werte die tatsächliche Effektivität von System 2 liegt an dem thermischen Speicher, der eine höhere Destillatproduktion über Nacht liefert.

Wird die Produktionsrate auf die Kollektorfläche bezogen, so ergeben sich für die Systeme 1-3 die in Tabelle 1 aufgelisteten spezifischen Kondensationsraten. Zu erwähnen ist, dass es sich bei diesen Systemen noch um Systeme vor ihrer Optimierung handelt.

Das Vakuumröhrensystem (System 3) hat mit ca. 18 Liter/m² Tag die höchste spezifische Kondensationsrate, gefolgt vom System 2 mit etwa 12 Liter/m² Tag.

System	Kollektorfläche	Kondensationsrate	Spez. Kondensationsrate
	in m²	in Liter/Tag	in Liter/m ² Tag
1. Flachk. + Speicher	5,2	60	11,5
2. Flachkollektor	5,2	40	7,6
3. Vakuumröhren	2,2	38	17,2

Tabelle 1: Spezifische Kondensationsraten

3.4 Destillatproduktion in Abhängigkeit von der Einstrahlung

Die Abhängigkeit von Destillattagesproduktion und Einstrahlung für die Systeme 1, 2 und 4 ist in Abbildung 28 dargestellt. Unterschieden wird ein Betrieb der Anlage mit Süßwasser zu Testbeginn und anschließend mit Meerwasser. Bei einer Einstrahlung von etwa 8 kWh/m²d wird mit System 1 (Süßwasserbetrieb) eine Produktionsrate von etwa 60 kg erreicht. System 2 liefert bei gleicher Einstrahlung ein Destillatoutput von 40 kg. Während der Versuchsphase sind teilweise alte Stufen durch neue Stufen mit einem höheren Stufenrand ersetzt worden.



Abbildung 28: Abhängigkeit Destillatproduktion- Einstrahlung System 1, 2 und 4

In Abbildung 29 ist für System 2 der Vergleich der Destillatproduktion aus Süßwasser und Meerwasser herausgestellt. Es wird deutlich, dass die Produktionsraten mit Salzwasser etwa

20%-30% geringer ausfallen als die Produktion bei Süßwasserbetrieb. Der simulierte Kurvenverlauf ergibt sich aus einer Berechnung von Christoph Müller entwickeltem Rahmen Simulationsprogramm auf Matlab-Basis im seiner Doktorarbeit. Das Simulationsprogramm ermöglicht die Abschätzung der Produktionsrate als Funktion der solaren Einstrahlung für verschiedene Kollektorenarten und Betrieb der Entsalzungsanlagen mit unterschiedlicher Stufenanzahl. Der Vergleich der Destillatproduktion zeigt eindeutig, dass Unterschiede in den Produktionsraten der Betriebsphasen mit Süß- und Meerwasser vorliegen. Die Destillatmengen aus der Testphase mit Süßwasser konnten beim Betrieb der Entsalzungsanlagen mit Meerwasser nicht bestätigt werden. Eine Abhängigkeit der Destillatproduktion von der Salzkonzentration des Wassers, welches die Kondensationsstufen durchfließt, ist eindeutig ersichtlich.



Abbildung 29: Abhängigkeit Destillatproduktion- Einstrahlung System 1 und 2

3.5 Einfluss der Salzkonzentration auf die Produktionsrate

Labormessungen im Solar-Institut Jülich zeigen bei gleichen Randbedingungen einen Produktionsabfall beim Einsatz von Salzwasser von ca. 10%. Die Messungen in Gran Canaria zeigen jedoch einen Abfall von etwa 20 % gegenüber der Produktionsrate bei Süßwasser.

Aus Abbildung 30 kann der Einfluss des Salzgehaltes auf die Produktionsleistung an Destillat entnommen werden.



Abbildung 30: Laboruntersuchung zum Einfluss des Salzgehaltes auf die Destillatproduktion

Abbildung 31 verdeutlicht die Einwirkungen steigender Salzkonzentration auf den Siedepunkt von Salzlösungen. Steigt der Massenanteil bzw. der Salzgehalt in einer Lösung an, kommt es zu einer entsprechenden Erhöhung des Siedepunktes der Lösung.

Bei Lösungen von nicht flüchtigen Substanzen, zum Beispiel Salzen, verändert sich der Dampfdruck der Lösung. Durch das Lösen von Kochsalz verringert sich der Dampfdruck verglichen mit reinem Wasser. Dieser Dampfdruckerniedrigung bei konstanter Temperatur und Bezugsdruck entspricht eine Siedepunkterhöhung. Ein erhöhter Siedepunkt der aufkonzentrierten Salzwasserlösung in den unteren Stufen der Destille, bzw. eine Partialdruckerniedrigung bei gleicher Temperatur im Vergleich zum Süßwasser, führt dementsprechend zu geringeren Destillatproduktionsraten.

Dies bestätigten die Versuchsergebnisse der Destillatproduktion aus Süß- und Salzwasser bei gleichen Einstrahlungsbedingungen.



Abbildung 31: Siedepunkterhöhung in Abhängigkeit vom Salzgehalt wässriger Lösungen

3.6 Optimierungsschritte bei den Anlagen mit Edelstahlkondensatorflächen

Der erste Feldtest mit den Edelstahlkondensationsflächen hat gezeigt, dass eine Optimierung der Entsalzungsanlagen notwendig ist. Die Problemstellungen haben zu konstruktiven Veränderungen der Entsalzungsanlagen geführt. Drei Optimierungen werden hier im Einzelnen vorgestellt.

1. Salzwasserübertritt Stufenrand

Die Versuchsphase hat verdeutlicht, dass es vermehrt zu einem Salzwasserübertritt am Stufenrand der Kondensationsstufen (Verdampferstufen) gekommen ist. Aus diesem Grund sind neue Kondensationsstufen mit einer 5 mm höheren Randbegrenzung gefertigt worden. Zusätzlich erleichtert ein höherer Stufenrand die Handhabung der Kondensationsstufen beim Einbau in das Entsalzungssystem. Beim alten Stufenmodell ist eine ebene Ausrichtung der Kondensationsstufen im Entsalzungsbereich ein langwieriger Prozess. Schon die geringste Schräglage der Kondensationsstufe führte zu einem Salzwasserübertritt über den zu flach dimensionierten Randbereich.

2. Verteilerrohr Salzwasserzulauf

Die Erkenntnisse aus den Versuchen haben gezeigt, insbesondere im Hinblick auf die Destillatproduktionsraten und Ablagerungen in den Stufen, dass ein zuverlässiger, kontinuierlicher und gleichmäßig auf alle drei Verdampfersäulen verteilter Meerwasserzufluss für einen störungsfreien Betrieb der Entsalzungsanlagen Grundvoraussetzung ist. Dies kann über ein höheres Druckniveau des Meerwasserzuflusses erreicht werden. Die in Abbildung 32 dargestellte neue Zulaufkonstruktion ermöglicht durch drei gleiche Ausflussöffnungen eine geregelte Meerwasserzufuhr. Dadurch kann ein Trockenlaufen der Entsalzungsstufen verhindert werden.



Abbildung 32: Neue Zulaufkonstruktion Meerwasser

3. Rostbildung Entsalzungsanlage

Abbildung 33 und Abbildung 34 verdeutlichen die Rostbildung sowohl im Außenbereich der Anlage als auch auf den Verdampferstufen nach 6 Wochen Betriebszeit. Die Rostbildung zum Beispiel auf den Abdeckhauben der Entsalzungsanlagen wird hauptsächlich durch den hohen Salzgehalt in der Luft verursacht. Ein Farbanstrich der Außenseite der Module bzw. ein Kunststoffdeckel als Abdeckung verhindert dies. Obwohl beim Bau der Module Edelstahl verwendet wurde, kann die Rostbildung nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Problematisch zeigte sich auch der Lochfrass an einzelen Stufe. Daher wurde über eine bessere Edelstahlqualität bzw. alternative Materialien nachgedacht. Im Rahmen der Aufstockung wurde die Suche nach alternativen Materialen verstärkt.





Abbildung 33: Rostbildung an Außenabdeckung

Abbildung 34: Rostbildung in den Stufen

3.7 Untersuchungen der Trinkwasserqualität im Langzeitbetrieb plus Dekontaminationsuntersuchungen

Trinkwasseruntersuchungen Feldtest Spanien:

Die Qualität des Produktwassers ist von großer Bedeutung. Eine den Europäischen Standards entsprechende Produktwasser bzw. Trinkwasserqualität ist Vorraussetzung für eine Vermarktung der Entsalzungssysteme. Der Begriff Trinkwasser bezeichnet ein Wasser, das für den menschlichen Verzehr vorgesehen ist. Es muss daher lebensmittelhygienischen Anforderungen gerecht werden.

Wesentliche Anforderungen an die Trinkwasserqualität nach europäischer und nationaler Gesetzgebung sind:

- Trinkwasser muss frei von krankheitserregenden Mikroorganismen und gesundheitsschädlichen Stoffen sein.
- Trinkwasser soll klar und farblos sein, keine Trübung aufweisen und keinen unangenehmen Geruch oder Geschmack haben

Das Instituto Tecnologico de Canarias (ITC) verfügt über ein eigenes Labor für Wasseranalysen.

Regelmäßige Laborwasseranalysen (9 Probeentnahmen in dem Zeitraum des Feldtests) von Meerwasser, Destillat und Sole dokumentierten über den Testzeitraum die Trinkwasserqualität. Die Analysen wurden durchgeführt nach Anleitung der Europäischen Trinkwasserrichtlinie bzw. der deutschen Trinkwasserverordnung. Die Analyseergebnisse in Tabelle 2 und Tabelle 3 zeigen die Parameter der ersten Wasseranalyse im August 2005, Tabelle 4 im Vergleich die Analyseergebnisse im Oktober 2006. Die Ergebnisse zeigen, dass die Trinkwasserqualität des Destillates den rechtlichen Anforderungen entspricht und es als Trinkwasser zur Verfügung gestellt werden kann. Gegebenfalls ist eine Anreicherung mit Mineralien notwendig, da eine Verbreitung der Anlagen eher in Regionen vorgesehen ist, in denen die Bevölkerung in der Regel nicht über eine ausgewogene Ernährung verfügt.

$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Einheit	Ch physical Par.	Seawater	Distillate	Law (EU)	
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		рН	7.3	7.5	6, <u>5- 9</u> ,5	
NTUTrübung $<$ 1 $<$ 1 $1,5$ mg/lBicarbonate146.4 6.1 mg/lMagnesium 1372 $1,8$ 50 mg/lKalium 422 $<$ 0,1 12 mg/lNatrium 11300 $12,2$ 150 mg/lCalcium 674 $<$ 0,1 400 mg/lCalcium 674 $<$ 0,1 400 mg/lFluoride $1,55$ $<$ 0,1 $0,5$ mg/lFluoride $1,55$ $<$ 0,1 $1,5$ mg/lChloride 20874 22 250 mg/lSulfate 3290 $<$ 1,0 240 mg/lSulfate $33,6$ $1,65$ mg/l mg/lBor $4,6$ $<$ 0,5 1	µS/cm	Conductivity	53800	72	2000	
mg/l Bicarbonate 146.4 6.1 mg/l Magnesium 1372 1,8 50 mg/l Kalium 422 < 0,1	NTU	Trübung		< 1	1,5	
mg/l Magnesium (1372) 1,8 50 mg/l Kalium 422 < 0,1	mg/l	Bicarbonate	146,4	6.1		
mg/l Kalium 422 < 0,1 12 mg/l Natrium 11300 12,2 150 mg/l Calcium 674 < 0,1	mg/l	Magnesium	(1372)	1,8	50	
mg/l Natrium 11300 12,2 150 mg/l Calcium 674 < 0,1	mg/l	Kalium	422	< 0,1	12	
mg/l Calcium 674 < 0,1 400 mg/l Ammonium < 0,05	mg/l	Natrium	11300	12,2	150	
mg/l Ammonium < 0,05 < 0,1 0,5 mg/l Fluoride 1,55 < 0,1	mg/l	Calcium	674	< 0,1	400	
mg/l Fluoride 1,55 <0,1 1,5 mg/l Chloride 20874 22 250 mg/l Sulfate 3290 < 1,0	mg/l	Ammonium	< 0,05	< <u>0,1</u>	0,5	
mg/l Chloride 20874 22 250 mg/l Sulfate 3290 < 1,0	mg/l	Fluoride	1,55	€ 0,1	(1,5)	
mg/l Sulfate 3290 < 1,0 240 mg/l Nitrate 3 < 1,0	mg/l	Chloride	20874	22	250	
mg/l Nitrate 3 < 1,0 50 mg/l Silicate 33,6 1,65 mg/l Bor 4,6 < 0,5	mg/l	Sulfate	3290	< 1,0	240	
mg/l Silicate 33,6 1,65 mg/l Bor 4,6 < 0,5	mg/l	Nitrate	3	< 1,0	50	
mg/I Bor 4,6 < 0,5 1	mg/l	Silicate	33,6	1,65		
	mg/l	Bor	4,6	< 0,5	1	
mg/I TOC 2,8 5	mg/l	TOC		2,8	5	

Tabelle 3: Mikrobiologische Analyseergebnisse Destillat, Sole un	d Meerwasser
--	--------------

Einheit	Mircrob. Parameter	Seawater	Distillate	Law (EU)
ufc/100 ml	Coliforme	0	0	0
ufc/100 ml	E. coli	0	0	0
ufc/100 ml	Fäkalstreptokokken	0	0	0
ufc/100 ml	Pseudomonas	detected	0	0
	Total Count			
ufc/ml	Koloniezahl 22°	107	6	100
	Total Count			
ufc/ml	Koloniezahl 37°	88	5	20
mg/l	Chlorophyll	1,19	not detected	

11	Ol and a factor	Distillate	11	Missishishama	·
Units	Chemistry	Distillate	Units	Microbiology	
	pH	7,7	ufc/100 ml	Total coliforms	Absence
µS/cm	Conductivity	65	ufc/100 ml	E. coli	Absence
NTU	Turbidity	<1,0	ufc/100 ml	Intestinal enterococci	Absence
mg/l	Bicarbonate	<5	ufc/100 ml	Pseudomonas	Absence
mg/l	TDS	30	ufc/ml	Plate counts 22°	1
mg/l	Suspended Solids	<2	ufc/ml	Plate counts 37°	3
mg/l	Magnesium	3,3	mg/l	Chlorophyll	ND
mg/l	Potassium	<1,0			
mg/l	Sodium	7,7		ND=not detected	
mg/l	Calcium	<1,0			
mg/l	Ammonia	<0,1			
mg/l	Fluoride	<0,1			
mg/l	Chloride	20,6			
mg/l	Sulphate	<1,0			
mg/l	Bromide	<1,0			
mg/l	Nitrate	<1,0			
mg/l	Silica	1,9			
mg/l	Boron	<0,5			
mg/l	ТОС	<1,0			
mg/l	Copper	<0,01			
mg/l	Zinc	0,015			
mg/l	Iron	<0,02			
µg/l	Strontium	<10			

Tabelle 4: Wasseranalyseergebnisse zum Abschluss des Feldtestes Oktober 2006

3.8 Übertragung der Ergebnisse auf größere Anlagen

Die Erfahrungen aus dem Feldtest in Spanien haben gezeigt, dass die mit Flachkollektor betriebenen Systeme teilweise einen zu hohen Leistungsinput für die vorhandene Verdampferfläche aufweisen. Aufgrund dieser Erfahrungen wurde für den Feldtest in Brasilien ein Edelstahlsystem entwickelt, welches bei gleicher Kollektorfläche eine doppelt so große Verdampfergrundfläche aufweist, um somit einen größeren Destillatoutput zu erreichen. Abbildung 35 zeigt die Edelstahlvariante mit verdoppelter Verdampferfläche auf dem Testgelände des SIJ. Diese Destille wurde beim Feldtest in Brasilien eingesetzt.

Weiter durchgeführte Laboruntersuchungen und neue Erfahrungen mit dem veränderten Design (vgl. AP.7; AP.8) wurden bei der Planung einer Großanlage mit berücksichtigt. Durch die Umstellung des Arbeitspaketes aufgrund eines neuen Anlagendesigns (Kunststoffvariante) ist der Bau einer Schaumprofildestille (PU) erfolgt. Die Verdampferfläche bzw. Kondensationsfläche pro Stufe betrug 2m² (siehe Abbildung 36). Nähere Angaben über diese Variante sind unter Arbeitspunkt AP 7; AP.8 zu finden.



Abbildung 35: Versuchsdestille (Edelstahlvariante 2 m²)



Abbildung 36: Versuchsdestille (PU-Schaumprofilvarinate 2m²)

AP 2.: Stufenweise Untersuchungen zur Wärmerückgewinnung durch Rückspeisung der Wärme aus dem Kondensat oder der Sole

Eine zusätzliche Wärmerückgewinnung aus dem Produkt- und Solestrom ist im Labor in Versuchen genauer betrachtet worden, d.h. die Erwärmung des Meerwasserzulaufs über Rückgewinnung der sensiblen Wärme. Stellvertretend ist in Abbildung 37 der GOR- Wert einer 7-stufigen und einer 14-stufigen Anlage für verschiedene Heizleistungen gegeben.



Abbildung 37: Abhängigkeit GOR-Wert von Heizleistung und verschiedenen Zulauftemperaturen (Edelstahlvariante)

Bei einer Vorwärmung von 70°C lässt sich der GOR- Wert gegenüber einer 7-stufigen Anlage ohne Vorwärmung um ca. 10 % erhöhen. Eine ähnliche Verbesserung lässt sich für die Destillatproduktion feststellen (Abbildung 38). Eine Leistungssteigerung ist zwar zu erkennen, jedoch muss der Zugewinn mit dem erhöhten Konstruktionsaufwand abgewogen werden. Ein deutlich besseres Ergebnis wird mit 14 Stufen erreicht. Hier kann durch Vorwärmung der GOR- Wert von 4 auf 5 um 25% erhöht werden. Im Vergleich zu den 7 stufigen Anlagen entspricht dies einem um 50 Prozent verbesserten Energieeinsatz. Das Produktionsmaximum von 8-9 kg/m²h wird bei ca. 1100 Watt/m² erreicht, während für die gleiche Produktion einer 7 stufigen Anlage 1500 Watt/m² nötig sind.

Durch Vorwärmung des Zulaufs wird das Temperaturniveau der oberen Destillationsstufen angehoben. Dadurch steigt die Produktion der oberen Stufen im Vergleich zu Anlagen ohne Vorwärmung an. Die Temperaturdifferenz zwischen den Stufen nimmt damit jedoch gleichzeitig ab. Damit sinkt auch die Produktionsrate der unteren Stufen. Im Mittel wirkt sich die Vorwärmung jedoch positiv aus. Besonders bei Erhöhung der Stufenanzahl fällt der Nachteil der kleineren Produktion pro Stufe weniger ins Gewicht.



Abbildung 38: Destillatproduktion Edelstahlvariante in Abhängigkeit von der Heizleistung für verschieden Zulauftemperaturen

AP 3.: Instationäre Wärmerückgewinnung mit Hilfe der gesammelten Wärmekapazität aus Sole und Kondensat für den Nachtbetrieb

Die Verbesserung der Entsalzungsrate der Prototypen bzw. der neuen Anlagen durch Speicherung der Abwärme aus dem Produkt- und Solestrom für den Nachtbetrieb wurde bei einem Entsalzungssystem (System 1) umgesetzt. Durch den größere Destillatspeicher von 100 Litern stieg die Destillatnachproduktion gegenüber den anderen Systemen (Speichervolumen ca. 30 Liter) um 10-20 Liter an (siehe Abb. 25). Besonders beim Bau größerer Entsalzungsanlagen stellt die Wärmerückgewinnung aus der Abwärme des Soleund Destillatstromes eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Trinkwasserproduktion dar.

AP 4.: Reduzierung der Herstellungskosten durch optimales Design und moderne Produktionstechnik

Die Reduzierung der Herstellungskosten der Prototypen und künftiger Anlagen durch optimiertes Design und moderne Produktionstechnik war Teil der Untersuchungen am Solar-Institut Jülich. Dies geschah in enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Herstellerfirmen aus dem Metall und Kunststoffbereich. Durch die Preisentwicklung von Edelstahl, Aluminium und Kupfer (Verdopplung des Marktpreises in den letzten 3 Jahren) forschte das SIJ vermehrt im Bereich der Kunststoffe (PU-Schaum und PVC) als Baustoff für die Entsalzungsanlagen, um die Systeme unabhängig von der Edelstahlpreisentwicklung preiswert fertigen zu können. So wurde mit einem Kunststoff- Profilhersteller ein optimales Seewasser und temperaturbeständiges PU-Schaumprofil entwickelt. Das Kunststoffprofil übernimmt die Halte- und Tragefunktion für die Kondensationsstufen und auch die Wärmeisolierung des Entsalzungssystems nach außen. Ein Ausschnitt des geschäumten Profils zeigt die Abbildung 39.



Abbildung 39: Ausschnitt aus dem Schaumprofilrahmen der MSD-Anlage

Dieses Profil übernimmt sowohl die Wärmeisolation des Destillationsbereiches nach Außen, die Trägerfunktion für die Kondensationsstufen und die Sammlung und die Ableitung des Kondensates. Das Schaumprofil mit integrierter Ablaufrinne lässt den Bau einer Großanlage einfacher verwirklichen, da die Profile aneinandergesetzt werden können, und somit der Verdampfer bzw. Kondensationsbereich beliebig vergrößert werden kann.

Eine weitere Optimierung stellen die kapillarstrukturierten Kondensationsflächen dar. Diese werden ausführlicher in Arbeitspunkt 7 beschrieben. Deutlich wird in Abbildung 40, dass der neue Stufenaufbau im Vergleich zur Edelstahlvariante vereinfacht ist und auf Edelstahl (vgl. Randbereich) weitestgehend verzichtet werden kann.



Abbildung 40: Vergleich von alter und neuer Kondensationsfläche (schematisch)

AP. 5: Untersuchung der Trinkwasserqualität im Langzeitbetrieb plus Dekontaminationsuntersuchungen

Die Trinkwasseruntersuchungen und Dekontaminationsuntersuchungen werden in diesem Arbeitspunkt nicht aufgeführt. Die Analyseergebnisse werden den entsprechenden Arbeitspunkten direkt zugeordnet, d.h. die Testergebnisse der Untersuchungen in Spanien, Indien und Brasilien den entsprechenden Kapiteln.

AP. 6: Feldtest Indien: 2 Anlagen (Edelstahlvariante); Dekontamination von mit Fluoriden belastetem Grundwasser in Zusammenarbeit mit dem indischen Partner "The Energy and Resources Institute" (TERI) Indien

In Zusammenarbeit mit dem indischen "The Energy and Resources Institute" (TERI), Bangalore, wurde eine Bedarfsanalyse für das MSD- Entsalzungssystem im Rahmen einer Diplomarbeit an der RWTH- Aachen durchgeführt. Erhebliche gesundheitliche Probleme bereitet die Trinkwasserversorgung im Bundesstaat Karnataka durch natürliche Fluoridkontamination.

Das aktuelle Problem in Indien ist nicht der Wassermangel im Allgemeinen, aber der Mangel an sauberem Wasser ohne bakterielle und chemische Verunreinigung. Bakterielle Verunreinigung und die natürlich bedingten Fluoridkonzentrationen oberhalb des gesetzlichen Grenzwertes und erhöhte Nitratwerte sind Grund für die besorgniserregende Wasserqualität. Die folgende Abbildung 41 zeigt wie groß der Anteil der durch bestimmte Wasserinhaltsstoffe beeinflussten Gebiete im indischen Bundesstaat Karnataka ist, auch bekannt durch die IT- Metropole Bangalore.



Abbildung 41: Wasserkontamination im indischen Bundesstaat Karnataka

Abbildung 42 zeigt die typischen Krankheitsbilder, die so genannte Zahnfluorose und Gelenkfluorose, hervorgerufen durch erhöhte Fluoridaufnahme über Trinkwasser bzw. Nahrung.



Abbildung 42: Gesundheitliche Beeinträchtigung durch kontaminiertes Grundwasser (Fluoride)

Die Mehrstufendestillen wurden im Mai 2007 zusammen mit dem Projektpartner "The Energy and Resources Institute" (TERI) in Bangalore, Indien, in einem 500 km nördlich liegenden Dorf unter realen Nutzerbedingungen zur Trinkwassergewinnung aus natürlich kontaminiertem Grundwasser (Fluoride) betrieben. Die Kosten für das Indien Projekt wurden vom Projektpartner Thames Water übernommen. Im September 2007 fand in Bangalore ein Workshop mit dem Schwerpunktthema Meerwasserentsalzung und Wasseraufbereitung mit unserer Beteiligung statt. Von der indischen Seite zeigte sich großes Interesse an einer Lizenznahme für den Bau der Entsalzungssysteme für den indischen Markt.



Abbildung 43: Entsalzungssystem zur Trinkwassergewinnung aus mit Fluoriden belastetem Grundwasser im Dorf Nidasesi, Südindien



Abbildung 43 zeigt den Aufbau der Anlage mit Vakuumröhren in Nidasesi. Die Kondensationsfläche ist aus Edelstahl und beträgt 1 m² pro Stufenebene. Abbildung 44 zeigt eine Nahaufnahme der Mehrstufendestille mit Erläuterungshinweisen für die Dorfbevölkerung, aus welcher Leitung das Trinkwasser und das aufkonzentrierte Grundwasser die Anlage verlässt. Zusätzlich erfolgte für die Betreiber der Anlage eine Einweisung in Funktion, Betrieb und Bedienung, damit die Anlage auch von der Dorfbevölkerung genutzt bzw. auf Dauer eingesetzt wird. Die Akzeptanz gegenüber dieser Technologie bei der Bevölkerung ist ein wichtiger Punkt bei allen durchgeführten internationalen Projekten und Voraussetzung für ein Gelingen des Vorhabens.



Abbildung 44: Mehrstufendestille mit Erläuterungshinweisen

Folgende Tabelle zeigt die Analyseergebnisse der in Indien im Auftrag von TERI durchgeführten Wasseranalysen. Eine Betrachtung der gemessenen Parameter für Fluoride im Rohwasser zeigt, dass der Grenzwert überschritten wird, nach der Behandlung des Wassers in der Mehrstufendestille der Fluoridgehalt im Destillat kleiner der Nachweisgrenze des entsprechenden Analyseverfahrens ist.

Tabelle 5: Wasseranalyse Indien: "Visit report (Testing of Water Quality and to rectify the feeding mechanism of Solar Still) on Nidasesi village (15th - 16th June 2007)"

SN	Parameter	Unit	Raw water	Waste	Distilled	Requirement	Permissible
				brine	water		limit
1	PH		8	7-8	7	6.5 – 8.5	no relaxation
2	Hardness	ppm	200	50	10	300	600
3	Fluoride	ppm	Above 2.0	Above 2.0	0.0	1.0	1.5
4	Nitrate	ppm	45	45-100	Less than 10	45	no relaxation
5	Residual	ppm	Less than	Less than	Less than 0.2	0.2	0.2
	chlorine		0.2	0.2			
6	Iron	ppm	Less than	Less than	Less than 0.3	1	1
			0.3	0.3			

Water analysis: Water analysis was carried out for raw water, distilled water and brine from Solar Still by using water analysis kit (Ltek-kit)¹*. Tested parameters are given below;

Der Einsatz der Mehrstufendestille eignet sich somit sowohl für die Entsalzung von Meer-Brackwasser als auch zur Dekontamination von fluoridbelasteten Wasser. Andere kontaminierte Flüssigkeiten lassen sich nach dem gleichen Verfahren behandeln, weitere Untersuchungen sind in Zukunft eingeplant.

Es muss jedoch bedacht werden, dass diese Kleinanlagen nur für den familiären bzw. im dörflichen Bereich einsetzbar sind. Das Problem der großflächigen Grundwasserkontamination mit Fluoriden ist bei der dortigen Bevölkerungsdichte und dem damit verbundenen hohen Trinkwasserverbrauch nur mit großen Wasseraufbereitungsanlagen lösbar, z.B. wäre die Installation von Umkehrosmose (RO) Anlagen eine Möglichkeit.

¹ **Ltek-kit:** The kit consists of different chemicals (liquids) and reagents (in the form of tablets). The liquids/tablets of prescribed quantity of water samples are mixed. Different colours appear. These colours are then compared with standard colour charts. This helps in arriving at approximate value of a given parameter. The parameters that can be measured are Turbidity, pH, Hardness, Chloride & Salinity, Residual Chlorine, Iron, Nitrate and Fluoride. The results are only indicative and cannot substitute the results obtained with the latest electronic equipments and established laboratory technologies.

Zusammenfassung folgender Arbeitspunkte AP.7, AP.8 und AP.9:

- AP. 7: Materialuntersuchungen: Hydrophile Folien; Mikrostrukturierte Kapillarfolien;
- AP. 8: Bau von 2 mehrstufigen Kapillarstufenanlagen
- AP. 9: Untersuchung der Destillatproduktion an Foliensystemen in Abhängigkeit der Stufenzahl (elektrisch)- Möglicher Betrieb als Hybridsystem

Folgende 3 Arbeitspunkte sind in den kommenden Absätzen zusammengefasst, da es inhaltliche Überschneidungen gibt und eine gemeinsame Darstellung der Arbeitspunkte das neue System, PU- Schaumprofilrahmendestille mit kapillarer Kondensationsfläche, im Gesamten besser beschreibt.

Die Laboruntersuchungen und Feldtestuntersuchungen mit Edelstahlkondensations-Verdampferstufen sind abgeschlossen worden. Die Ergebnisse nach durchgeführter Optimierung der Anlagen sind zufrieden stellend (siehe AP.1). Durch den starken Anstieg des Edelstahlpreises folgte somit ein Anstieg der Kosten für Produktion bzw. Fertigung der Entsalzungsanlagen. Diese Umstände führten zur Überlegung, andere Materialkomponenten für die Systeme einzusetzen, welche den Anlagenpreis verringern und natürlich einen geringeren Wasserentstehungspreis nach sich ziehen.

Schwerpunkt der neuen Untersuchungen sind die Versuche mit hydrophilen Kunststofffolien bzw. Folien-Flies-Kombinationen, gestützt durch eine Edelstahlgitterkonstruktion. Diese sollen die Kondensationsstufen aus Edelstahl ersetzen und durch eine geeignete Wahl von Materialien als Kondensationsoberfläche die Effizienz der Anlage weiter steigern. Ein Versuchsaufbau zur thermischen Langzeitstabilität der Folien- Gitter Kombination wurde eingesetzt.

Es wurden zwei größere Laboranlagen mit einer Kondensationsgrundfläche von 1 bzw. 2 m² mit elektrischer Heizung als Energiequelle aufgebaut. Die Versuche bestätigen die Funktionstauglichkeit dieser kapillarstrukturierten Kondensationsflächen. Abbildung 46 zeigt die zuvor in Arbeitspunkt 4 dargestellten Kunststoffrahmenprofile (gelber Rand), welche die Kondensationsfläche mit kapillarstrukturierter Oberfläche einschließen. Weitere Untersuchungen befassten sich mit der Temperatur- und Feuchtigkeitsbeständigkeit von Hartschaum (PU- Rahmenprofilen) Stufenrahmen sowie deren Eignung im Trinkwasserbereich.

Diese Rahmen führen in Kombination mit den Kapillarfolien zu einer Kostenreduzierung und einer Vereinfachung des Anlagenbetriebes, hervorzuheben ist hier der Verzicht auf Schweißarbeiten bei dem Bau der Anlagen. Abbildung 45 zeigt den Aufbau der neuen Variante mit Pu-Rahmenprofil und Hydrophiler Kondensationsfolie und Streckgitter. Das Streckgitter übernimmt die Tragefunktion der Kondensationsfläche und gemeinsam mit der Folie die hydrophile Eigenschaft der Kondensationsfläche. Die Stufen werden bei dieser Variante aufeinander gestellt.



Abbildung 45: Prinzip der Anlage mit Ganzrahmenprofilen

Abbildung 47 zeigt die Umsetzung des neuen Anlagendesigns, Entsalzungssystem mit 7 Kondensationsstufen (Outdoorversuch). Die Versuche zeigten bei einem Betrieb mit 7 Stufen bessere Ergebnisse in Hinblick auf Destillatproduktion und Wärmeisolation im Vergleich zu den Edelstahlsystemen, abgesehen von den deutlich geringeren Produktionskosten. Die Anlagen liefern im Vergleich mit einer einfachen "Solaren Destille" eine um den Faktor 4-6 höhere Destillatproduktion.



Abbildung 46: Versuchsanordnung mit Kapillarfolien und Kunststoffrahmen



Abbildung 47: Versuchsanlage mit Kunststoffschaumprofil und kapillarstrukturierten Kondensationsflächen

Die folgenden Messergebnisse bzw. anlagenspezifischen Kennzahlen verdeutlichen die Eignung des neuen Entsalzungssystems mit kapillarstrukturierter Kondensationsfläche für den Einsatz zur Trinkwassergewinnung. Diese Messergebnisse ergeben sich aus den Untersuchungen der MSD- Anlage mit einer Kollektorfläche von 2,2 m² und einer Verdampfergrundfläche von 1m².

Tabelle 6: Messergebnisse der PU-Rahmendestille

•	Tägl. Produktionsrate:	37,6	Liter/Tag
• •	Globale Einstrahlung Nutzbare Energie Übertragene Energiemenge (η= 0,5)	5,98 13,2 6,6	kWh/m²d kWh/d kWh/d
• •	Spezifischer Energieverbrauch pro Liter Destillatproduktion / kWh Destillatproduktion / Kollektorfläche	0,17 5,7 17	kWh/Liter Liter/kWh Liter/m²
•	GOR- Wert: COP- Wert	3,7 4,3	-
•	Nachtproduktion:	17,3	Liter

Zusätzlich wurden Versuche an einer MSD- Anlage durchgeführt mit einer Verdampfergrundfläche von 2 m². Abbildung 48 zeigt dieses 2m² Verdampfergrundfläche MSD- System, aufgebaut auf dem Testgelände des SIJ.



Abbildung 48: MSD- Anlage – 2m² Verdampfergrundfläche

Aufgrund von geringer Einstrahlungswerte selbst in den Sommermonaten 2008 wurden die Versuchsreihen mit der Großdestille im Labor des SIJ durchgeführt.

In Abbildung 49 sind Messergebnisse der Indoorversuche mit der MSD-Anlage (2m²) dargestellt. Die stündliche Produktionsmenge von 16.00 – 17.00 Uhr bei einer eingebrachten elektrischen Energie von etwa 1,1 kWh ist im Abbildung dargestellt. Als Kondensationsfläche dient die kapillarstrukturierte Anordnung. Zum Zeitpunkt der Messung hatten sich quasistationäre Zustände eingestellt.



Abbildung 49: Destillatstundenproduktion mit Gitter und zwei Folien

BEU

Relevante Daten des Laborversuches:

Temperatur im Wärmespeicher :	95,2°C
Temperatur rechte Edelstahlwanne :	92,2°C
Temperatur linke Edelstahlwanne:	91,9°C
Gesamtdestillatmenge in einer Stunde:	6,739 Liter

Für die Destillatproduktion (Gitter / 2 Folien) zwischen 16.00 – 17.00 Uhr wurden folgende Kennzahlen und Wirkungsgrade ermittelt:

 $GOR = \frac{\sum_{1}^{7} m_{Dest.} \cdot \Delta h}{Q_{zu.el.}} = \frac{6,739kg \cdot 0,645 \frac{kWh}{kg}}{1,1kWh} = 3,95 \qquad COP = \frac{\sum_{1}^{7} m_{Dest.}}{m_{Dest.1Stufe}} = \frac{6,739kg}{1,341kg} = 5,0$

Diese Kennzahlen verdeutlichen erneut die Funktionstauglichkeit der neuen Kondensationsflächen. Im Vergleich zu den Edelstahlkondensationsflächen weisen diese einen höheren GOR- Wert (Maß für die Wärmerückgewinnung) auf. Eine höhere Destillatproduktion bei gleichen Energieinput und ungefähr gleichen Temperaturniveaus in den Anlagenstufen im Vergleich zu den Edelstahldestillenversuchen ist auf ein besseres Ablaufen des gebildeten Kondensats an der kapillarstrukturierten Kondensationsfläche zurückzuführen, Rücktropfverluste minimieren sich dadurch und mehr Kondensat wird zur Ablaufrinne weitergeleitet und verlässt als Trinkwasser die Anlage.

Abbildung 50 zeigt die Nachtproduktion mit Gitteraufbau von 17.00 –10.00 Uhr. Das Produktionsmaximum verlagert sich von den unteren Stufen nach oben. Stufe 5 müsste normalerweise eine Produktionsmenge zwischen Stufe 4 und Stufe 6 aufweisen. Ursache für die geringere Produktionsmenge könnte ein zu geringer Neigungswinkel bei den Kondensationsflächen sein.



Abbildung 50: Nachtproduktion der einzelnen Stufen mit Gitteraufbau

Weitere Messergebnisse mit dem Kunststoff Design sind unter Arbeitspunkt 10 aufgeführt. Beim Feldtest in Brasilien ist eine neue Variante der MSD- Anlage zum Einsatz gekommen.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass eine kapillarstrukturierte Kondensationsfläche sich für den Einsatz im MSD- System eignet. Zusätzlich sind auch Versuche mit behandelten nanobeschichteten Kondensationsflächen durchgeführt worden. Bei diesen Versuchen sind Edelstahlbleche auf der Kondensationsseite zuvor gereinigt und anschließend mit einer Nanobeschichtung behandelt worden, um gegebenenfalls ein gutes Kondensationsverhalten (speziell in Bezug auf die Reduzierung der Rücktropfverluste des Destillates) zu erreichen. Diese Annahme hat sich bei den Versuchen nicht bestätigt, eine Behandlung des Edelstahlbleches hat keine Steigerung in der Destillatproduktion erbracht im Vergleich zu den kapillarstrukturierten Kondensationsflächen.

In Abbildung 51 sind die verschiedenen Produktionsmengen der jeweiligen Testreihen dargestellt. Es ist eindeutig zu erkennen, dass der Aufbau mit Gitter und kapillaren Folien gute Ergebnisse liefert, was die Produktion, insbesondere die Nachtproduktion betrifft. Die aufgeführten Stundenwerte der durchgeführten Versuche ergeben sich aus einem stationären Versuchsbetrieb mit ungefähr gleicher Wärmezufuhr und Temperaturprofile in den verschieden Kondensationsstufen, um überhaupt einen Vergleich der drei unterschiedlichen Kondensationsflächen durchzuführen.



Abbildung 51: Stunden - / Nachtproduktion verschiedener Modifikationen im Vergleich

Die Nachtproduktion fasst die Destillatproduktion zusammen, die bei einem Outdoorversuch von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang produziert wird, bei einem Laborversuch ist der Zeitraum der Nachtproduktion nach Abschalten der Wärmequelle (Heizspirale) bis Anfahren der Anlage am nächsten Morgen. Das bedeutet, dass die Produktion des Destillates auch in den Nachtstunden weiterläuft ohne externe Energiezufuhr wie zum Beispiel die Kollektornutzwärme oder Heizenergie einer Heizspirale. Alleine Aufgrund der gespeicherten Wärmemenge in den mit Wasser gefüllten Verdampferstufen findet weiterhin ein Wärmestrom durch die Anlage von unten nach oben statt mit entsprechenden Kondensationsraten in den jeweiligen Stufen.

Ein Vergleich der Nachtproduktion der durchgeführten Versuche verdeutlicht eine etwa um den Faktor 2 höhere Nachtproduktion bei den kapillaren Oberflächen im Vergleich zu den mit Nanobeschichtung behandelten Oberflächen. Die Ergebnisse mit Nanobeschichtung zeigen eine geringere Destillatproduktion auf. Die nanobehandelten Oberflächen führen zu erhöhten Rücktropfverlusten, d.h. das Kondensat tropft von den Kondensationsoberflächen zurück in die Stufe anstatt in die Ablaufrinne zu fließen.

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit bzw. des Gesamtwirkungsgrades sind die GOR / COP – Werte zu vergleichen. Hier wird deutlich, dass der GOR – Wert sich bei der

Verwendung der Gitter etwa verdreifacht und der COP – Wert verdoppelt. Ebenso wie die GOR / COP – Werte, ist die Nachtproduktion für die Wirtschaftlichkeit von großer Bedeutung.

Im Vergleich: Die stündlichen GOR/COP – Werte der einzelnen Versuchsreihen.

- Kondensationsfläche: Edelstahlblech (einfach beschichtet) Test am 09.09.2008 / Gemessen um 12.00 Uhr GOR_{Stundenwert} = 1,52 COP_{Stundenwert} = 3,15
- 2. Kondensationsfläche: Edelstahlblech (Nanobeschichtung wiederholt aufgetragen)

Test am 20.09.2008 / Gemessen um 16.30 Uhr $GOR_{Stundenwert} = 1,24$ $COP_{Stundenwert} = 3,44$

3. Kondensationsfläche: Gitter / Folien - Aufbau Test am 02.10.2008 / Gemessen um 15.00 Uhr $GOR_{Stundenwert} = 3,9$ $COP_{Stundenwert} = 5,0$

In Abbildung 52, 53 und 54 sind die spezifischen Kondensationsraten für verschiedene Kondensationsflächen und die theoretisch mögliche Kondensationsrate logarithmisch in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur dargestellt. Diese Darstellungen ermöglichen bei ausreichend zu Verfügung stehenden Messdaten die Herleitung einer Funktion, welche die Destillatproduktion aufgrund der Kenntnisse der Stufentemperaturen und der entsprechenden Temperaturdifferenz ermitteln lässt. Es ist hier noch mal deutlich zu sehen, dass der Kondensationsstufenaufbau mit Gitter und hydrophilen Folie bei einer bestimmten mittleren Temperatur die größte spezifische Kondensationsrate aufzeigt.

Das unbehandelte Edelstahlblech zeigt die geringsten Kondensationsraten auf. Bei einem Kondensationswinkel von etwa 5°C betragen die Rücktropfverluste im Temperaturbereich von 50 °C etwa 90 % und mehr. Die folgende Tabelle zeigt den Vergleich der verschiedenen Kondensationsflächen für einen Kondensationswinkel von 10° und 5° und die theoretisch mögliche Kondensationsrate.

Die spezifische Kondensationsrate in g/m²h ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$du_R = du_{sp}(T_m) * (T_V - T_R)$$

Mit

 $m_{sp}(T_m) =$ spezifische Kondensationsrate bei der mittleren Temperatur T_m in g/m² h K

$$T_m = \frac{T_V + T_R}{2}$$

- T_V = Temperatur des Verdampfer in °C
- T_{K} = Temperatur des Kondensators in °C



Abbildung 52: Spez. Kondensationsraten für Edelstahlblech





Abbildung 53: Spez. Kondensationsraten für nanobeschichtetes Edelstahlblech



Abbildung 54: Spez. Kondensationsrate für Folien/ Streckgittervariante

Tabelle 7:	Vergleich der Spez. Kondensationsraten für verschiedene Kondensations-
	flächen bei verschiedenen Kondensationswinkeln

	10°	5°
	Kondensationswinkel	Kondensationswinkel
	Kondensationsrate	Kondensationsrate
Kondensationsfläche	g/m² h K	g/m² h K
Theoretische Kondensationsrate	115	115
UB (unbehandeltes Edelstahlbl.)	61	15
NF(Nanobeschichtetes Edelstahlbl.)	95	39
BF(Folien /Gitter- System)	86	86

• Stufentages- und Nachtproduktion bei einer 6 stufigen MSD- Anlage

In den zuvor dargestellten Abbildungen wurde die stündliche Destillatproduktion im stationären Betrieb einer 7-stufigen MSD- Anlage dargestellt. Die Nachtproduktion ergibt sich aus dem Zeitraum, indem die Heizspirale abgeschaltet ist und entspricht somit der Phase ohne Bestrahlung der Kollektoren.

Weitere Versuchsergebnisse sind in der folgenden Abbildung 55 zu sehen. Die Destillatproduktion einer 6- stufigen MSD- Anlage über einen Zeitraum von 24 Stunden (1Tag) ist dargestellt. Die Tageswerte ergeben sich sowohl aus instationärer Aufwärmphase, stationärem Betrieb nach der Aufheizphase und instationärem Betrieb nach Abschalten der Heizspirale. Die Tagesproduktion in den unteren Stufen 1,2 usw. ist höher als in den oberhalb liegenden Stufen aufgrund des höheren Temperaturniveaus in der Betriebsphase und entsprechend einhergehenden Partialdruck und Feuchtegehalt in der Luft. Für das 6-stufige System ist ein klares Gefälle in der Produktion von Stufe 1 bis Stufe 6 zu sehen. Die Nachtproduktion verhält sich weitestgehend diesem Trend entgegengesetzt, wie bereits in Abbildung 48 genauer erläutert. Die Nachtproduktion beläuft sich auf ca. 30% der gesamten 24 Stunden Produktion. Aufgrund des Wärmestroms der Anlage von unten nach oben und dem Temperaturunterschied zwischen den oberen Stufen und der Umgebung ergibt sich

eine erhöhte Kondensationsrate. Der GOR- Wert liegt bei ca. 3,3 bei einer 6- Stufigen Anlage, eine weiterer Stufenaufsatz würde die Produktion und entsprechend den GOR- Wert bei gleichem Energieinput erhöhen.



Abbildung 55: Destillatproduktion einer 6- stufigen Anlage

Abbildung 56 zeigt die Stundenproduktion der einzelnen Stufen im stationären Zustand der 6- stufigen Anlage. Die Summierung der Stundenwerte der einzelnen Stufen führt zu einer Destillatproduktion von ca. 10 kg/ 2m²h -> 5kg/m²h. Die Stufenwirkungsgrade werden kleiner von Stufe 1 nach Stufe 6 aufgrund der Wärmeleitungsverluste der Kunststoffstufen und der erhöhten Rücktropfverluste in den oberen Stufen. Im stationären Betrieb ist ein deutliches Temperaturgefälle vom Speicherbecken zur 6 Stufe zu erkennen, bedingt durch die zugeführte Wärmeenergie im Speicherbecken durch die Heizspirale.



Abbildung 56: Stufenwirkungsgrad, Produktion und Stufentemperatur der MSD- Anlage

Möglicher Betrieb als Hybridsystem

Theoretische und praktische Abschätzungen ergeben, zum Beispiel bei Betrieb der Anlagen im Labor mit einer Heizspirale als Wärmequelle, dass mit dem neuen Anlagendesign bei Dauerbetrieb, sich die Tagesproduktion in etwa verdreifacht. Bei größerer Auslegung der Anlagen kann ein Hybridbetrieb, die MSD Anlage gekoppelt mit Wind (Strom für Heizbetrieb) und Sonne je nach Standort sinnvoll sein.

Labormessung:

Die theoretische Tagesproduktion (24 Stunden) bei Verwendung einer Heizspirale im Speicherbereich des neuen MSD Designs (Kondensationsfläche- Gitter Folienkombination) ergibt bei einer Verdampfergrundfläche von 2m² folgendes Resultat:

 $m_{theoretisch,24h_{Gitter/2 Folien}} = 24h$ X 8,06 kg/h =193,4kg entspricht ca. 193,4*Liter*

Der gewählte Stundenwert ergibt sich aus den Messungen einer siebenstufigen Anlage im stationären Zustand. Die Tagesproduktion erreicht ca. 200 Litern.

AP.10: Feldversuche in Brasilien

1. Feldtest in Brasilien

Aufgrund der thematischen Änderung des Arbeitsprogrammes konnte der Feldtest erst im September 2007 beim Projektpartner Universidade Federal do Cearà (UFC), Fortaleza, Brasilien, beginnen. Erstmalig wurde das neu entwickelte Entsalzungssystem mit kapillarstrukturierten Kondensationsflächen getestet (siehe Beschreibung AP.7, 8, 9).

Des Weiteren war eine Edelstahl Destille mit einer Kondensationsflächegrundfläche von 2m² im Einsatz. Diese wurde aufgrund der Erfahrungen des Feldtest in Spanien gefertigt (vgl. AP1).

Zwei weitere optimierte Anlagen aus Gran Canaria werden als Vergleichssysteme mit vermessen. Die Anlagen werden zuerst mit Süßwasser, später mit Salzwasser getestet.



Abbildung 57: Standort der Entsalzungsanlage in Fortaleza, Brasilien

Der komplette Aufbau der vier Entsalzungsanlagen ist in Abbildung 58 dargestellt. Während des Feldtests wurden viele Veränderungen vorgenommen. Speziell die Entsalzungseinheit der MSD- Anlage (System 1, Anlage im Vordergrund) wurde mehrmals umgebaut aufgrund verschiedener Versuchsdurchführungen mit dem neuen Design. Ausgerichtet sind alle Anlagen nach Norden.



Abbildung 58: Kompletter Aufbau der vier Entsalzungsanlagen (1. Feldtest)
Bei System 1, in Abbildung 58 im Vordergrund mit gelben Rahmenprofilen (Entsalzungsbereich) zu erkennen, handelt es sich um die MSD- Anlage mit PU-Schaumprofilen. System 2 unterscheidet sich im Bau des Entsalzungsbereichs, welcher noch aus Edelstahl besteht und der Variante gleicht die in Spanien zum Einsatz kam. Dort besteht das Innenleben der Destille nach wie vor aus Edelstahlverdampferstufen. System 2 schließt direkt an System 1 an..

In der Tabelle 4 sind einige relevante Daten von den zuvor beschriebenen Systemen 1 und 2 aufgeführt, beide betrieben mit Vakuumröhrenkollektoren.

Messung 25.01.2008	System.1	System 2 (Edelstahldestil-
	(Kunststoffdestille)	le)
Tagesproduktion:	18,4 Liter/Tag	23,5 Liter/Tag
Nachtproduktion:	6,2 Liter	9,2 Liter
Wert Einstrahlung Meteonorm (30°)	4,4 kWh/m²d	4,4 kWh/m²d
Umgewandelte Wärmeenergie	3,6 kWh/Tag	4,1kWh/Tag
(Verschattung:Sys.1-25%,Sys.2-15%)		
GOR- Wert	3,3	3,6

Tabelle 8: Auswertungsdaten Test mit Salzwasser vom 25.01.2008

Bei einer abgeschätzten Verschattung von 25 % wird ein GOR- Wert von ca. 3,3 erreicht. Am gleichen Tag hat das System 2 eine Produktionsleistung von 23,5 Liter/Tag bei gleicher Energiezufuhr. Daraus ergibt sich ein GOR- Wert von ca. 3,6, wobei nur eine Verschattung von 15% angenommen wurde, da die Systemhöhe niedriger ist. Durch den Stand der Sonne am Äquator kommt es zu einer Verschattung der Kollektorfläche und einer Verringerung des Energieinputs ins Speicherbecken.

Das mehrstufige thermische Entsalzungsverfahren mit Edelstahlwannen hat unter diesen Abschätzungen einen besseren Systemnutzungsgrad. Festzuhalten ist, dass sich diese Ergebnisse aus dem ersten Feldtest mit dem neuen Anlagendesign ergaben und durchgeführte Optimierungen zufrieden stellende Messergebnisse lieferten (vgl. AP.9).

Wasseranalysen:

Wasseranalysen bei System 1 unterstreichen die Eignung des Destillates zu Trinkwassernutzung (vgl. Tabelle 9 und 10), gegebenenfalls mit einer Nachbehandlung durch Mineralien. In Brasilien ist die Wasseranalyse gezielt beim neuen MSD- System 1 mit Folienkondensationsfläche durchgeführt worden. Wasseranalysen von den Edelstahlvarianten sind sowohl in Spanien als auch in Indien bereits durchgeführt worden und haben die gute Trinkwasserqualität unter Beweis gestellt.

Tabelle 9: Mikrobiologische Untersuchung

mikrobiologische	Meerwasser	Meerwasser	Destillat	Referenzwerte	TrinkwV 2001
Analyse		aus dem Tank	System 1	AMBIENGE	Grenzwerte
[NMP/100ml]	14.02.2008	15.02.2008	15.02.2008		(Anzahl/100ml)
Coliforme Total	2560	1210	abwesend	-	0
Enscherichia Coli	790	780	abwesend	200 400 800	0

physikalisch-chemische	Einheit	Meerwasser	Meerwasser	Destillat	Referenzwerte	TrinkwV 2001
Analyse			aus dem Tank	System 1	AMBIENGE	Grenzwerte
(Auszug)		14.02.2008	15.02.2008	25.01.2008		
Leitfähigkeit	µS/cm	> 20.000	> 20.000	17,1	-	2.500,0
pH-Wert	-	7,78	7,2	6,13	6,0 - 9,5	6,5 - 9,5
gelöste Stoffe Total (TDS)	mg/L	31.910,0	34.450,0	11,6	1.000	-
Chlorid	mg/L Cl	16.728,0	24.480,0	3,02	250	250,0
Natrium	mg/L Na	7.109,4	10.404,0	1,3	200	200,0
Sulfat	mg/L SO ₄	323,3	292,6	0	250	240,0
Eisen Total	mg/L Fe	0,02	0,02	<0,01	0,3	0,2
Nitrit	mg/L NO ₂ -N	0,005	0,061	<0,01	1	0,5
Nitrat	mg/L NO ₂ -N	0,007	0,0	0	10	50,0

Tabelle 10: Physikalisch- chemische Analyse

2. Feldversuch mit Ganzwandsystemen in Brasilien

Wegen der technischen Probleme mit Ganzrahmenprofilen, die der Profilhersteller nicht zufriedenstellend lösen konnte, wurde eine zweite Entwicklung, der Einsatz von Ganzwandprofilen gewählt. Diese Profilart wurde im Rahmen des Aquasol- Projektes in einem kleineren Maßstab untersucht. Zurzeit sind Anlagen mit diesem Design in Brasilien und auch in dem vom BMBF geförderten Namibia-Projekt "CuveWaters" im Einsatz. Die Anlagen mit Ganzwandprofilen bieten bei gleicher Entsalzungseffizienz Kosten und

Wartungsvorteile gegenüber den Systemen mit Ganzrahmenprofilen. Die entsprechenden Konstruktionszeichnungen wurden gemeinsam von SIJ/IBEU erstellt.

Abbildung 59 zeigt den schematischen Aufbau dieser Anlage mit Entsalzungsstufen. Vorteilhaft an diesem System ist, dass die Stufen seitlich herausgezogen und gereinigt werden können. In Abbildung 60 sind drei Ganzwandsystem dargestellt. Die Kollektorfläche beträgt 6,3 m². Die Kondensationsfläche etwa 1,6 m² pro Stufe. In Abbildung 61 ist der Temperaturverlauf gemessen in einem neuen System bei einer Einstrahlung von etwa 7,1 kWh/m² Tag dargestellt. Die Kondensationsrate betrug etwa 87 kg/Tag.

Abbildung 62 zeigt die Messergebnisse für zwei Entsalzungssysteme mit Ganzwandprofilen mit drei Flachkollektoren. Beide Systeme liefern wegen ihrer Baugleichheit etwa die gleiche Kondensatmenge.



Abbildung 59: Innenaufbau der Ganzwandvariante



Abbildung 60: Anlagen in Fortaleza, Brasilien (Ganzwandsysteme)



Abbildung 61: Temperaturverlauf im Entsalzungssystem (7 Stufen)



Abbildung 62: Kondensationsrate als Funktion der Einstrahlung

AP. 11: Weiterentwicklung eines Simulationsprogramms

Die Weiterentwicklung eines Simulationsprogramms zur Abschätzung der Trinkwasserproduktion der Entsalzungsanlagen für unterschiedliche klimatische Standortbedingungen und Anlagengrößen ist 2008 abgeschlossen worden. Um das thermische Simulationsmodell auf seine Richtigkeit zu überprüfen, wurde eine 7-stufige Destillationsanlage vermessen (siehe Abbildung 63). Vergleiche zwischen Modell und Versuch zeigten gute Übereinstimmung. Die Arbeiten zum Simulationsmodel sind ein wesentlicher Teil der Dr. Arbeit von Christoph Müller /15/.

Simulationsmodell unter Matlab/Simulink:

Die Umsetzung des thermodynamischen Modells in Matlab/ Simulink ist in den folgenden Abbildungen zu sehen. Das erste Schema zeigt das Modell einer Stufe mit Verdampfer und Kondensator. Auf der linken Seite sind die Eingangsparameter, auf der rechten Seite die Ausgangsparameter zu sehen. Die einzelnen Wärmeströme wurden in Blöcke (Subsystems) gefasst.



Abbildung 63: Thermodynamisches Modell einer Stufe in MATLAB/SIMULINK

Das Stufenmodell wird in einem Block zusammengefasst. Zur besseren Bedienbarkeit kann in einer Maske die Grundfläche, der k-Wert der Isolation, der Abstand zwischen Verdampfer und Kondensator und die Wassermenge eingegeben werden.

Ein 7-stufiges System wird aus den einzelnen Stufenblöcken zusammengesetzt (Abb. 64). Aus der Destillatsumme wird der Wasserzulauf der ersten Stufe berechnet. Dabei kann mit einem Multiplikationsfaktor die nachgefüllte Wassermenge erhöht werden.

Bei einem realen System ist ein erhöhter Durchfluss nötig, damit es nicht zu einer Aufkonzentration von Salz in den Stufen kommt. Der ersten Stufe, dem Verdampferblock, wird die Heizenergie zugeführt.



Abbildung 64: 7-stufiges System

Vergleich Simulationsmodell- Labordestillationsanlage

Um das thermodynamische Simulationsmodell auf seine Gültigkeit zu überprüfen, wurde im Labor eine unabgedeckte, 4-stufige Destillationsanlage vermessen. Für die Validierung werden im Simulationsmodell die geometrischen Parameter und die aufgezeichneten Verläufe der Heizleistung, der Klimadaten, sowie der Zulaufmenge, Zulaufkonzentration und Zulauftemperatur aus dem Experiment übernommen. Die Qualität des Simulationsmodells wird über den Grad der Übereinstimmung des simulierten und gemessenen, zeitlichen Verlaufs der Temperatur und Produktionsrate jeder Stufe ersichtlich. Das Experiment wurde über 5 Tage mit einer täglichen Heizung von 10-12 Stunden gefahren. Um den Salzeinfluss berücksichtigen zu können, wurde um 16 Uhr des zweiten Tages die Zulaufkonzentration leicht erhöht und ab dem dritten Tag eine 3,5-prozentige Meersalzmischung (Instant Ocean) nachgefüllt.

Abbildung 65 zeigt die Verläufe der gemessenen und simulierten Temperaturen in der 4stufigen Anlage. Die Symbole stellen stündliche Kontrollmessungen dar. Da die Zufuhr des kalten Frischwassers nicht stetig, sondern manuell erfolgte, schwanken die gemessenen Stufentemperaturen. Im Mittel zeigen die beiden Kurven jedoch nur wenige Grad Abweichung, wobei die simulierte Temperatur im Mittel 2 K über der gemessenen Temperatur liegt. Diese Abweichung ist auch auf ungenaue Temperaturmessungen in den Stufen zurückzuführen, da diese nur einen Punkt in einem heterogenen Temperaturfeld repräsentieren. So sind vom Beckenboden bis zur Wasseroberfläche mehr als 4 K sowie an der Oberfläche von der Wannenmitte bis zum Rand Temperaturgradienten von mehr 8 K zu

verzeichnen. Ein Salzeinfluss ist im Temperaturverlauf kaum zu erkennen. Lediglich die dritte Stufe zeigt über der Versuchsdauer einen leichten Temperaturrückgang.



Abbildung 65: Gemessene und simulierte Temperaturen im Vergleich

In Abbildung 66 sind die simulierten und gemessenen Produktionsraten der einzelnen Stufen dargestellt. Die stündlich gemessenen Werte sind durch Symbole gekennzeichnet. Aufgrund der manuellen Nachfüllung sind auch hier große Schwankungen zu erkennen. Da die Verdampfungsrate der obersten Stufe an die Umgebung nicht gemessen werden kann, fehlen die entsprechenden Werte. Die Simulation weicht in Extremfällen, besonders in den Aufheizphasen, um bis zu 10 % von den Messwerten ab. Im stationären Zustand bleibt der Fehler im Mittel jedoch unter einem Prozent. Gut gibt die Simulation auch den gemessenen Rückgang der Produktionsrate mit zunehmendem Salzgehalt wieder.

Da das Simulationsergebnis einer Stufe vom Simulationsergebnis der darunter liegenden Stufe abhängt, kommt es vor allem bei Systemen mit großer Stufenanzahl aufgrund der Fehlerfortpflanzung schnell zu großen Abweichungen im Gesamtergebnis, wenn eine der unteren Stufen nur kleine Abweichungen aufweist. Aufgrund der Sensibilität und der Komplexität der Zusammenhänge wird das Modell für das in dieser Arbeit angestrebte Ziel der Optimierung der mehrstufigen Entsalzungsanlagen als ausreichend genau betrachtet.



Abbildung 66: Gemessene und simulierte Stufenproduktion im Vergleich

Erstellung eines Wärmeübertragungsmodells

Das in Abbildung 67 dargestellte Modell dient zur Optimierung bzw. als Grundlage für das Simulationsmodell. Zusätzlich ergeben die durchgeführten Versuche mit dem Modell auch Aufschluss über relevante Einflussgrößen und Zusammenhänge der Stoff- und Wärmeübertragung in der Destille. Für die Betrachtung der Grundlagen der Verdampfer und Kondensationsabläufe in der Destille, die im Vergleich zu bisher untersuchten Verdampfermodellen in einem Temperaturniveau bis 100 °C operiert, dienen die Versuche der Ausarbeitung eines relevanten Stoffübertragungsmodells, welches auch für höhere Temperaturen den Verdampfungs-Kondensationsvorgang genauer beschreibt.



Abbildung 67: Modelldestille zur Validierung des Simulationsmodells

Um einen Vergleich mit den verschiedenen Stoffübergangsmodellen zu erhalten, wurde die Destillatmenge bei Verdampfertemperaturen zwischen 50°C und 100°C und Temperaturdifferenzen zum Kondensator von 5 K bis 20K mit Hilfe der verschiedenen Ansätze rechnerisch bestimmt. Da in den meisten Fällen nicht ersichtlich war, mit welchen Stoffwerten die verschiedenen Autoren gearbeitet haben, wurden zur Berechnung die Stoffwerte von gesättigter Luft gewählt. Die Rechenwerte wurden mit den experimentellen Ergebnissen der oben dargestellten beschriebenen Experimentaldestille verglichen.

AP. 12: Aufbau einer Verwertungsstrategie – Edelstahl- Folienversion

In enger Zusammenarbeit mit IBEU, Solar Institut Jülich und RWE- Thames Water wurde die Verwertungsstrategie verfolgt. Durch die Teilnahme am IV World Water Forum (Abbildung 68) in Mexiko-City im März 2006 und Ausstellung eines Entsalzungssystems konnten erste Erkenntnisse über das tatsächliche Bedarfspotential für solche Anlagen gesammelt werden. Es zeigte sich, dass ein großer Bedarf für solche Anlagen in ländlichen ariden Gebieten besteht. Viele Kontakte zu Internationalen Firmen, Stiftungen, Regierungsstellen, NGO's und Universitäten wurden geknüpft. Abbildung 68 zeigt unseren Messestand beim IV World Water Forum in Mexiko-City.

Mit verschiedenen deutschen Firmen, die international im Solarbereich oder Meerwasserentsalzungsbereich tätig sind, haben erste Gespräche über eine mögliche

Lizenzübernahme bzw. Lizenzverwertung stattgefunden. Für das jetzige Konzept besteht ein Gebrauchsmusterschutz durch den Antragsteller IBEU. Vorteilhaft ist, dass diese Firmen in vielen Zielländern über Vertriebsstrukturen verfügen, die genutzt werden könnten. Weitere Gespräche auch mit ausländischen Firmen sind geplant.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Entsalzungsprojektes CuveWaters sind 6 Anlagen mit dem neuen Ganzwandsystem im Einsatz.



Abbildung 68: Messestand IV World Water Forum 2006 Mexiko- City

AP. 13: Workshop

Im September 2007 fand in Bangalore ein Workshop mit dem Schwerpunktthema Meerwasserentsalzung und Wasseraufbereitung mit unserer Beteiligung statt. Von der indischen Seite zeigte sich großes Interesse an einer Lizenznahme für den Bau der Entsalzungssysteme für den indischen Markt.

Im Solarinstitut Jülich fand der weltweit erste Kongress zur Meerwasserentsalzung mit regenerativen Energien vom 19 - 20. Juni 2008 statt, mit etwa 100 nationalen und internationalen Gästen. Auch das im SIJ in Zusammenarbeit mit IBEU entwickelte System wurde in einem Fachvortrag vorgestellt und auf dem Testgelände im Betriebszustand gezeigt. Desweiteren nahm IBEU und das Solar-Institut Jülich an verschiedenen nationalen und internationalen Tagungen teil, auf denen die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse einem breiten Fachpublikum vorgestellt wurde.



Abbildung 69: Desalination and Renewable Energies- Seminar in Jülich

Fazit und Ausblick

Das Forschungsprojekt Aquasol hat sich im Zeitraum April 2005 bis Februar 2011 mit der Entwicklung, Bau und Erprobung von kleinen dezentralen solarthermischen Meer- und Brackwasserentsalzungsanlagen nach dem Prinzip der Mehrstufendestillation beschäftigt. Es wurden in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern Feldtests durchgeführt, mit dem am Solar-Institut Jülich (SIJ) in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro für Energie und Umweltschutztechnik (IBEU) entwickelten Entsalzungssystemen. Der Feldtest auf dem Instituts Gelände des Instituto de Tecnologico de Canarias (ITC) zeigte die Einsatzmöglichkeit der entwickelten Systeme auf und die Ergebnisse der Wasseranalysen, durchgeführt nach Anweisung der EU- Trinkwasserrichtlinie, unterstreichen eindeutig die Eignung der Entsalzungssysteme für den Weltmarkt.

Der Einsatz der Mehrstufendestille (MSD) eignet sich aufgrund des Verdampfung- bzw. Verdunstungsverfahren auch für die Behandlung von kontaminiertem Wasser, welches nach der Behandlung in Konzentrat und Destillat (gegebenenfalls Nachbehandlung zum Trinkwasser mit Mineralien) separat aufgefangen werden kann. Aus diesem Grund ist der Einsatzbereich der entwickelten Systeme in Zukunft nicht nur in der Behandlung von Brackund Salzwasser zu sehen, sondern auch in anderen Gebieten der Wasseraufbereitung.

Die Erfahrungen in Indien zeigen, dass ein sehr großer Bedarf an Kleinanlagen für den ländlichen Raum besteht zur Dekontamination von belasteten Grund- Oberflächenwasser (Fluorkontaminationen). Der Feldtest in Indien hat verdeutlicht, dass die MSD- Anlagen die Anforderungen für den ländlichen Einsatz erfüllen und positiven Einfluss nehmen können auf eine gesunde Entwicklung der Bevölkerung mit sauberen Trinkwasser in den betroffenen Regionen.

Im Projektzeitraum ist kontinuierlich an einer Optimierung der Mehrstufendestille gearbeitet worden, Ergebnis aus den Erfahrungen beim Einsatz im Feld und durch stetige Laboruntersuchungen im SIJ.

Die Preisentwicklung von Edelstahl, Hauptbestandteil der Mehrstufendestille, hat zu einem Umdenken bei den Projektpartnern geführt und durch Forschung und Versuche in Labor und Feld zum Einsatz von geeigneten neuen Materialien geführt. Temperaturbeständige Kunststoffrahmen haben einen großen Teil des Edelstahls ersetzt und zu einer Kostenreduzierung des Anlagenpreises und in Folge dessen zu einem niedrigeren Trinkwasserpreis geführt.

Als weitere Optimierung wurden zwei Anlagenvarianten für den Aufbau der Außenwände untersucht. Die Variante besteht aus Ganzrahmen aus Kunststoff, die andere aus

Ganzwandelementen (Sandwichplatten). Leider konnte der Hersteller der Kunststoffrahmen die von uns mit ihm vereinbarten Qualitätsmerkmale bezüglich Temperaturbeständigkeit, Formgenauigkeit, Festigkeit und Trinkwassereignung nicht erfüllen, so dass diese Variante nicht weiter verfolgt wurde.

Eine Variante mit den Ganzwandelementen führte zu dem zu einer weiteren Kostenreduktion in der Herstellung und zu einer weiteren Vereinfachung im Aufbau und Betrieb der Anlagen. Der neue Aufbau der Systeme lässt aufgrund des Anlagendesign eine Erweiterung der Anlagengröße leichter realisieren und Kapazitäten mit einer täglichen Trinkwasserproduktion von ca. 5m³ sind möglich. In einem internationalen Forschungsprojekt wurden 6 dieses neuen Anlagentyps in Namibia zur Trinkwassergewinnung aus salzhaltigem Grundwasser installiert. Beim Projektpartner in Brasilien werden die Anlagen zurzeit einem Langzeittest unterzogen. Im dem vom BMBF geförderten CuveWaters- Projekt bestätigen unsere Anlagen ihre Betriebstauglichkeit auch unter extremen Standortbedingungen (hohe Außentemperatur, hoher Gipsgehalt im Rohwasser, sehr geringe Wartung). Entstanden ist im letzten Projektdrittel (Zeitplan) ein nahezu vollständig aus neuen Materialien bestehendes System.

Mit verschiedenen deutschen Firmen, die international im Solarbereich oder Meerwasserentsalzungsbereich tätig sind, haben erste Gespräche über eine mögliche Lizenzübernahme bzw. Lizenzverwertung stattgefunden. Für das jetzige Konzept besteht ein Gebrauchsmusterschutz durch den Antragsteller IBEU. Vorteilhaft ist, dass diese Firmen in vielen Zielländern über Vertriebsstrukturen verfügen, die genutzt werden könnten. Weitere Gespräche auch mit ausländischen Firmen sind geplant.

Ein wesentlicher Punkt für die Vermarktung der entwickelten Anlagen ist der Wasserpreis. Abschätzungen liegen bei einen Wasserpreis für unserer Anlagen unter 10 €/m³. Dieser Preis wäre für viele Standort als reiner "Wasserpreis" schon heute marktfähig.

Abschließend lässt sich festhalten, dass es gelungen ist ein System zu entwickeln, welches durch seine einfache Handhabung, seine geringen Wassergestehungskosten, seinen energieeffizienten Betrieb (Gor- Wert 3-4) und dies ohne jegliche elektrische Energie mit anderen entwickelten Systemen konkurrieren kann.

Vorträge, Veröffentlichungen

- Vortrag Prof. Dr. K. Schwarzer beim "Deutschen MeerwasserEntsalzungs e.V" (DME) am 19.04.2005, ISET Kassel; Thema: Kleine, dezentrale, solarthermische Meer- und Brackwasserentsalzungsanlagen
- Sommerkurs Regenerative Energien, FH- Aachen, September 2005 Thema: Verfahren der Meerwasserentsalzung
- > Ausstellungsstand Solardestille beim IV World Water Forum, Mexico City; März 2006.
- Veröffentlichung OTTI-Seminar Mai 2006;
- Sommerkurs Regenerative Energien, FH- Aachen, September 2006 Thema: Verfahren der Meerwasserentsalzung
- Veröffentlichung World Water Magazine Juni 2006
- Sommerkurs Regenerative Energien, FH- Aachen, September 2007 Thema: Verfahren der Meerwasserentsalzung
- World Water And Environmental Engineering /Volume 29 Issue 3 Titel: "Solar stills generates international interest"
- Summer Course "Renewable Energy"- Chile Januar 2007
- Desalination- Workshop in Bangalore, Indien (TERI), 20. September 2007 "Solar thermal Desalination Techniques"
- Veröffentlichung, Edinburgh, Großbritanien, 28- 30 Mai/2008 "International Workshop in Water and Sanitation in International Development and Disaster Relief"
- Sommerkurs Regenerative Energien, FH- Aachen, September 2008 Thema: Verfahren der Meerwasserentsalzung
- DME Seminar "Desalination and Renewable Energies" Desalination Juni 2008
- DME Seminar "Desalination and Renewable Energies" Fieldtest Results with a Solar Thermal Multi-Stage Desalination System 19 Juni 2008
- Expedition Zukunft Science Express, Gefördert vom BMBF Deutschlandtour 2009

> K.Schwarzer, B. Hoffschmidt, E. Vieira da Silva, T. Schwarzer

Ein neues solarthermisches Entsalzungssystem mit Wärmerückgewinnung für dezentrale Anwendungen

OTTI-Seminar Thermische Solarenergie 5.7. Mai 2010, Kloster Banz

K. Schwarzer, M. Eugênia Vieira da Silva, T. Schwarzer, B. Hoffschmidt

Field results in Namibia and Brazil of the new solar desalination system for decentralised drinking water production

EuroMed 2010 Desalination for Clean Water and Energy

3-7. Okt. 2010 Tel Aviv, Israel

BED

7. Literatur

- /1/ Schwarzer K., et al Analytical and experimental study of a solar desalination unit with heat recovery system Desalination Strategies in South Mediterranean Coutries Euromed 2000 Sept. 11-13, 2000, Jerba, Tunisia
- /2/ Schwarzer K. et al Solarthermische Meerwasserentsalzung und Wasseraufbereitung Abschlußbericht: Solar- Institut Jülich AG-Solar NRW: 252 001 91, Jülich 1996
- /3/ Decker, Joachim; Seel, Alexander
 Entwicklung, Konstruktion, Bau und thermodynamische Bilanzierung zweier solarthermischer Entsalzungsanlagen mit Wärmerückgewinnung
 Diplomarbeit FH-Aachen, Abt. Jülich, 1995, Betreuer Prof. Schwarzer

/4/ Razen M. Konstruktion, Bau und vergleichende Vermessung von solarthermischen Destillatoren nach dem Gewächshausprinzip Diplomarbeit FH-Aachen, Abt. Jülich, 1995, Betreuer Prof. Schwarzer

- /5/ Stermann F.
 Konstruktion, Bau, thermodynamische Vermessung und Erprobung einer mehrstufigen Meerwasserentsalzungsanlage
 Diplomarbeit FH-Aachen, Abt. Jülich, 1996, Betreuer Prof. Schwarzer
- Reetz H.
 Bau, Vermessung und thermodynamische Charakterisierung einer Mehrstufendestille mit Wärmerückgewinnung
 Diplomarbeit FH-Aachen, Abt. Jülich, 2000, Betreuer Prof. Schwarzer
- K. Schwarzer, C. Müller
 Entwicklung und Optimierung eines neuartigen Meer-und Brackwasser-Entsalzungssystems
 BMBF- Projektbericht FKZ 1708499, 2001, FH-Aachen,
- /8/ K. Schwarzer, C. Müller
 Construction of two types of solar multi-stage desalination plants with 1m³ distillation area and cost estimation of a solar 1m³/d plant
 Projektbericht: Greenpeace, SIJ and IBEU, März 2003
- /9/ T. Schwarzer

Thermodynamische Charakterisierung einer im Feldtest erprobten solarthermischen Entsalzungsanlage mit mehrstufiger Wärmerückgewinnung und Analyse der Produktwasserqualität zur Trinkwassernutzung. Diplomarbeit. RWTH Aachen. 2005

- /10/ K. Schwarzer, M: E. Vieira, C. Müller, H. Lehmann, L. Coutinho Modular Solar Thermal Desalination System with Flat Plate Collector RIO 3 - World Climate & Energ Event 1-5. Dez. 2003, Rio de Janeiro, Brasil
- /11/ H. Müller-Holst Small Scale Thermal Water Desalination System using Solar Energy or Waste Heat MEDRC: Projekt:98-AS-024b ZAE Bayern, Germany, April 2001
- /12/ Brendel T.,
 Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau an der Ruhr-Universität Bochum
 Solare Meerwasserentsalzung mit mehrstufiger Verdunstung Betriebsversuche,
 dynamische Simulation und Optimierung 2003
- /13/ Rommel, M.; Koschikowski, J.; Wieghaus, M.:
 "Thermally driven Desalination Plants based on Membrane Destillation" Proc. Int. Conference 'RES for Island – Tourism & Water', Kreta 2003
- /14/ J.H. Hanemaaijer et al: "Memstill membrane distillation: a promising near-future desalination technology" TNO Science and Industry, Apeldoorn Conference on Desalination and the Environment Halkidiki, Greece 22-25 April 2007
- /15/ Christoph Müller
 Theoretische und praktische Untersuchung einer mehrstufigen, solarthermischen Kleinanlage zur Meer- und Brackwasserentsalzung
 Dissertation RWTH Aachen 2009
- /16/ K. Schwarzer, E. Vieira da Silva , B. Hoffschmidt1, T. Schwarzer A New Solar Desalination System with Heat Recovery for Decentralised Drinking Water Production Water and Sanitation in International Development and Disaster Relief Edinburgh, UK, 28-30 May 2008

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) geplant Schlussbericht		
3. Titel Entwicklung, Bau, Optimierung und Feldtes Meerwasserentsalzungsanlage mit mehrstufiger Wärme	st einer neuartigen solarthermischen erückgewinnung (AQUASOL)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Klemens Schwarzer	5. Abschlussdatum des Vorhabens Februar 2011	
Bernhard Hoffschmidt Tarik Schwarzer	6. Veröffentlichungsdatum Geplant Juli 2011	
Christoph Müller	7. Form der Publikation	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
Ingenieurbüro für Energie- und Umwelttechnik (IBEU) Tuchbleiche 12 52428 Jülich	10. Förderkennzeichen 02WT0605 02WT0606	
Solar- Institut Jülich (SIJ) Fachhochschule Aachen Heinrich Mussmann Str. 5	11. Seitenzahl 91	
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)	16 14. Tabellen	
53170 Bonn	15. Abbildungen 69	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		

18. Kurzfassung

Das Forschungsprojekt Aquasol beschäftigt sich mit der Entwicklung, Bau und Erprobung von kleinen dezentralen solarthermischen Meer- und Brackwasserentsalzungsanlagen nach dem Prinzip der Mehrstufendestillation (MSD) beschäftigt. Es wurden Feldtests in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern (Spanien, Brasilien, Indien) mit verschiedenen Anlagenvarianten durchgeführt. Die Anlagen wurden gemeinsam vom SIJ und IBEU entwickelt und weiter optimiert. Der Feldtest auf dem Instituts Gelände des Instituto de Tecnologico de Canarias (ITC) zeigte die Einsatzmöglichkeit der entwickelten Systeme auf und die Ergebnisse der Wasseranalysen, durchgeführt nach Anweisung der EU-Trinkwasserrichtlinie, unterstreichen eindeutig die Eignung der Entsalzungssysteme als dezentrale Trinkwassergewinnungsanlage.

Die Erfahrungen der Feldtests in Indien zeigen, dass ein sehr großer Bedarf an Kleinanlagen für den ländlichen Raum besteht für die Dekontamination von natürlich belasteten Grundwasser (Fluor). Der Feldtest in Indien hat verdeutlicht, dass die MSD- Anlagen die Anforderungen für den ländlichen Einsatz erfüllen und positiven Einfluss nehmen können auf eine gesunde Entwicklung der Bevölkerung mit sauberen Trinkwasser in den betroffenen Regionen.

Die Preisentwicklung von Edelstahl, Hauptbestandteil der Mehrstufendestille, hat zu einem Umdenken bei den Projektpartnern geführt und durch Forschung und Versuche in Labor und Feld zum Einsatz von geeigneten neuen Materialien geführt. Temperaturbeständige Kunststoffrahmen und neuartige Kondensationsflächen haben einen großen Teil des Edelstahls ersetzt und zu einer Kostenreduzierung des Anlagenpreises und in Folge dessen zu einem niedrigeren Trinkwasserpreis geführt.

Als weitere Optimierung wurden zwei Anlagenvarianten mit verschiedenem Aufbau der Außenwände untersucht. Die Variante besteht aus Ganzrahmen aus Kunststoff, die andere aus Ganzwandelementen. Die Variante mit den Ganzwandelementen führte zudem zu einer weiteren Kostenreduktion in der Herstellung und zu einer weiteren Vereinfachung im Aufbau und Betrieb der Anlagen. Der neue Aufbau der Systeme lässt aufgrund des Anlagendesign eine Erweiterung der Anlagengröße leichter realisieren und Kapazitäten mit einer täglichen Trinkwasserproduktion von ca. 5m³ sind möglich. Beim Projektpartner in Brasilien (Universidade Fortaleza) werden die Anlagen zurzeit einem Langzeittest unterzogen. Im dem vom BMBF geförderten CuveWater-Projekt bestätigen unsere Anlagen ihre Betriebstauglichkeit auch unter extremen Standortbedingungen in Namibia (hohe Außentemperatur, hoher Gipsgehalt im Rohwasser, sehr geringe Wartung). Ohne das vom BMBF geförderte Aquasol- Projekt hätte für das CuveWater- Projekt kein ausgereifter Entsalzungstyp nach dem Mehrstufenprinzip zur Verfügung gestanden. Nach Abschluss des Feldtestes in Namibia besteht für das System eine große Verbreitungschance in ariden ländlichen Gebieten in Namibia durch die namibische Regierung.

Abschließend lässt sich festhalten, dass es gelungen ist ein System zu entwickeln, welches durch seine einfache Handhabung, seine geringen Wassergestehungskosten, seinen energieeffizienten Betrieb (Gor- Wert 3-4) und dies ohne jegliche elektrische Energie überzeugt und mit anderen Entsalzungssystem in gleichen Anwendungsfeld konkurrieren kann.

19. Schlagwörter Solare Meerwasserentsalzung, Desalination, Mehrstufendestillation, Destillation	
20. Verlag	21. Preis