

Eine Übersicht zum Thema “Meerwasserentsalzung unter Einsatz erneuerbarer Energien”

W. Teplitz-Sembitzky (Juni 2000)
(Finanziert durch KfW)

Technical Field:	
<input type="checkbox"/>	Energy / Environment (E)
<input checked="" type="checkbox"/>	Water / Sanitation (W)
<input type="checkbox"/>	Agriculture (A)
<input type="checkbox"/>	Foodprocessing (F)
<input type="checkbox"/>	Manufacturing (M)
This Technical Information is available in:	
<input checked="" type="checkbox"/>	English (e)
<input type="checkbox"/>	French (f)
<input checked="" type="checkbox"/>	German (g)
<input type="checkbox"/>	Spanish (s)
<input type="checkbox"/>	Other:.....

1. Problemüberblick

Rund 97,4% der weltweit verfügbaren Wasservorräte bestehen aus salzhaltigem Meerwasser. Der durchschnittliche Salzgehalt von Meerwasser liegt bei 35 g/Liter (Brackwasser: 7,5 g/Liter), während der nach WHO-Richtlinien maximal zulässige Salzgehalt von Trinkwasser 0,25-0,50 g/Liter beträgt.¹ Von den verbleibenden 2,6% Süßwasser ist der größte Teil in Polarkappen und Gletschern gebunden. Nur weniger als 0,5% der weltweiten Wasservorkommen sind als Trinkwasser geeignet und direkt zugänglich.

Dass Wasser in bestimmten Gegenden knapp ist, hat vielfältige Ursachen. Strategien, die auf eine Verbesserung der Wasserversorgung zielen, reichen von der nachhaltigen Wassernutzung bis hin zum Ferntransport von Wasser. Zu den Angebotsstrategien gehört auch das aufwendige Verfahren der Meerwasserentsalzung.

Trotz hoher Kosten hat die Entsalzung von Meer- und Brackwasser in den letzten 50 Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen, insbesondere in wasserarmen Regionen wie der Mittlere Osten, Nordafrika und die Karibik, aber auch in den USA (Kalifornien, Florida) und auf den

Kanarischen Inseln.² 1998 waren weltweit ca. 12.450 Wasserentsalzungsanlagen mit einer Mindestleistung von 100 m³/Tag in Betrieb. Die insgesamt installierte Leistung betrug 22,7 Millionen m³/Tag, wovon 13,3 Millionen m³/Tag auf Meerwasserentsalzungsanlagen entfielen. Zwei Drittel der Großanlagen verwenden Verdampfungsverfahren, während ein Drittel mit dem Umkehrosmoseverfahren arbeiten.

Die bestehenden Entsalzungsanlagen werden in der Regel mit Abwärme aus Kraftwerken bzw. mit konventionell erzeugtem Strom betrieben. Erneuerbare Energien (Sonne, Wind, Erdwärme, Gezeitenenergie) spielen bislang nur eine marginale Rolle bei der Meerwasserentsalzung. Neben einer unbekanntem Zahl von Kleinstanlagen (< 5 Liter/Tag) gab es Anfang der 90er Jahre knapp über 100 solarthermische

¹ Dieser Wert gilt für Europa, die USA und Japan. Ansonsten gilt Wasser mit einem Salzgehalt von 1 g/Liter als trinkbar.

² “Wasserarmut” liegt vor, wenn das jährliche Nutzwasseraufkommen aus inländischen Quellen unter 1.000 m³ pro Kopf liegt. Bei weniger als 500 m³ pro Kopf spricht man von “absolutem Wassermangel”. Der physiologische Mindestbedarf an Wasser (pro Kopf) liegt zwischen 3 und 4 Liter/Tag. Der pro-Kopf Verbrauch von Haushalten schwankt erheblich, von 55 Liter/Tag (Indien) oder weniger bis zu 630 Liter/Tag (USA). Nimmt man die industriellen und landwirtschaftlichen Verbraucher hinzu, reicht der pro-Kopf Verbrauch an Wasser von 1,5 m³/Tag (Indien) bis 7,3 m³/Tag (USA).

Entsalzungsanlagen mit einer Tagesleistung von 20 m³ oder weniger.³

Der Großteil der Entsatzungskapazitäten befindet sich im Mittleren Osten und in Nordafrika, wo vorwiegend konventionelle Verdampfungsanlagen im Einsatz sind. Rund 27% der weltweiten Entsatzungskapazitäten konzentrieren sich in Saudi Arabien. Auf die USA, wo hauptsächlich Umkehrosmoseanlagen zur Brackwasserentsalzung betrieben werden, entfallen 12% der weltweiten Entsatzungskapazitäten. Während in der Vergangenheit die Investitionen in Entsatzungsanlagen meist mit öffentlichen Mitteln finanziert wurden, besteht in jüngster Zeit ein Trend zur Privatisierung auf Basis von BOO (build-own-operate) and DBOO (design-build-own-operate) Arrangements.

2. Herkömmliche Verfahren zur Meerwasserentsalzung

Die verbreitetsten konventionellen Verfahren zur Meerwasserentsalzung sind⁴

- Destillation, insbesondere *Mehrstufenverdampfung* (MSF - multistage flash evaporation) und *Multi-Effekt-Destillation* (MED - multiple effect distillation), sowie
- *Umkehrosmose* (RO - reverse osmosis).

Beide Verfahren sind energieintensiv und teuer. Unter günstigen Bedingungen (moderne Großanlagen) liegen die Kosten

³

<http://www.unep.or.jp/ietc/publications/techpublications/techpub-8d/desalination.html>

⁴ Andere bekannte Verfahren sind die Elektrodialyse (ein in den USA gebräuchliches Membranverfahren zur Brackwasserentsalzung), die wenig verbreitete Dampfdruckdestillation (geeignet zur Meerwasserentsalzung in kleinen Mengen), und die kommerziell erfolgreiche Gefrierdestillation.

herkömmlicher, mit fossilen Treibstoffen betriebener Meerwasserentsalzung gegenwärtig im Bereich 0,5-2,5 US\$/m³.⁵ Trinkwasser aus leicht zugänglichen Quellen (Oberflächenwasser, Brunnen) kostet dagegen deutlich weniger.

Bei dem Vergleich mit billigeren, leicht zugänglichen Frischwasserquellen ist zu beachten, dass neben den reinen Entsatzungs- bzw. Süßwassererschließungskosten in der Regel noch weitere Wasserbereitstellungskosten für Transport und Verteilung auftreten, bevor das Wasser den Endverbraucher erreicht. So wie beispielsweise küstenferne Verbrauchszentren hohe Überleitungskosten für entsalztes Meerwasser nach sich ziehen, kann einer küstennaher Verbrauchsstandort von hohen Transportkosten für im Landesinneren gewonnenes Frischwasser betroffen sein. Dabei sollte man auch im Auge behalten, dass in vielen Entwicklungsländern die Wassertarife weit unter den tatsächlichen Gestehungskosten liegen, selbst wenn keine Entsatzungs- oder hohe Transportkosten anfallen.

MSF- und MED-Anlagen

Bei dem seit den frühen 60er Jahren kommerziell genutzten MSF-Verfahren wird das Rohwasser bei Betriebstemperaturen von 100 - 110°C auf bis zu 40 Stufen bei sukzessive abnehmenden Druck ohne zusätzliche Wärmezufuhr (d.h. durch Wärmerückgewinnung) bis zur Verdampfung erhitzt und dann im Kondensator verflüssigt. Damit lässt sich nahezu salzfreies, steriles Wasser erzeugen. Da der Energieverbrauch nicht mit dem Salzgehalt des Wassers steigt, eignet sich das Verfahren gerade für die Meerwasserentsalzung. Dennoch ist die Methode vergleichsweise energieintensiv (siehe Tabelle 1). Der Leistungsbereich

⁵ Die Brackwasserentsatzungskosten für RO-Anlagen mit einer Kapazität von 4.000 - 40.000 m³/Tag liegen dagegen im Bereich 0,25 - 0,60 US\$/m³ [3].

der Anlageneinheiten liegt zwischen 4.000 m³/Tag und 45.000 m³/Tag.

MED Systeme operieren bei Temperaturen von 63 - 80°C. Dabei wird das Rohwasser wiederholt (8 - 16 mal) über Wärmetauscherröhren versprüht und unter Rückführung der Kondensationswärme verdampft, bis alle flüchtigen Substanzen entwichen sind. Die Vorteile des MED Verfahrens gegenüber MSF liegen in der geringeren Störanfälligkeit der Anlage (Korrosion, Ablagerungen) und dem niedrigeren Pumpenergiebedarf (50% einer MSF-Anlage gleicher Größe). MED-Anlagen werden in Einheiten mit einer Tagesleistung von 2.000 m³ bis 23.000 m³ gebaut. Ihre Investitionskosten liegen 15-20% unter dem Niveau vergleichbarer MSF-Systeme. Dies erklärt auch, dass in den 90er Jahren die MED-Kapazitäten um 17% stiegen, während der Zuwachs an MSF-Anlagen bei 3% lag.⁶

⇒ *Beide thermischen Destillationsverfahren sind äußerst energieintensiv, selbst wenn die benötigte Heizwärme durch Rückgewinnung von Kondensationswärme effizient genutzt und energiesparend bei der Stromerzeugung (Kraft-Wärme-Kopplung) gewonnen werden kann. Sie sind technisch ausgereift, robust (wartungsarm) und in (rein)wasserknappen Regionen kommerziell bewährt, und können Trink- und Nutzwasser von maximaler Qualität aus fast jeder Art von Rohwasser gewinnen.*

RO-Anlagen

Das Umkehrosmosterfahren, das in den 70er Jahren eingeführt wurde, hat sich zu einer Technologie entwickelt, deren Marktanteil gegenwärtig am schnellsten wächst. Bei dem Verfahren wird salzhaltiges Wasser durch eine

halbdurchlässige Membrane gedrückt, die im Idealfall nur Wassermoleküle ohne gelöstes Salz passieren lässt. Der dafür erforderliche Druck liegt bei der Meerwasserentsalzung zwischen 55 und 80 Bar. Zusätzlich erforderliche Maßnahmen sind die Vorbehandlung des Rohwassers (Filterung, chemische Zusätze) und gegebenenfalls eine Nachbehandlung zur Beseitigung von Bakterien, Keimen oder Gasen. Vorteilhaft sind der vergleichsweise geringe Energiebedarf, die hohe Reinwasserausbeute (bis zu 55%), die modulare Bauweise, und die relativ niedrigen Investitionskosten der Anlagen.⁷ Die Nachteile liegen in der Empfindlichkeit der Membranen gegenüber Belägen ("fouling") und den damit verbundenen hohen Wartungs- und Ersatzteilkosten - sowie dem Risiko von Versorgungsunterbrechungen - und in der im Vergleich zum Verdampfungsverfahren geringeren Reinwasserqualität. Verbesserte und billigere Membranen sowie effizientere Vorbehandlungsmethoden leisten der Technologie weiter Vorschub.

⇒ *Das RO-Verfahren zeichnet sich im Vergleich zur thermischen Destillation durch einen niedrigeren Energiebedarf und geringere Investitionskosten aus, ist aber nach wie vor mit dem Risiko hoher Wartungs- und Instandhaltungskosten und einer geringeren Versorgungssicherheit behaftet, auch wenn sich der Markt zunehmend in Richtung auf RO-Anwendungen entwickelt.*

⁶ IDA News, Band 3, Heft 3-4 (März-April 2000), <http://www.ida.bm/>

⁷ Selbst Kleinanlagen für einen Wasserbedarf von weniger als 10 m³/Tag werden angeboten.

Zwitter- und Mehrzweckanlagen

Die meisten im arabischen Raum genutzten Meerwasserentsalzungs-technologien sind Teil von Mehrzweckanlagen, die mit Kraft-Wärme-Kopplung arbeiten: Eine Dampf- oder Gasturbine erzeugt Strom, und die Entsalzungsanlage (MSF/MED) nutzt die Abwärme auf dem für die Destillation erforderlichen Temperaturniveau. Es wird dadurch deutlich weniger Energie verbraucht als bei der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme. Nachteilig ist allerdings, insbesondere bei Gegendruckanlagen, dass der Turbinenbetrieb und die Stromproduktion durch den Wärmebedarf der Entsalzungsanlage, d.h. dem Wasserbedarf diktiert wird. Außerdem können thermische Entsalzungsanlagen das Kuppelprodukt Strom nicht effizient als Energiequelle nutzen.

Daneben besteht die Möglichkeit, die Kraft-Wärme-Kopplung zum gleichzeitigen Betrieb einer MSF/MED-Anlage (Wärme) und einer RO-Anlage (Strom) zu nutzen, was die Abhängigkeit von einer einzelnen Entsalzungstechnologie verringert. Darüber hinaus erlaubt diese Option, die kapitalintensivere MSF/MED-Anlage im Vollastbereich zu betreiben und mit der RO-Anlage auf Schwankungen des Wasserbedarfs zu reagieren, wobei Überschussstrom an das Netz oder andere Verbraucher abgegeben/verkauft wird [1].

Energieverbrauch und Kosten

Tabelle 1 gibt einen Überblick über den Energieverbrauch der verschiedenen Verfahren. Aktuelle Investitionskosten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Tabelle 2 zeigt auch, dass die spezifischen Kapitalkosten von Großanlagen ($> 30.000 \text{ m}^3/\text{Tag}$) zur Zeit bei $0,30 \text{ US\$/m}^3$ liegen.⁸ Neben den

Kapitalkosten fallen variable und fixe Betriebskosten (einschließlich Ersatzinvestitionen) an. Nicht berücksichtigt sind die Kosten der Rohwasserzufuhr, die Entsorgungskosten der Sole (sofern relevant) sowie alle Kosten, die mit dem Transport und der Verteilung des Wassers zu den Endverbrauchern verbunden sind.

⁸ Bei kleineren Anlagen ($10 - 2.500 \text{ m}^3/\text{Tag}$) können die spezifischen Investitionskosten auf über

$1.500 \text{ US\$/m}^3/\text{Tag}$ steigen, mit Kapitalkosten von mehr als $0,5 \text{ US\$/m}^3$.

Tabelle 1: Spezifischer Energieverbrauch konventioneller Meerwasserentsalzungsanlagen

Verfahren	Strom (kWh/m ³)	Wärme (MJ/m ³)
RO	4,35 - 9,72	0
MSF	2,84 - 5,67	ca. 231
MED	2,03 - 4,05	ca. 197

Quelle: [2], [3], [8] sowie IDA News (<http://www.ida.bm>) und "World Water and Environmental Engineering" (May/June 2000)

Tabelle 2: Spezifische Investitionskosten für RO- und MSF-Anlagen (US\$/m³/Tag)

Leistung (m ³ /Tag)	33.600	50.400	94.625	4 x 45.250
RO Inv.-Kosten (US\$/m³/Tag) Saudi Arabien ¹⁾ Tampa Bay ²⁾	1222	1064	1005	
MSF-Inv.kosten (US\$/m³/Tag) Dubai ³⁾				1250
Spezifische Kapitalkosten⁴⁾ (US\$/m³)	0,32	0,28	0,26	0,31
Spezifische Entsalzungs-kosten⁵⁾	RO: 0,95 US\$/m ³ (1,90 DM/m ³) MSF: 1,05 US\$/m ³ (2,10 DM/m ³)			

- 1) niedrigstes Preisangebot April 2000 (IDA News, Band 9, Heft 3-4; <http://www.ida.bm>)
- 2) <http://www.winternational.com>
- 3) mittleres Preisangebot Februar 2000 (IDA News, Band 9, Heft 1-2; <http://www.ida.bm>)
- 4) 5 % jährliche Verzinsung, 20 Jahre Nutzungsdauer, 90% (85%) Auslastung bei MSF (RO); ohne Berücksichtigung der Kapitalkosten für die Energiebereitstellung.
- 5) gemäß Beispielrechnungen (siehe unten).

Beispiel: RO-Anlage (30.000 m³/Tag):

Unter der Annahme, dass die spezifischen Investitionskosten einer RO-Anlage 2.500 DM/m³/Tag betragen, fixe jährliche Wartungs- und Betriebskosten (einschließlich Ersatzinvestitionen) in Höhe von 8% der Investitionskosten anfallen, und 6 kWh/m³ zum Preis von 0,10 DM/kWh verbraucht werden, ergeben sich bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren (5% Verzinsung)⁹ und einem

Auslastungsgrad von 85% spezifische Destillatkosten von 1,90 DM/m³. Der Betrag setzt sich wie folgt zusammen:¹⁰

Kapitalkosten	0,65 DM/m ³ (34%)
Fixe Betriebskosten	0,65 DM/m ³ (34%)
Energiekosten	0,60 DM/m ³ (32%)
Summe	1,90 DM/m³ (100%)

Beispiel: MSF-Anlage (45.000 m³/Tag):

Rendite kann jedoch deutlich über 5% liegen und entsprechend höhere Kapitalkosten verursachen.
¹⁰ Kosten für die Rohwasserzufuhr und die Entsorgung der Sole sind in dem Betrag nicht enthalten.

⁹ Hier wie an anderer Stelle wird mit einer jährlichen Verzinsung (Opportunitätskosten) von 5% gerechnet, da dies der Meßplatte der deutschen FZ bei einzelwirtschaftlicher Betrachtung entspricht. Eine marktkonforme Verzinsung bzw.

Unter der Annahme, dass die spezifischen Investitionskosten einer MSF-Anlage 2.700 DM/m³/Tag betragen, fixe jährliche Wartungs- und Betriebskosten (einschließlich Ersatzinvestitionen) in Höhe von 3% der Investitionskosten anfallen, und 3 kWh/m³ (Strom) zum Preis von 0,10 DM/kWh sowie 230 MJ/m³ zum Preis von 3,80 DM/GJ (Abwärmenutzung thermisches Kraftwerk)¹¹ verbraucht werden, ergeben sich bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren (5% Verzinsung) und einem Auslastungsgrad von 90% spezifische Destillatkosten von 2,22 DM/m³. Der Betrag setzt sich wie folgt zusammen:¹²

Kapitalkosten	0,66 DM/m ³ (31%)
Fixe Betriebskosten	0,25 DM/m ³ (12%)
Energiekosten	1,19 DM/m ³ (57%)
Summe	2,10 DM/m ³ (100%)

3. Meerwasserentsalzung unter Einsatz erneuerbarer Energien

Solarthermische Entsalzung

Einfache *Solardestillatoren* ("solar stills") arbeiten nach dem Prinzip der Entspannungsverdampfung im Temperaturbereich von 70-90°C und gewinnen 2,5-4,5 Liter pro m² Kollektorfläche in Abhängigkeit von der Solareinstrahlung und dem Wirkungsgrad der Anlage. Sie werden oftmals in Modulen für 5-8 Liter/Tag angeboten und kosten etwa in den USA zwischen US\$ 490 und US\$ 690.¹³ Bei einem Preis von 700 DM pro m² Kollektorfläche¹⁴ und einer

¹¹ Bei direkter Wärmerzeugung lägen die Kosten bei über 10 DM/GJ.

¹² Kosten für die Rohwasserzufuhr und die Entsorgung der Sole sind in dem Betrag nicht enthalten.

¹³ <http://www.sunlightworks.com> und <http://www.primenet.com/~evsolar/prives.html>

¹⁴ Die Preise für Flachkollektoren liegen gegenwärtig bei 600 - 1.000 DM/m².

Entsalzungsleistung von 4 Liter/m²/Tag ergeben sich unter der Annahme einer zwanzigjährigen Nutzungsdauer (bei jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten in Höhe von 3% der Investitionskosten und einer jährlichen Verzinsung von 5%) spezifische Destillatkosten von rund 52,86 DM/m³.

Multi-Effekt-Destillatoren (Verdunster), die Wasser mehrstufig unter direkter und indirekter Wärmezufuhr von Verdunstungsflächen verdampfen und sich aus Kollektoren, Speicher und einem Entsalzungsmodul zusammensetzen, können deutlich höhere Destillatausbeuten erzielen. Eine von ZAE Bayern auf den Kanarischen Inseln getestete Anlage produzierte durchschnittlich knapp 12 Liter/m²/Tag.¹⁵ ZAE schätzt die Kosten des Entsalzungsmoduls auf 30.000 DM/m³/Tag und hofft, dass sich das Modul bei Massenfertigung zu 15.000 DM/m³/Tag herstellen lässt. Damit lägen die Destillatkosten bei insgesamt 22,15 DM/m³ (20 Jahre Lebensdauer, 5% Verzinsung, jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten in Höhe von 3% der Investitionskosten).

Eine weitere Steigerung der Destillationsausbeute erhofft sich das Fraunhofer Institut von der Verwendung korrosionsfester Kunststoffabsorber und der Einbindung thermischer Speicher zur Sicherstellung eines 24-Stunden-Betriebs. Angestrebt wird eine Tagesproduktion von 20 Litern pro m² Kollektorfläche.¹⁶ Unter den obigen Annahmen ließen sich dann die gesamten Entsalzungskosten auf unter 20 DM/m³ senken.

Die Verwendung von *Rinnenkollektoren* zur Wasserentsalzung wurde insbesondere in den USA erprobt. Am Markt erhältlich sind beispielsweise Kleinanlagen, die MSF-Destillatoren an Rinnenkollektoren als Dampferzeuger

¹⁵ <http://zae4router.zae.physik.tu-muenchen.de/projekte/mwe/mwe.html>

¹⁶ <http://www.ise.fhg.de/>

anschließen: Eine typische Einheit nutzt 48 kW zur dreistufigen Gewinnung von 450 Liter/Tag.¹⁷ Allein für die Kollektoren (ca. 45 m²) müssen gegenwärtig rund US\$ 10.000 veranschlagt werden, was zu spezifischen Entsalzungskosten von 7,90 US\$/m³ (15,80 DM/m³) führt (5% Verzinsung, 20-Jahre Nutzungsdauer, jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten in Höhe von 3% der Investitionskosten, 85% Auslastung). Hinzu kommen die Kosten des Destillationsmoduls.

Ein weiterer Nachteil der Solardestillatoren ist ihr enormer Flächenbedarf bei größeren Wassermengen. Um zum Beispiel 4.000 m³/Tag zu produzieren, wird eine Kollektorfläche von 20 Hektar (20 Liter/m²) bis 100 Hektar (4 Liter/m²) benötigt. Dort wo Land knapp ist, etwa in der unmittelbaren Nähe von Städten, kann der Flächenverbrauch die Kosten der Entsalzung erheblich steigern.

⇒ *Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die solarthermische Meerwasserentsalzung äußerst kostspielig und flächenintensiv ist. Selbst im günstigsten Fall muss man mit spezifischen Destillationskosten von um die 20 DM/m³ rechnen. Alle zur Zeit kommerziell angebotenen Anlagen haben deutlich höhere Kosten. Vorteilhaft gegenüber konventionellen Verdampfungsverfahren ist jedoch, dass mit kleinen Anlageneinheiten zur Bereitstellung geringer Mengen Frischwasser operiert werden kann.*

Geothermische Entsalzung

An Standorten, wo Reinwasser knapp ist und Erdwärme auf einem Temperaturniveau von 80-100°C zu vertretbaren Kosten (< 15 DM/GJ bzw. < 3,45 DM/m³) erschlossen und gefördert werden kann, darf über geothermische

Entsalzung in Verdampfungsanlagen nachgedacht werden. Allerdings sind solche Anwendungsfälle nicht sehr verbreitet. Bei höheren Temperaturen besteht zusätzlich die Möglichkeit, Strom aus Erdwärme zu erzeugen und damit Entsalzungsanlagen zu betreiben (siehe unten). Dies ändert aber nichts an der Feststellung, dass die Rolle von Erdwärme für die Meerwasserentsalzung unbedeutend ist.

Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien

Eine weitere in jüngster Zeit verfolgte Option ist der Einsatz erneuerbarer Energien zur Erzeugung von Strom zum Betrieb von RO-Entsalzungsanlagen. Relevant sind in diesem Zusammenhang vor allem Wind- und Sonnenenergie. Strom aus Erdwärme kommt nur für Standorte mit geeigneten/billigen Lagerstätten in Frage. Und das weltweite Potential für Strom aus Gezeitenenergie ist vernachlässigbar gering; jährlich entspricht es etwa dem deutschen Stromverbrauch.¹⁸

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zum Betrieb von Entsalzungsanlagen hat mit zwei Problemen zu kämpfen:

- Strom aus erneuerbaren Energien ist vergleichsweise teuer (siehe Tabelle 3). Lediglich Windkraftanlagen an Standorten mit außergewöhnlich hohen Windgeschwindigkeiten sowie geothermische Kraftwerke, die auf billige Erdwärme zugreifen können, sind annähernd in der Lage, mit Strom aus fossil befeuerten Kraftwerken zu konkurrieren (siehe Tabelle 3).
- Sonne und Wind sind nicht stetig verfügbar. Der Betrieb von RO-

¹⁸ Bisher ist nur ein einziges Gezeitenkraftwerk in Betrieb (an der französischen Atlantikküste), und es ist nicht zu erwarten, dass in den nächsten Jahren neue Einheiten gebaut werden.

¹⁷ <http://www.chatlink.com/~soltherm/desal.htm>

Anlagen verlangt aber eine unterbrechungsfreie Stromversorgung bei konstanter Last; Lastschwankungen würden die Anlagenkomponenten überstrapazieren und insbesondere die teuren Membranen in kurzer Zeit unbrauchbar machen. Erfolgt die

Nutzung von Sonnen- oder Windkraftwerken im Inselbetrieb, kann eine stetige Stromversorgung nur durch ein Notstromaggregat oder einen Speicher sichergestellt werden, was die Kosten dieser Lösung zusätzlich in die Höhe treibt.

Tabelle 3: Stromgestehungskosten beim Einsatz erneuerbarer Energien zum Betrieb von RO-Anlagen

Quelle	Stromgestehungskosten (DM/MWh)	Energiekosten der Entsalzung (DM/m ³) ⁴⁾	Gesamtkosten der Entsalzung (DM/m ³) ⁷⁾
Wind¹⁾			
4 m/s	240 - 530	1,45 - 3,12	3,00 - 4,67
6 m/s	100 - 130	0,60 - 0,78	2,15 - 2,33
8 m/s	60 - 70	0,36 - 0,42	1,91 - 1,97
Sonne			
Photovoltaik ²⁾	760 - 910	4,56 - 5,46	6,11 - 7,01
Solarthermik ³⁾	410 - 570	2,46 - 3,42	4,01 - 4,97
Gezeiten⁵⁾	180 - 230	1,10 - 1,40	2,65 - 2,95
Erdwärme⁶⁾	120 - 700	0,72 - 4,20	2,27 - 5,75
Konventionelles Kraftwerk	60 - 100	0,36 - 0,60	1,66 - 1,90

- 1) 1.900 DM/kW, 20 Jahre Nutzungsdauer, 5% Verzinsung, jährliche Wartungskosten in Höhe von 4% der Investitionskosten. Die Bandbreite für eine gegebene durchschnittliche Windgeschwindigkeit erklärt sich aus der unterschiedlichen Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten.
- 2) 12.000-14.500 DM/kW, 20 Jahre, 5% Verzinsung, 20 Jahre, jährliche Wartungskosten in Höhe von 3% der Investitionskosten.
- 3) Parabolrinnentechnologie; 6.500-9.000 DM/kW, 20 Jahre, 5% Verzinsung, jährliche Wartungskosten in Höhe von 3% der Investitionskosten.
- 4) Ohne Berücksichtigung von Speicher- oder Backup-Kosten, die bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien anfallen, um den Dauerbetrieb der RO-Anlage sicher zu stellen; der Energieverbrauch der RO-Anlage wird mit 6 kWh/m³ angenommen.
- 5) 3.500-4.600 DM/kW, 120 Jahre Nutzungsdauer, 5% Verzinsung, 25% Auslastung, 5% Verzinsung, jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten in Höhe von 6% der Investitionskosten..
- 6) 100-1.000 kW; 200-1.000 Meter Förderhöhe; 100°-140°C [7].
- 7) Energie- und Fixkosten. Fixe Kosten für RO-Großanlage mit Strom aus konventionellem Kraftwerk: 1,30 DM/m³. Fixkosten für mit Strom aus erneuerbaren Energien betriebene kleinere RO-Anlage (< 2.500 m³/Tag): 1,55 DM/m³ (3.000 DM/m³/Tag, 20 Jahre, 5% Verzinsung, Wartungs- und Instandhaltungskosten in Höhe von 8% der Investitionskosten, 85% Ausnutzung).

Tabelle 3 macht deutlich, dass mit erneuerbaren Energien erzeugter Strom selbst unter Vernachlässigung von Speicher- und/oder Backup-Kosten der Regel erheblich teurer ist als Strom aus konventionellen Kraftwerken, was sich in entsprechend höheren Energiekosten bei der RO-Entsalzung niederschlägt.

⇒ Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass zur Zeit die Stromgewinnung aus erneuerbaren Energiequellen strategisch nicht dazu geeignet ist, die Kosten der Meerwasserentsalzung zu senken. Das Gegenteil ist der Fall: Technische Anpassungsprobleme und hohe Investitionskosten bei der Stromerzeugung führen zu einer -

teilweise erheblichen - Verteuerung der Entsalzung in RO-Anlagen.

4. Schlussfolgerungen

- Meerwasserentsalzung ist zwar immer aufwendig und teuer, die Einbindung von erneuerbaren Energien wie Sonne, Wind, Erdwärme oder Gezeitenenergie - bzw. die Anpassung von Entsalzungssystemen auf erneuerbare Energien - ist jedoch meist eine besonders unwirtschaftliche und kostspielige Form der Wasserbereitstellung.
- Die Nutzung konventioneller Energien und Meerwasserentsalzungsverfahren, insbesondere in Kombi-Prozessen, hat gegenüber erneuerbaren Energien nach wie vor deutliche Kostenvorteile und stellt deshalb in der Regel die erste Wahl dar.
- Der Einsatz von erneuerbaren Energien zur thermischen Meerwasserentsalzung lässt sich nur in Nischen (z.B. bei Zugriff auf billige Erdwärme) oder in dezentralen Anwendungen zur Bereitstellung geringer Mengen Frischwasser nahe der Küste (z.B. Dorfgemeinschaften) rechtfertigen, sofern dies die Zahlungsfähigkeit und Zahlungsbereitschaft der Verbraucher zulässt.
- Die Verwendung von Strom aus Windenergie zum Betrieb kleiner RO-Anlagen (10 -2.500 m³/Tag) kann sich an Standorten mit überdurchschnittlich hohen Windgeschwindigkeiten gegenüber konventionellen Stromerzeugungslösungen (z.B. Dieselaggregate) als konkurrenzfähig erweisen, sofern billige Backup- oder Speicherlösungen verfügbar sind. Denkbar sind auch frischwasserknappe, küstennahe Standorte mit billigen Erdwärmevorkommen, wo Geothermalstrom zum Betrieb von RO-Anlagen eine vergleichsweise günstige Alternative ist. Strom aus

Sonnenenergie erweist sich bei den gegenwärtigen Modul- und Anlagenpreisen aber grundsätzlich als zu teuer, um für die Meerwasserentsalzung in Frage zu kommen.

Quellenverzeichnis

- [1] Altmann, T., "New Power and Water Co-Generation Concept with Application of Reverse Osmosis Desalination", Salzgitter AG, (<http://www.sab.de/cogene.htm>)
- [2] California Coastal Commission, "Seawater Desalination in California", 1993, (<http://www.ceres.ca.gov/coastalcomm/desalrpt/>)
- [3] International Desalination Association, "ABC's of Desalting", (<http://www.ida.bm/abcs.htm>)
- [4] Mielke, J.E., "Desalination R&D: The New Federal Program", Report for US Congress, 1999, (<http://www.cnie.org>)
- [6] Murakami, M., "Managing Water for Peace in the Middle East, UN, 1995, (<http://www.unu.edu/unupress/unubooks>)
- [7] Vimmerstedt, L., "Opportunities for Small Geothermal Projects", NREL, 1998, (<http://www.nrel.gov/geothermal/geopublications.html>)
- [8] World Wide Water, "Desalination of Water and Seawater", (<http://www.world-wide-water.com>)