

# Meerwasserentsalzung mit Solarenergie



Quelle: Fraunhofer ISE

Die Entwicklung energieeffizienter, solarbetriebener Entsalzungssysteme könnte langfristig eine nachhaltige Form der Wasserversorgung schaffen und damit zur Lösung der weltweiten Trinkwasserproblematik beitragen.

In den ariden Zonen der Erde leeren sich durch den stark anwachsenden Trinkwasserverbrauch die Grundwasserleiter schneller, als sie von der Natur wieder aufgefüllt werden können. UN-Berichten aus dem Jahre 2004 zufolge haben 1,2 Milliarden Menschen (20 Prozent der Weltbevölkerung) keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Geschätzte 12 Millionen Todesfälle lassen sich jährlich auf das Fehlen von sauberem Trinkwasser, eine ungünstige Verteilung oder eine zu schlechte Wasseraufbereitung zurückführen. In den Entwicklungsländern haben nach Angaben der WHO ca. 80 Prozent aller Krankheiten ihren Ursprung in der Verunreinigung oder im Fehlen von Trinkwasser. Seit 1940 hat sich der weltweite Wasserverbrauch versechsfacht. Auf Grund von Klimaveränderungen, dem extremen Bevölkerungswachstum und ei-

ner zunehmenden Umweltverschmutzung scheint eine starke Ausweitung der Trinkwasserknappheit in vielen Teilen der Erde unvermeidlich. So werden realistischen Prognosen zufolge im Jahr 2025 1,8 Milliarden Menschen unter absoluter Wasserknappheit leiden und mindestens 2/3 der Menschheit muss mit Engpässen in der Trinkwasserversorgung rechnen. Aus diesem weltweiten Defizit zwischen Angebot und Nachfrage resultieren schon heute lokale, nationale und internationale Konflikte.

Einen Lösungsansatz bietet die Erweiterung der Ressource Trinkwasser durch dessen technische Herstellung aus Meer- oder Brackwasser. Besonders in küstennahen Gebieten des Nahen Ostens, auf Inseln der Karibik, den USA sowie in den Mittelmeeranrainerstaaten werden heute

schon große Anteile des Trinkwasserbedarfs durch Entsalzungsanlagen gedeckt. Weltweit werden täglich insgesamt über 40 Mio. m<sup>3</sup> Wasser durch Entsalzungsanlagen produziert, wobei hinsichtlich der Meerwasserentsalzung der mittlere Osten mit einer Tagesproduktion von mehr als 12 Mio. m<sup>3</sup> Vorreiter ist.

Während die Ressource Meerwasser zwar quasi unerschöpflich ist, muss aber berücksichtigt werden, dass alle konventionellen Entsalzungssysteme einen erheblichen Energiebedarf haben, der in der Regel über fossile Energieträger gedeckt wird. Unter diesem Gesichtspunkt ist die intensive Erweiterung der Entsalzungskapazitäten kritisch zu betrachten. Hinzu kommt, dass diese Technologien nur dort einsetzbar sind, wo entsprechende Ener-

geträger überhaupt zur Verfügung stehen, d. h., in ländlichen Gebieten mit schwach ausgeprägter Infrastruktur sind diese Technologien nicht anwendbar.

Die Entwicklung energieeffizienter, solarbetriebener Entsalzungssysteme könnte langfristig eine nachhaltige Form der Wasserversorgung schaffen, die nicht mehr von der Endlichkeit fossiler Energieträger abhängig ist, der CO<sub>2</sub>-Problematik entgegensteht und auch in Gebieten mit mangelnder Infrastruktur eingesetzt werden kann. Die Nutzung von Solarenergie bietet sich besonders an, da in den Regionen der Erde, in denen Süßwassermangel herrscht, oft sehr hohe solare Einstrahlungssummen (oft > 7 kWh/(m<sup>2</sup>/Tag) zu verzeichnen sind. Grundsätzlich bieten sich hier mehrere Möglichkeiten an: Zum einen kann eine elektrisch betriebene Umkehrosmose (RO) über eine Photovoltaikanlage oder ein solarthermisches Kraftwerk (CSP) versorgt werden. Zum anderen kann ein thermisch getriebener Entsalzungsprozess, bei dem Wasser aus einer Sole heraus verdampft wird, über thermische Solarkollektoren versorgt oder mit der Abwärme eines CSP-Prozesses gespeist werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch ein thermischer Entsalzungsprozess elektrische Energie zum Betrieb von Pumpen und Regelungskomponenten braucht.

In der Gruppe Thermische Kollektoren und Anwendungen (TKA) am Fraunhofer ISE wird seit einigen Jahren im Bereich der thermischen Meerwasserentsalzung gearbeitet. Zielsetzung ist es, zunächst sehr kleine, energieautarke Anlagen (< 5 m<sup>3</sup>/Tag) zu entwickeln, die sehr wartungsarm sind und dezentral eingesetzt werden können. Die hier verwendete Technologie beruht auf dem Prinzip der Membrandestillation (MD). Dieses ist ein Verfahren, das zwar zurzeit großtechnisch noch nicht eingesetzt wird, aber besonders hinsichtlich der Nutzung von Niedertemperatur-Wärme im Bereich 60 bis 80 °C sehr gut anwendbar ist. Zur Versorgung werden solarthermische Kollektoren oder Abwärmequellen genutzt.

### Das Prinzip der Membrandestillation

Bei den üblichen Trennverfahren, bei denen die Separation der Massenströme durch eine Membran erfolgt, wird als treibende Kraft zwischen den beiden Grenzflächen eine statische Druckdifferenz (z. B. RO), ein Konzentrationsgefälle (Dialyse) oder ein elektrisches Feld (Elektrodialyse, ED) aufgeprägt. Die Selektivität der ent-

sprechenden Membran wird durch ihre Porengröße im Verhältnis zur Größe des zurückzuhaltenden Stoffs, ihren Diffusionskoeffizienten oder ihre elektrische Polarität hervorgerufen. Die selektive Eigenschaft einer Membran, die zur Membrandestillation verwendet wird, beruht hingegen auf dem Rückhalt von flüssigem Wasser bei gleichzeitiger Permeabilität für freie Wassermoleküle, d. h. Wasserdampf. Diese Membranen sind aus einem hydrophoben Kunststoff gefertigt (z. B. PTFE, PVDF oder PP) und weisen Poren mit einem mittleren Durchmesser von 0,1 bis 0,5 µm auf. Da Wasser starke Dipoleigenschaften hat und dadurch eine hohe Oberflächenspannung aufbaut, der Membranwerkstoff aber unpolar ist, kommt es nicht zu einer Benetzung der Membran. Ein Eindringen des flüssigen Wassers in die Membranporen findet somit nicht statt, obwohl diese deutlich größer sind als die Wassermoleküle selber. Freie Wassermoleküle, in Form von Wasserdampf, können somit die Membran ungehindert passieren.

Diesen Effekt macht man sich bei der MD zunutze, um reinen Wasserdampf, der anschließend wieder zu Wasser kondensiert wird, von einer salzhaltigen Sole abzutrennen. Die treibende Kraft, die den Dampf durch die Membran hindurch fördert, um ihn auf der Permeatseite als Produkt gewinnen zu können, ist die Wasserdampf-Partialdruckdifferenz zwischen den beiden Grenzflächen der Membran. Diese Partialdruckdifferenz ist Folge einer Temperaturdifferenz zwischen den beiden Grenzflächen. Wie in **Abbildung 1** zu erkennen ist, wird die Membran auf der einen Seite mit einem warmen Solestrom und auf der anderen Seite mit einem gekühlten Permeatstrom beaufschlagt. Die Temperaturdifferenz über der Membran, die üblicherweise im Bereich von 5 bis 20 K liegt, bringt eine entsprechende Partialdruckdifferenz mit sich, die dafür sorgt, dass der an der Membrangrenzfläche entstehende Wasserdampf dem Druckgefälle folgend durch die Membranporen hindurch permeiert und auf der kälteren Seite kondensiert.

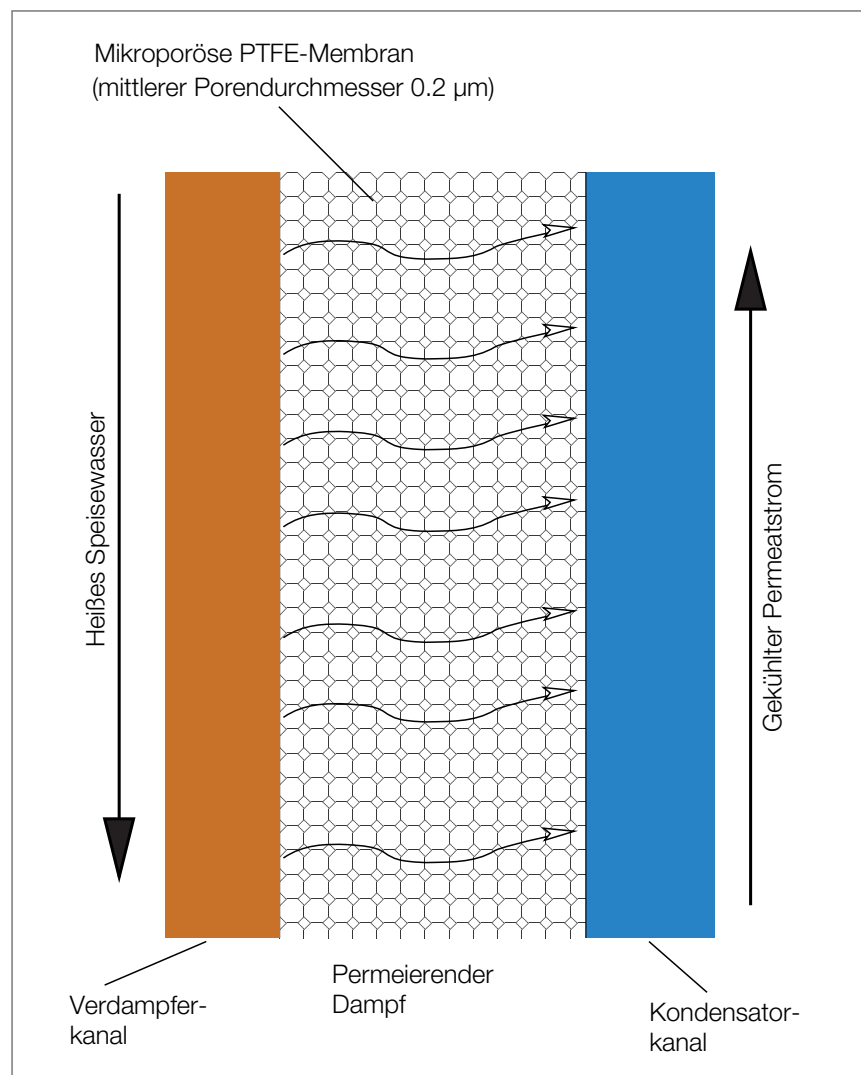
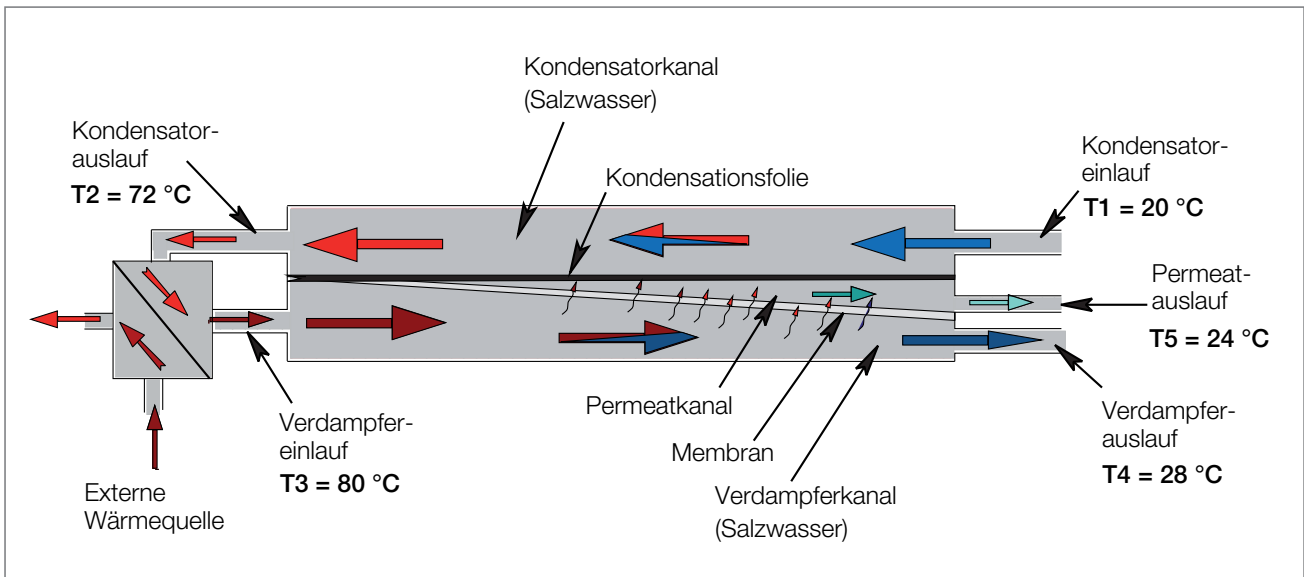


Abb. 1: Schematische Darstellung des Membrandestillationsprozesses

Quelle: Fraunhofer ISE



Quelle: Fraunhofer ISE

Abb. 2: Schematische Darstellung des Kanalaufbaus eines MD-Moduls mit separatem Permeatkanal

Die prinzipielle Kanalordnung eines MD-Moduls mit einer integrierten Wärmerückgewinnung ist in **Abbildung 2** dargestellt. Zu sehen sind hier der Kondensatorkanal, der Permeatkanal, der Verdampferkanal und ein externer Wärmeübertrager. Wie in **Abbildung 2** zu erkennen ist, wird bei dieser speziellen Bauform der Permeatkanal mit einer Kondensationsfläche vom Kondensatorkanal abgetrennt. Das durch den Kondensatorkanal strömende Kühlwasser kann in diesem Fall direkt das salzhaltige Speisewasser sein, da es nicht mit dem Permeat in Kontakt kommt. Das mit der Temperatur  $T_1$  in den Kondensator eintretende Speisewasser dient dazu, das Permeat im Permeatkanal zu kühlen, und wird dabei gleichzeitig auf seinem Weg durch das Modul aufgewärmt.

Die Kondensation des Dampfes erfolgt im flüssigen Permeat. Das vorgewärmte Speisewasser, das zur Kühlung des Kondensators gedient hat, wird nach Verlassen des Kondensators mit der Temperatur  $T_2$  direkt einer Wärmequelle zur Nacherwärmung zugeführt und dann mit der Temperatur  $T_3$  zum Verdampfer geleitet. Das Permeat wird mit der Temperatur  $T_5$ , das abgekühlte Konzentrat mit der Temperatur  $T_4$  abgeführt. Die am Fraunhofer ISE gebauten MD-Module sind so genannte Spiralwickelmodule, d. h., die Kanäle sind konzentrisch um ein Zentralrohr gewickelt. Dabei entstehen Kanäle von bis zu 10 Meter Länge. In **Abbildung 3** ist ein solches Spiralwickelmodul dargestellt, so wie die eigens zur Herstellung konstruierte Wickelmaschine.

Die Module sind typischerweise 800 Millimeter hoch und haben einen Durchmesser von 300 bis 400 Millimeter. Der Permeatertrag hängt sehr stark von den Betriebsparametern Temperatur und Speisewassermassenstrom ab und kann bis zu 40 l/h betragen. Durch die interne Vorwärmung des Speisewassers kann der thermische Energiebedarf gegenüber der Direktverdampfung auf 1/3 bis 1/5 reduziert werden und liegt damit je nach Betriebsweise im Bereich von 130 bis 250 kWh/m<sup>3</sup> produziertem Süßwasser. Die Module werden am ISE hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit vermessen und charakterisiert. Die Messergebnisse werden ebenfalls zur Validierung der Simulationsmodelle verwendet, die zur Weiterent-

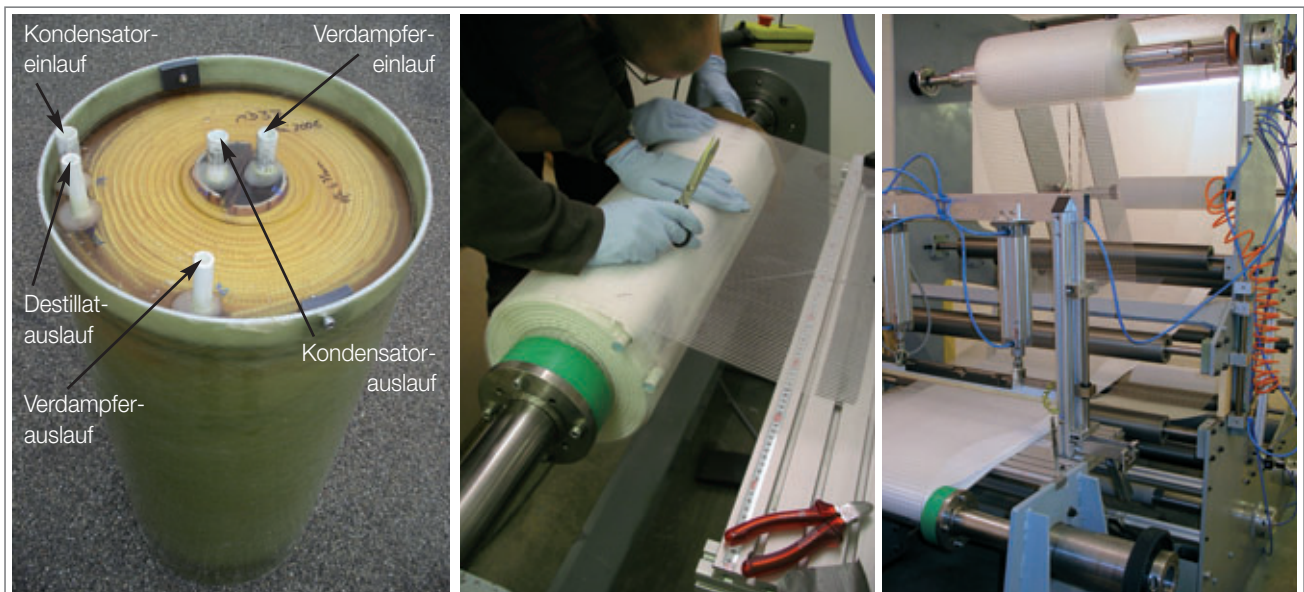
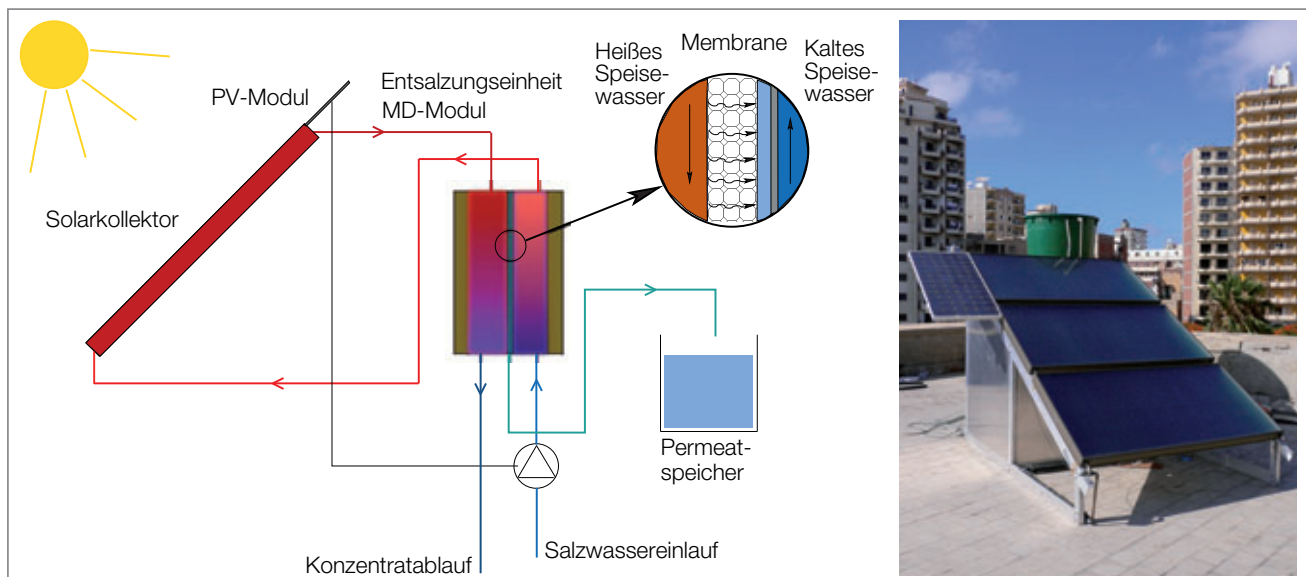


Abb. 3: Spiralwickelmodul zur Membrandestillation und Wickelmaschine zur Herstellung der Module

Quelle: Fraunhofer ISE



Quelle: Fraunhofer ISE

Abb. 4: Schematische Darstellung der Kompaktanlage und in Alexandria installiertes System

wicklung der MD-Module sowie der Systemauslegung genutzt werden.

### Solargetriebene MD-Systeme

Bei der Entwicklung solarbetriebener MD-Systeme werden zwei unterschiedliche Konzepte verfolgt. Zum einen werden so genannte Kompaktssysteme, die für sehr kleine Tageskapazitäten ( $< 1 \text{ m}^3$ ) geeignet sind, gebaut. Zum anderen werden so genannte Zweikreisssysteme, die für Tageskapazitäten bis zu  $5 \text{ m}^3$  eingesetzt werden können, entwickelt. **Abbildung 4** zeigt den prinzipiellen Aufbau des Kompaktsystems und eine im ägyptischen Alexandria installierte Anlage. Acht weitere Kompaktanlagen wurden z. B. in Jordanien, Marokko und den Kanaren installiert.

Das Kompaktssystem besteht im Wesentlichen aus einem ca.  $7 \text{ m}^2$  großen Kollektorfeld, einem Entsalzungsmodul, einer Speisewasserpumpe mit PV-Modul, einer Regelung, einem Permeatspeicher und einem in **Abbildung 4a** nicht dargestellten Speisewasservorlagebehälter. Dieser ist in **Abbildung 4** oberhalb der Anlage zu sehen. Die Kollektoren sind dabei direkt zwischen den Kondensatorauslauf und den Verdampferinlauf des MD-Moduls geschaltet, was zwar voraussetzt, dass diese salzwasserbeständig sind, aber dafür einen Wärmetauscher und eine weitere Pumpe einspart. Die Pumpe, die zum Betrieb der Anlage benötigt wird, ist direkt über einen einfachen Zweipunktreger mit einem PV-Modul gekoppelt. Erreicht das

Fluid am Kollektorauslauf eine bestimmte Temperatur, wird die Pumpe eingeschaltet und fördert einen Volumenstrom, der von der abgegebenen Leistung des PV-Moduls abhängt. Unterschreitet die Kollektortemperatur die erforderliche Betriebstemperatur des MD-Moduls, wird die Pumpe wieder abgeschaltet. Die zurzeit gebauten Kompaktanlagen können je nach Wetterbedingungen und Salzgehalt des Speisewassers 100 bis 150 Liter Trinkwasser pro Tag produzieren.

Bei dem Zweikreisystem (**Abb. 5**) sind der Kollektorkreis und der Salzwasserkreis über einen Wärmeübertrager voneinander hydraulisch entkoppelt. Bei größeren Anlagen ergibt sich daraus der Vorteil, dass kon-

Neu auf [www.fachzeitschriften-wvgw.de](http://www.fachzeitschriften-wvgw.de)

Die Buchrecherchedatenbank für  
Energie, Wasser und Abwasser

Topaktuelle Fachliteratur ab Erscheinungsjahr  
2007

Fachbücher aus über 30 Fachverlagen

Recherchieren Sie in unserem Buchkatalog unter  
[www.fachzeitschriften-wvgw.de](http://www.fachzeitschriften-wvgw.de)



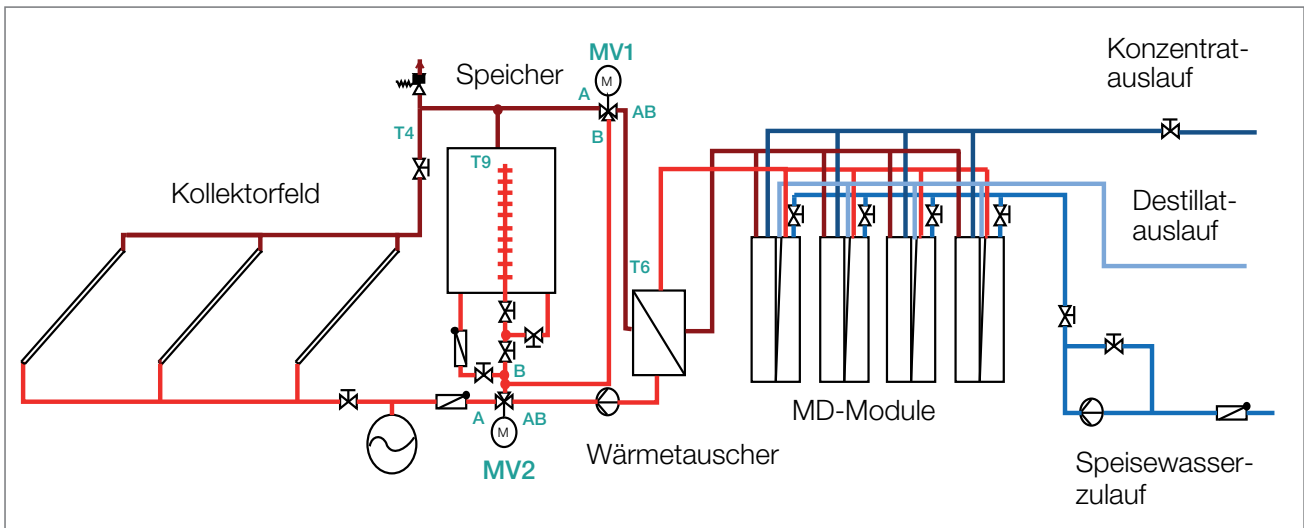


Abb. 5: Schematische Darstellung des Zweikreisystems

Quelle: Fraunhofer ISE

ventionelle Solarkollektoren verwendet werden können, die nicht salzwasserbeständig sein müssen und damit deutlich günstiger sind. Außerdem wird bei dem Zweikreisssystem, im Gegensatz zum Kompaktsystem, ein Wärmespeicher eingesetzt, der einen Anlagenbetrieb von bis zu 24 h/Tag ermöglicht. Hierdurch kann eine wesentlich bessere Auslastung der Entsalzungseinheit realisiert werden, was bei größeren Anlagen zu Kostenvorteilen führt. Allerdings steigt der Grad an technischer Komplexität gegenüber dem Kompaktsystem erheblich an, da die Speicherbe- und Entladung geregelt werden müssen. Für einen energieautarken Betrieb ist ebenfalls ein Batteriespeicher zur nächtlichen Versorgung der elektrischen Komponenten erforderlich.

Bei dem Zweikreisystem besteht der Kollektorkreis aus dem Kollektorfeld, einer Zirkulationspumpe, einem meerwasserbeständigem Wärmeübertrager, einem Membranausdehnungsgefäß und einem Speicher, der über zwei Mischventile parallel zum Kollektorfeld in den hydraulischen Kreis integriert ist. Der Salzwasserkreis ist über den Wärmeübertrager an den Kollektorkreis angeschlossen. Er besteht aus mehreren MD-Modulen, die parallel miteinander verschaltet sind, einer Speisewasserpumpe und entsprechenden Zu- und Abläufen. Die Regelung und Steuerung der Anlage erfolgt über einen frei programmierbaren Solarregler.

Um bereits beim Anfahren der Anlage bei geringer Einstrahlung schnell die ge-

wünschte Betriebstemperatur am Wärmeübertrager zu erreichen, wird der Speicherkreis umfahren, solange die Solltemperatur nicht erreicht ist, d. h., es wird nur der mit einer geringen Kapazität behaftete Kollektor-Wärmeübertragerkreis durchströmt. Dazu sind die beiden Dreiwegeventile MV1 und MV2 so geschaltet, dass der Zweig B in diesen Fällen geschlossen ist. Übersteigt die Einlaufftemperatur T6 an der Primärseite des Wärmeübertrager den vorgegebenen Sollwert (80 °C bis 85 °C), so wird über eine Regelung das Mischventil MV1 für den Durchgang A-AB etwas geschlossen und gleichzeitig für den Durchgang B-AB etwas geöffnet. Hierdurch wird ein Teil des heißen Kollektorvorlaufs oben in den Speicher eingeladen, während die gleiche Menge an kalter Flüssigkeit über eine Rückschlagklappe am Speicherboden dem Zweig B zugeführt wird. Der Regler kann auf diese Weise den Sollwert am Wärmeübertrager einlauf während des Betriebs mit „Solar-energie-Überschuss“ einstellen.

Unterschreitet die Kollektorrücklauf-temperatur T4 die Sollwerttemperatur am Wärmeübertrager bei gleichzeitig höherer Speichertemperatur T9, so wird das Mischventil MV1 in seine Ausgangsstellung A-AB zurückgefahren und über das Verteilventil MV2 durch Öffnen des Strangs AB-B wird ein Teilvolumenstrom in den Speicher geführt. Eine Schichtladelanze sorgt dafür, dass der vom Wärmeübertrager kommende, ca. 70 bis 75 °C warme Strom an der Stelle gleicher Temperatur im Speicher eingelagert wird. Die Schichtladung ist besonders an Tagen mit Teilladung des Speichers wichtig. Durch den reduzierten Volumenstrom im Kollektorkreis kann hier noch länger ein hohes Temperaturniveau gehalten werden. Über das



Abb. 6: Kollektorfeld und Entsalzungseinheit des Zweikreisystems auf Gran Canaria

Quelle: Fraunhofer ISE

Mischventil MV2 kann die Solltemperatur am Wärmeübertrager eingeregelt werden. Wenn das Kollektorfeld keine Energie mehr liefert, wird der Zweig AB-A an MV2 ganz geschlossen und die Anlage nur noch aus dem Speicher betrieben, bis die Temperatur T6 auf 55 °C abgefallen ist. Dann wird die Anlage ganz abgeschaltet.

Bisher wurden zwei solcher Systeme als Pilotanlagen gebaut. Die erste Anlage mit einer Tageskapazität von fast 1.000 Litern wurde in Aqaba, Jordanien, am Roten Meer errichtet. Hier wurden 4 MD-Module über ein Kollektorfeld von 72 m<sup>2</sup> mit Wärme versorgt. Der 3-m<sup>3</sup>-Warmwasserspeicher hat einen Anlagenbetrieb von bis zu 16 Stunden ermöglicht. Die zweite Anlage ist in **Abbildung 6** dargestellt. Sie wurde in Gran Canaria aufgebaut und hat bis zu 1.900 Liter Süßwasser pro Tag produziert. Hier wurden ein Kollektorfeld von 90 m<sup>2</sup> zur Versorgung von fünf MD-Modulen und ein 4-m<sup>3</sup>-Wärmespeicher installiert. Im Rahmen eines BMBF-Projekts sowie eines weiteren EU-Projekts werden zurzeit weitere Kompakt- und Zweikreisanlagen geplant, die 2010 in verschiedenen Ländern aufgebaut werden sollen.

#### Fazit

Die bisherigen Arbeiten zur Membrandestillation haben gezeigt, dass das Verfahren grundsätzlich sehr gut geeignet ist, um in der Kombination mit solarthermischen Kollektoren als energieautarke Entsalzungsanlagen Verwendung zu finden. Durch die Betriebserfahrung mit Kompaktanlagen konnte eine Standzeit der Membranmodule von vier Jahren ohne die Verwendung chemischer Additive nachgewiesen werden. Bei dem Betrieb der Zweikreissysteme hat sich immer wieder gezeigt, dass der hohe Komplexitätsgrad die Systeme störanfälliger macht. Deshalb ist hier eine Überarbeitung hinsichtlich der Vereinfachung erforderlich, um solche Systeme zukünftig auch dezentral und wartungsfrei einsetzen zu können. Um die Technologie kommerzialisieren zu können, ist im Februar 2009 die SolarSpring GmbH als Spin-off des Fraunhofer ISE ausgegründet worden.

#### Autor:

Dipl.-Ing. Joachim Koschikowski  
Fraunhofer ISE  
Heidenhofstr. 2  
79110 Freiburg  
Tel.: 0761 4588-5294  
Fax: 0761 4588-9000  
E-Mail: joachim.koschikowski@ise.fraunhofer.de  
Internet: www.ise.fraunhofer.de

## NEUE PERSPEKTIVEN FÜR DIE UMWELT

**ONLINE-REGISTRIERUNG FÜR BESUCHER:**

[www.ifat.de/tickets](http://www.ifat.de/tickets)



**WELTLEITMESSE FÜR WASSER-, ABWASSER-,  
ABFALL- UND ROHSTOFFWIRTSCHAFT**

**13.-17. SEPTEMBER 2010  
IN MÜNCHEN**

**DAS INTERNATIONALE ANGEBOT FÜR  
DIE WASSER- UND ABWASSERWIRTSCHAFT**

- Alle Anwendungsfelder, alle Produkte, alle Dienstleistungen
- Technologieführer, Spezialisten und Newcomer aus aller Welt
- Für jede Anwendung und jeden Einsatz die passende Lösung
- Erstklassiges Rahmenprogramm für Information und Networking
- Sehr breites Leistungsspektrum für die Wasser- und Abwasserwirtschaft

Ausführliche Informationen und Vortragsprogramm unter:  
[www.ifat.de](http://www.ifat.de)

Nehmen Sie auch an der **IFAT CHINA** teil. Mehr unter:  
[www.ifat-china.com](http://www.ifat-china.com)

Neue Messe München  
81823 München  
Tel. (+49 89) 9 49 - 1 13 58  
Fax (+49 89) 9 49 - 1 13 59

