



# Solarthermische Kraftwerke für die Meerwasserentsalzung

## Zusammenfassung

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)**  
Institut für Technische Thermodynamik  
Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung

Im Auftrag des

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit



*Projektleitung:*

*Dr. Franz Trieb  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Technische Thermodynamik  
Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung  
Pfaffenwaldring 38-40  
D-70569 Stuttgart  
Deutschland  
Tel.: ++49-(0)711 / 6862-423  
Fax: ++49-(0)711 / 6862-783  
Email: [franz.trieb@dlr.de](mailto:franz.trieb@dlr.de)  
<http://www.dlr.de/tt/system>*

*Stuttgart, November 2007*

Der **AQUA-CSP** Endbericht in englischer Sprache steht zum download bereit unter:  
<http://www.dlr.de/tt/aqua-csp>

Inhalte:

Introduction and Summary

Chapter 1: Review of CSP and Desalination Technology

Chapter 2: Natural Water Resources of the MENA Region

Chapter 3: Freshwater Demand and Deficits in MENA

Chapter 4: Seawater Desalination Markets in MENA

Chapter 5: Socio-Economic Impacts

Chapter 6: Environmental Impacts

Chapter 7: Bibliography

Annex 1: Selection of Reference Plant Configuration

Annex 2: Controversial Publications on CSP/RO and CSP/MED

Annex 3: Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS)

Annex 4: Current Project Proposals for CSP Desalination

Annex 5: Individual Country Data

Annex 6: Concept of Multi-Purpose Plants for Agriculture

Annex 7: Abbreviations

## **AQUA-CSP Team**

### **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (Deutschland)**

Dr. Franz Trieb, Dipl. Geo. Julia Gehrung, Dr. Peter Viebahn, Dr. Christoph Schillings, Dipl. Phys. Carsten Hoyer

### **National Energy Research Center (Jordanien)**

Eng. Malek Kabariti, Waled Shahin, Ammar Al-Taher

### **University of Aden, (Jemen)**

Prof. Dr. Hussein Altowaie

### **University of Sana'a, (Jemen)**

Prof. Dr. Towfik Sufian

### **University of Bahrain, (Bahrain)**

Prof. Dr. Waheeb Alnaser

### **Prof. Dr. Abdelaziz Bennouna, formerly at CNR (Marokko)**

### **Intern. Forschungszentrum für Erneuerbare Energien e.V. (Deutschland)**

Dr. Nasir El-Bassam

### **Kernenergien – The Solar Power Company (Deutschland)**

Dipl.-Ing. Jürgen Kern

### **Nokraschy Engineering GmbH (Deutschland)**

Dr.-Ing. Hani El-Nokraschy

### **Deutsche Gesellschaft Club of Rome (Deutschland)**

Dr. Gerhard Knies, Dr. Uwe Möller

### **House of Water and Environment (Palestina)**

Dr. Amjad Aliewi, Hafez Shaheen

### **Center for Solar Energy Studies (Libyen)**

Dr. Ibrahim Elhasairi

### **Centre de Developpement des Energies Renouvelables (Marocco)**

Madame Amal Haddouche (Director General)

### **Universität Bremen (Deutschland)**

Dr. Heike Glade

## **Danksagung:**

Das AQUA-CSP Team dankt dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) für die Förderung des Projekts, Ralf Christmann vom BMU, Nadine May und Ludger Lorych von VDI/VDE/IT für die effiziente Projektverwaltung, Dr. Jürgen Scharfe von entropie, München für die freundliche Durchsicht des technischen Teils, Sabine Lattemann von der Universität Oldenburg für die neuesten Erkenntnisse zum Umweltschutz, die Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation (TREC) für die intensive und fruchtbare Diskussion der Ergebnisse, unseren Kollegen vom DLR und vielen anderen, die an dem erfolgreichen Abschluss des Projektes mitgewirkt haben.

## **Vorwort**

Vor einigen tausend Jahren führten günstige Bedingungen in fruchtbaren Flussniederungen in aller Welt dazu, dass dort nomadische Gruppen sesshaft wurden und landwirtschaftliche Niederlassungen gründeten. Die Einwohner dieser Regionen bauten Städte, entwickelten die Töpferei, die Nutzung von Metallen und die Schrift, domestizierten verschiedene Tierarten und bildeten komplexe soziale Strukturen. Kurzum, als Jäger und Sammler zu Siedlern und Bauern wurden, gründeten sie die moderne Zivilisation.

Dies taten sie in fast allen Lebensbereichen mit einer Ausnahme, der Energieversorgung: unsere heutige Zivilisation hängt immer noch vom sammeln fossiler Energieträger ab, genau wie unsere nomadischen Vorfahren, die Beeren sammelten und Wild jagten bis diese Ressourcen erschöpft waren und sie weiterwandern mussten. Bis heute werden fossile Energieträger gesucht, gesammelt und bis zum letzten Tropfen verbraucht. Es wird immer deutlicher spürbar, dass dies kein zivilisiertes Verhalten ist, und schon gar kein nachhaltiges, da bisher kein anderer Planet in Sicht ist, auf den der Nomade Mensch auswandern könnte, nachdem die fossilen Energiere Ressourcen verbraucht und die Atmosphäre mit deren Verbrennungsrückständen in eine gefährliche Klimafalle verwandelt worden ist.

Die ehemaligen Jäger und Sammler fanden jedoch eine Lösung des Problems: sie wurden Bauern, säten und pflanzten im Frühjahr und ernteten im Herbst, kurzum, sie nutzen ihr technisches Know-how und die reichlich verfügbare Energie der Sonne zum Überleben. Genau dieses Überlebenskonzept ist auch im Energiesektor überfällig: wir müssen Energiebauern werden, Windräder, Wasser-, Wellen- und Gezeitenkraftwerke, Biomasse-, Geothermie- und Photovoltaikanlagen, Sonnenkollektoren und solarthermische Kraftwerke pflanzen und deren nutzbare Energie für unseren Bedarf ernten.

Dasselbe gilt für Wasser: wenn die frei verfügbaren, natürlichen Ressourcen aufgrund einer ständig wachsenden Bevölkerung knapp werden, müssen wir Regenspeicherbecken, Abwassertaufbereitungsanlagen und mit erneuerbarer Energie betriebene Meerwasserentsalzungsanlagen säen und Trinkwasser für unseren täglichen Bedarf ernten. Vielleicht finden wir – wie unsere Vorfahren – als Nebenprodukt dieser „zivilisierteren“ Form der Energie- und Wasserversorgung eine neue, vielleicht friedlichere und kooperativere Form des Zusammenlebens.

Das hier beschriebene Konzept lässt durchaus noch Fragen offen. Eine Studie wie diese kann nicht alle Antworten liefern. Es ist jedoch schon viel gewonnen, wenn endlich die richtigen Fragen gestellt und die Antworten in der richtigen Richtung gesucht werden. Die AQUA-CSP Studie ist wie ihre Vorläufer MED-CSP und TRANS-CSP ein Wegeplan, kein Rollstuhl: sie kann das mittel- und langfristige Ziel sichtbar machen und sogar einen Weg dorthin weisen, aber sie wird uns nicht ans Ziel bringen, wir müssen den Weg dorthin selbst gehen.

Franz Trieb  
Stuttgart, 12. November, 2007

*Es ist nicht wichtig, die Zukunft vorherzusagen,  
sondern auf sie vorbereitet zu sein.*

*Perikles (493 – 429 a. C.)*

*Unsere Welt kann nur durch die Schaffung bleibender Werte entwickelt werden,  
aber weder durch Luxusgüter noch durch Sparmassnahmen.*

*(Erkenntnis des Verfassers während der Erstellung dieses Berichts)*

## Einleitung

Der allgemein verwendete Begriff "solare Wasserentsalzung" beschreibt in der Regel Kleinanlagen für den dezentralen Einsatz in entlegenen Gebieten, ein durchaus wichtiges Element ländlicher Entwicklung, aber keine Lösung für die ansteigenden Wasserdefizite in den schnell wachsenden Ballungszentren im Mittleren Osten und Nordafrika.

Große, konventionelle Meerwasserentsalzungsanlagen gelten als teuer und energieintensiv und werden deshalb nur in den reichen Ländern des arabischen Golfs als potentielle Quelle der Trinkwasserversorgung angesehen, vor allem angesichts der schnell steigenden Kosten fossiler Energieträger wie Öl, Erdgas und Kohle. Auch die Umweltwirkungen großer Meerwasserentsalzungsanlagen werden zunehmend als kritisch empfunden. Sie reichen von den Emissionen der notwendigen Energieversorgung bis hin zu den Abwässern der Anlagen, die durch ihren hohen Salzgehalt und durch chemische Zusatzstoffe als problematisch gelten.

Aufgrund dieser Einschätzung schließen die meisten Strategien gegen eine „Globale Wasserkrise“ die Meerwasserentsalzung als tragfähiges Element der Wasserversorgung aus. Die meisten Empfehlungen beschränken sich auf eine effizientere Wassernutzung, die Wiederverwendung und Aufbereitung von Abwasser, eine Verbesserte Verteilung und Abrechnung von Stadtwasser und verbesserte Bewässerungssysteme. Hinzukommt die Empfehlung, die Landwirtschaft in den ariden Ländern des Mittleren Ostens und Nordafrikas (MENA – englisch Middle East and North Africa) zurückzufahren und stattdessen Nahrungsmittel aus Regionen mit besseren Bedingungen zu importieren. Empfehlungen, die die Meerwasserentsalzung als zusätzliche Trinkwasserquelle befürworten, stellen die Kernenergie als unverzichtbare Option für diesen Zweck dar.

Keine der derzeit diskutierten Strategien beinhaltet die Nutzung solarthermischer Kraftwerke als Energiequelle für die Meerwasserentsalzung als mögliche Alternative. Die schnell wachsende Bevölkerung in der Region und die rasch versiegenden Grundwasserressourcen erfordern jedoch bezahlbare, sichere und umweltverträgliche – kurz nachhaltige – Lösungen des Trinkwasserproblems. Diese Lösungen müssen sicher innerhalb weniger Jahrzehnte realisierbar sein und der Größenordnung der Trinkwasserdefizite gerecht werden. Strategien, die noch wesentliche technische Durchbrüche erfordern, könnten im Falle eines Scheiterns die ganze Region gefährden.

Erneuerbare Energieressourcen sind inzwischen weltweit als nachhaltige Energiequellen akzeptiert und werden mit Wachstumsraten von über 25 % pro Jahr im Energiesektor eingeführt. Unter allen erneuerbaren Energiequellen ist die Sonnenenergie jene, die am besten mit dem Wasserbedarf korreliert, da sie die wichtigste Ursache für knappe Wasserressourcen darstellt.

Das Ressourcenpotential solarthermischer Kraftwerke übersteigt den weltweiten Energiebedarf um mehrere Größenordnungen. Die Umweltwirkungen dieser Technologie sind akzeptabel, da sie auf rezyklierbaren und nicht knappen Rohstoffen wie Stahl, Glas und Beton für die konzentrierenden thermischen Kollektoren basiert.

Die Wärmeenergie aus konzentrierenden solarthermischen Kollektoren ersetzt den Brennstoff in konventionellen (Dampf-) Kraftwerken zu Kosten, die einem Barrel Rohöl bei einem Preis von 50 US\$ (8.8 US\$/GJ) entsprechen (zum Vergleich: der Weltmarktpreis von Erdöl liegt derzeit über 90 US\$/barrel). Zudem sinken die Kosten solarthermischer Kollektoren aufgrund von Skaleneffekten, Massenproduktion und technischem Lernen jedes Mal um ca. 10-15%, wenn die installierte Leistung weltweit verdoppelt wird. Bis zum Jahr 2020 sind äquivalente Kosten von 20 US\$/barrel (3.5 US\$/GJ) für den solaren „Brennstoff“ erreichbar, und langfristig sogar unter 15 US\$/barrel (2.5 US\$/GJ). Solarthermische Kraftwerke liefern Energie „rund um die Uhr“ für den kontinuierlichen Betrieb von Entsalzungsanlagen und stellen damit die „natürliche“ Energiequelle für die Meerwasserentsalzung dar.

## **Ergebnisse**

Im Rahmen der AQUA-CSP Studie wurden die Potentiale solarthermischer Kraftwerkstechnologie zur Versorgung großer Meerwasserentsalzungsanlagen für die urbanen Zentren im Mittleren Osten und Nordafrika ermittelt.

Die Studie liefert eine umfassende Datenbasis über technische Optionen, den Wasserbedarf, natürliche Ressourcen und Defizite der Wasserversorgung sowie die mittel- und langfristigen Marktpotentiale für die Meerwasserentsalzung mit solarthermischen Kraftwerken für insgesamt zwanzig Länder in der Region. Damit kann die Studie als Informationsbasis für die Entwicklung der politischen Rahmenbedingungen verwendet werden, die für die Realisierung eines solchen nachhaltigen Konzepts notwendig sind. Sie zeigt die verfügbaren solaren Energieressourcen und die voraussichtlichen Kosten solar entsalzten Meerwassers, ein Langfristszenario für die Einführung solarthermischer Kraftwerke im Wasserversorgungssektor, und bewertet die potenziellen sozio-ökonomischen und ökologischen Auswirkungen eines massiven Ausbaus dieser Technologie.

Es gibt eine Reihe guter Gründe für die Implementierung großer solarthermischer Kraftwerke für die Meerwasserentsalzung, die in der AQUA-CSP Studie identifiziert werden konnten:

- Solarthermische Kraftwerke verfügen über thermische Energiespeicher und eine Zufeuerung mit (Bio-) Brennstoffen, die eine kontinuierliche Versorgung mit gesicherter, jederzeit verfügbarer Leistung erlauben, die eine Voraussetzung für den Betrieb großer Entsalzungsanlagen ist,
- solarthermische Entsalzungsanlagen können in sehr großen Einheiten bis zu einigen 100,000 m<sup>3</sup>/Tag realisiert werden,
- die großen solaren Energiepotenziale im Mittleren Osten und Nordafrika können spielend die notwendigen Energiemengen bereitstellen, die zur Behebung der wachsenden Trink-



wasserdefizite durch Meerwasserentsalzung notwendig sind, die ansonsten von heute 50 Milliarden Kubikmetern pro Jahr bis 2050 auf über 150 Mrd. m<sup>3</sup>/a anwachsen könnten,

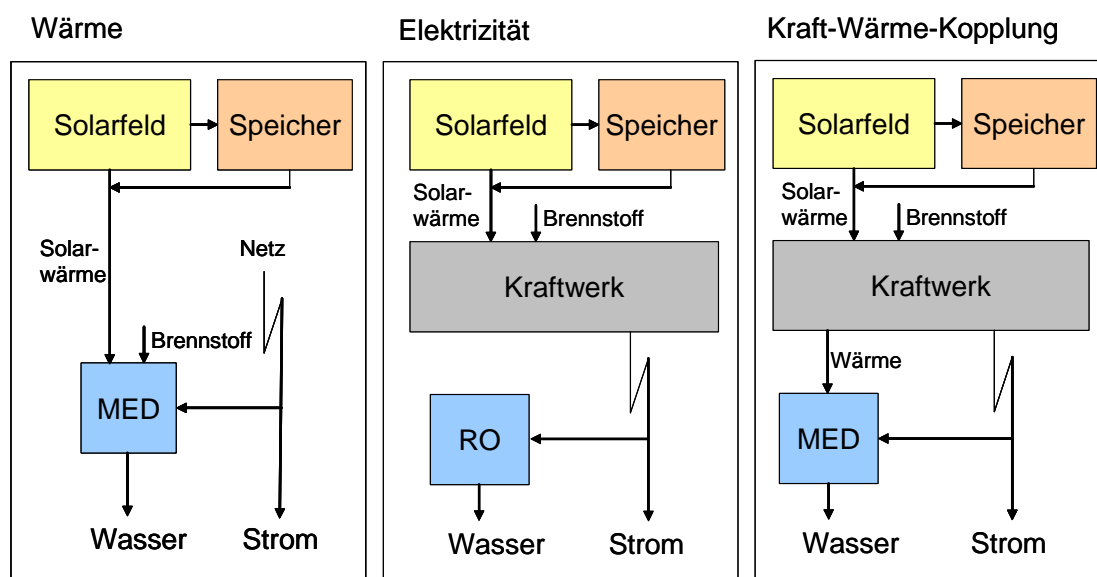
- innerhalb von zwei Jahrzehnten können solarthermische Kraftwerke zur billigsten Energiequelle in der Region werden, mit Stromkosten unter 4 c/kWh und Wasserkosten unter 0.4 €/kWh,
- Wassermanagement, effizientere Bewässerung sowie effizientere Nutzung und Verteilung von Trinkwasser, Wasseraufbereitung und verbesserte Abrechnungsstrukturen sind wichtige Bausteine einer nachhaltigen Wasserversorgung, die zusammen langfristig etwa 50 % der Wasserdefizite der Region vermeiden können,
- durch die Kombination von Effizienzmaßnahmen und solarthermischen Kraftwerken mit Meerwasserentsalzung kann – und muss – die derzeitige Übernutzung der Grundwasserreserven bis zum Jahr 2030 beendet werden,
- fortschrittliche Meerwasserentsalzungsanlagen mit solarer Energieversorgung und vorgeschalteter Seeboden- und Nanofiltration werden den größten Teil der Umweltwirkungen heutiger, konventioneller Entsalzungsanlagen vermeiden,
- die Länder des Mittleren Ostens und Nordafrikas sollten mit europäischer Hilfe unverzüglich die politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen schaffen, die für eine schnelle Markteinführung solarthermischer Kraftwerke für die Meerwasserentsalzung notwendig sind.

Die AQUA-CSP Studie zeigt eine nachhaltige Lösung für das drängende Problem der Wasserversorgung im Mittleren Osten und Nordafrika, und beschreibt einen Weg zu einer ausgewogenen, sicheren und kostengünstigen Versorgungsstruktur für die kommenden Generationen, der bisher von allen zeitgenössischen Studien zu diesem Thema übersehen wurde.

**Kapitel 1 (Technologieübersicht)** gibt einen kurzen Überblick über die derzeitigen Wasserentsalzungs- und solarthermischen Kraftwerkstechnologien (engl. Concentrating Solar Power CSP) und beschreibt die Möglichkeiten zur Kombination beider Technologien.

Es wurden die drei in (Abbildung 1) gezeigten Hauptrichtungen identifiziert: kleine dezentrale Entsalzungsanlagen auf der Basis einer direkten thermischen Multi-Effekt-Destillation (MED) mit Hilfe konzentrierender Kollektoren, solarthermische Stromerzeugung für die Membranentsalzung durch Umkehrosiose (CSP/RO) und die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung für die solarthermische Multi-Effekt-Destillation in großen Anlagen (CSP/MED). Multi-Stage-Flash (MSF) Meerwasserentsalzung liefert zwar derzeit noch die größten Anteile entsalzten Wassers in der MENA-Region, wurde aber wegen ihres vergleichsweise hohen Energiebedarfs nicht als potenzielle Zukunftstechnologie gewertet.

Für einen Vergleich wurden zwei Referenzsysteme des Typs CSP/MED und CSP/RO mit jeweils 21 MW elektrischer Nettoleistung und 24.000 Kubikmetern pro Tag Entsalzungsleistung definiert. Eine stündliche Zeitschrittsimulation beider Anlagentypen für ein Referenzjahr an sieben verschiedenen Standorten von der Atlantischen Küste Marokkos bis hin zum Persischen Golf wurde durchgeführt und die Wirtschaftlichkeit beider Anlagentypen unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen verglichen. Beide Systeme können mittelfristig Solaranteile von 95% und Wasserkosten von unter 0.3 €/m<sup>3</sup> erreichen. Heute sind solche Anlagen bereits in Nischenmärkten konkurrenzfähig mit Erdgas- und ölbetriebenen Anlagen, vor allem bei der kombinierten Erzeugung von Strom und Wasser in großen touristischen oder industriellen Verbrauchszentren.



MED: Multi-Effect-Distillation  
 RO: Reverse Osmosis Membrane Desalination

**Abbildung 1: Verschiedene Kombinationen solarthermischer Kraftwerke mit Meerwasserentsalzung. Links: Solarthermisches Kollektorfeld mit thermischem Energiespeicher für die direkte Dampferzeugung in kleineren Multi-Effekt-Entsalzungsanlagen. Mitte: Solarthermisches Kraftwerk zur Stromerzeugung für die Umkehrosmose (CSP/RO). Rechts: Kraft-Wärme-Kopplung zur Strom- und Wärmeversorgung einer Multi-Effekt-Entsalzungsanlage (CSP/MED).**

**Kapitel 2 (Natürliche Trinkwasserressourcen)** quantifiziert die natürlichen erneuerbaren und erschließbaren Trinkwasserressourcen in der MENA Region. Derzeit liegen nur vier der untersuchten Länder oberhalb der Schwelle von 1000 Kubikmetern pro Kopf und Jahr, die allgemein als Grenze zur Wasserarmut gilt (Abbildung 2). Bei einer voraussichtlichen Verdopplung der Bevölkerung MENA's bis 2050 wird klar, dass diese Region vor einer ernsthaften Krise der Wasserversorgung steht, sollte sie nur von den verfügbaren natürlichen Ressourcen abhängen.

Die sogenannten internen erneuerbaren Wasserressourcen werden durch Niederschläge auf nationales Territorium gespeist und bilden die vorhandenen Flüsse, Seen und Grundwasserreser-

voirs. Flüsse oder Grundwasserströme können über die Landesgrenzen Wasser zuführen und gelten als externe Quellen, wie z.B. der Nil in Ägypten. Die erschließbaren Anteile dieser Quellen können durch einen erschwerten Zugang, aus Gründen des Umweltschutzes oder, wie oft im Falle von grenzüberschreitenden Flüssen, durch internationale Vereinbarungen begrenzt sein.

Unter der Sahara liegen relativ große, fossile Grundwasservorkommen die nicht nennenswert durch erneuerbare Quellen gespeist werden. Auch diese können genutzt werden, wenn ein vernünftiger Zeitrahmen von z.B. 500 Jahren angelegt wird, um mehreren Generationen zu dienen. Trotzdem hat die derzeitige Übernutzung dieser fossilen Wasserressourcen dramatische Umweltauswirkungen wie das zum Teil drastische Absinken des Grundwasserspiegels und das Versiegen zahlreicher Oasen. Zusätzliche Maßnahmen wie die Wiederaufbereitung, Effizienzsteigerungen bei der Verteilung, Bewässerung und anderen Nutzung sowie neue Quellen wie die Meerwasserentsalzung sind deshalb unverzichtbar für eine nachhaltige Wasserversorgung.

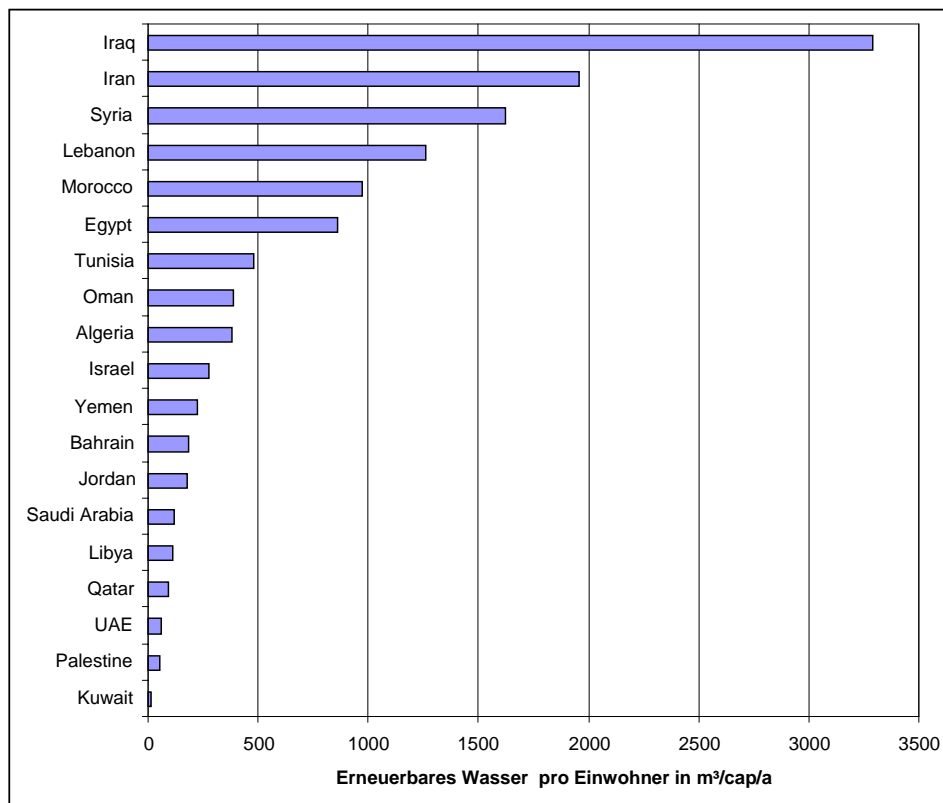


Abbildung 2: Gesamte pro Einwohner verfügbare Trinkwasserressourcen in der MENA Region im Jahr 2000. Nur vier Länder liegen oberhalb der Armutsgrenze von 1000 m³/cap/a.

**Kapitel 3 (Wasserbedarf und -defizite)** stellt ein Langfristszenario für alle MENA Länder vor, und quantifiziert den Wasserbedarf und die zunehmenden Wasserdefizite bis zum Jahr 2050. Der Trinkwasserbedarf wurde als Funktion der wachsenden Bevölkerung und Wirtschaft und unter der Annahme zunehmender Wassersparmaßnahmen errechnet, wobei unterschiedliche

treibende Kräfte für industrielle und kommunale Nutzung auf der einen Seite und landwirtschaftliche Bewässerung auf der anderen Seite berücksichtigt wurden.

Die Landwirtschaft ist heute für 85 % des Wasserverbrauchs in MENA verantwortlich, eine Zahl die bis 2050 durch zunehmende Anteile des industriellen und kommunalen Wasserbedarfs auf 65 % abfallen könnte. In unserem Referenzszenario wächst der Wasserbedarf in den Ländern des Mittleren Ostens und Nordafrikas von 270 Milliarden Kubikmetern pro Jahr bis 2050 auf 460 Mrd. m<sup>3</sup>/a an (Abbildung 3).

Die Wasserdefizite der Region, die heute notdürftig durch Übernutzung der Grundwasserressourcen und zu einem geringeren Anteil durch Meerwasserentsalzung gedeckt werden würden im Referenzfall von heute 50 Mrd. m<sup>3</sup>/a auf 150 Mrd. m<sup>3</sup>/a im Jahr 2050 ansteigen, eine Wassermenge die etwa dem zweifachen Volumen des Nils entspricht. Dabei werden im AQUA-CSP Referenzszenario schon umfangreiche Effizienzsteigerungen in der Wasserversorgung angenommen.

Ein „Business-As-Usual“ Szenario mit geringeren Anstrengungen zur Effizienzsteigerung wurde ebenso untersucht. In diesem Fall würde der Bedarf auf theoretische 570 Mrd. m<sup>3</sup>/a und das Defizit auf 235 Mrd. m<sup>3</sup>/a anwachsen, die mit großer Wahrscheinlichkeit zu einem Kollaps führen würden.

Auf der anderen Seite wurde ein Szenario mit extremen Anstrengungen zur Effizienzsteigerung untersucht, bei dem der Bedarf auf 390 Mrd. m<sup>3</sup>/a in 2050 begrenzt werden konnte. Trotzdem bliebe selbst in diesem Fall noch ein Defizit von 100 Mrd. m<sup>3</sup>/a, das nur durch neue, unkonventionelle Trinkwasserquellen gedeckt werden kann.

Die Ergebnisse unserer Bedarfsanalyse konnten mit verschiedenen internationalen Quellen verglichen werden. Leider deckte keine Analyse alle Länder und alle Wassersektoren ab, und kein Szenario reichte weiter als bis 2030. Die vergleichbaren Datensätze zeigten jedoch recht gute Übereinstimmung mit unseren Annahmen, so dass sich das AQUA-CSP Bedarfsszenario in etwa mit den Erwartungen der MENA-Region bis 2030 deckt.

Unsere Analyse zeigt die große Bedeutung einer wesentlich effizienteren Nutzung der Wasserressourcen in der Region, macht aber auch deutlich dass Sparmaßnahmen allein nicht für eine nachhaltige Versorgung ausreichen werden. Die Situation könnte nach 2020 völlig außer Kontrolle geraten, wenn nicht rechtzeitig zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, um neue, unkonventionelle Quellen wie die Meerwasserentsalzung zu erschließen. Allerdings wird auch diese Maßnahme nur durch die Nutzung der großen Solarenergieressourcen der Region zu einer nachhaltigen Lösung. Vergleicht man die solaren Energieressourcen mit denen anderer Energiequellen in der Region dann wird deutlich, dass der Einsatz solarthermischer Kraftwerke für die Meerwasserentsalzung die einzige sichtbare technische Option ist, die der Größe der Herausforderung wirklich standhalten kann.

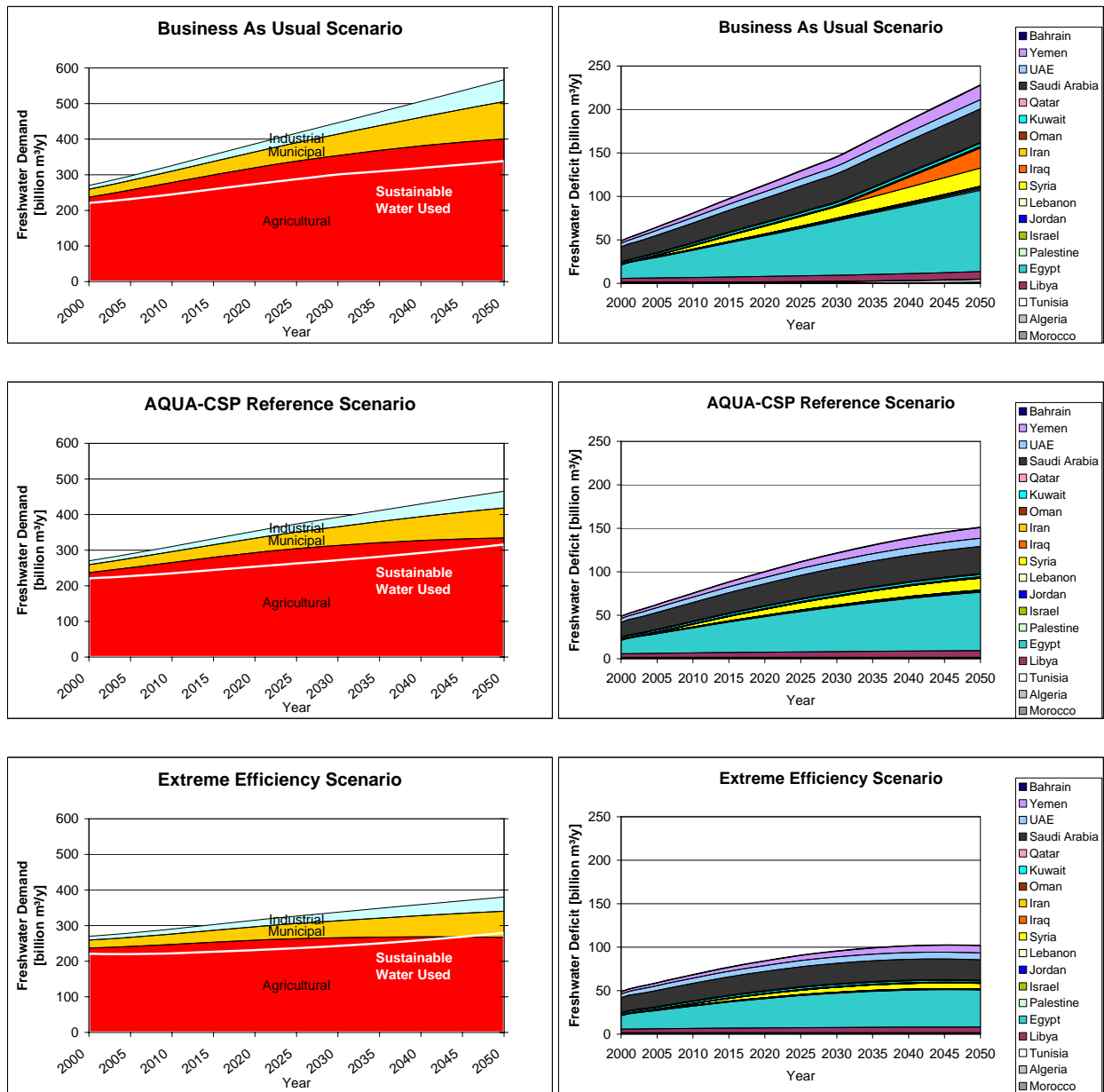
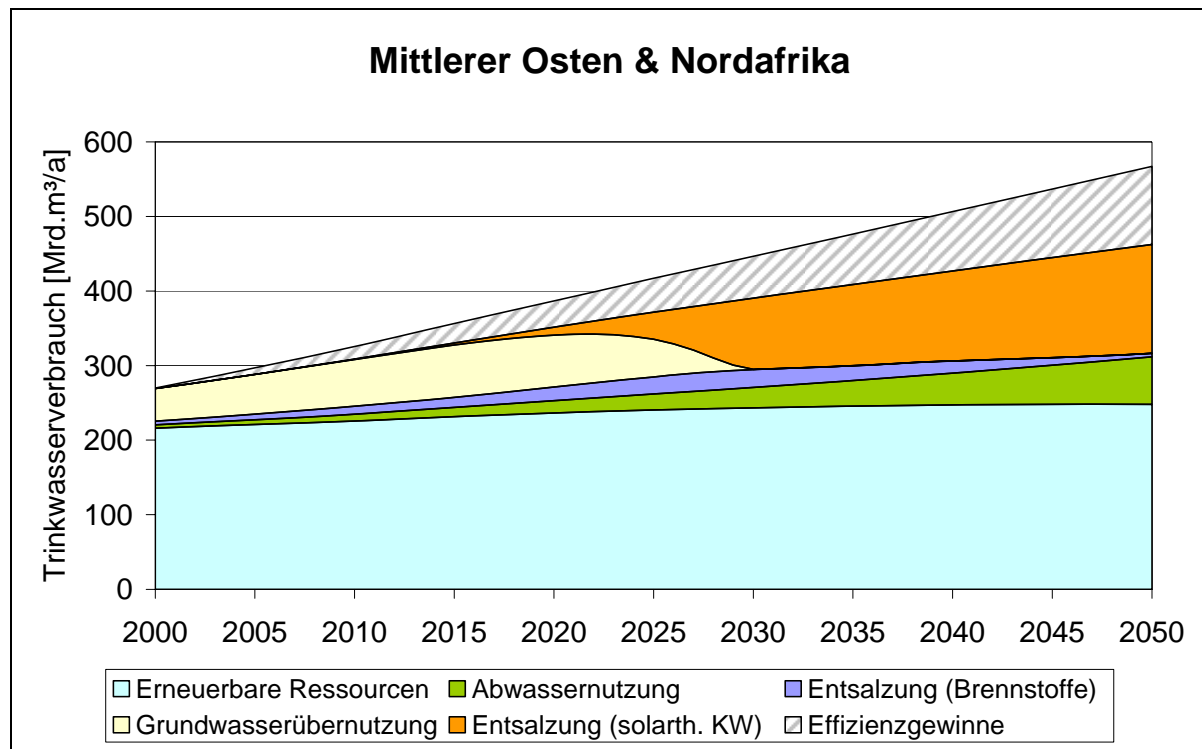


Abbildung 3: Ergebnisse der Modellrechnungen des Wasserbedarfs in MENA für minimale (oben), Referenz (Mitte) and maximale (bottom) Effizienzsteigerungen im Wassersektor (Daten einzelner Länder befinden sich im Anhang des Hauptberichts).

**Kapitel 4 (Märkte für die solare Meerwasserentsalzung)** beschreibt die Marktpotenziale solarthermischer Kraftwerke für die Meerwasserentsalzung im Rahmen eines Szenarios der Wasserversorgung in MENA zwischen dem Jahr 2000 und 2050. Die Analyse berücksichtigt auch andere mögliche Trinkwasserquellen und deren Entwicklung in der Zukunft, wie z.B. die Nutzung natürlichen Oberflächen- und Grundwassers, Abwasseraufbereitung und die Verbesserung der Verteilungs- und Nutzungseffizienz. Das ökonomische Potenzial solarthermischer Kraftwerke zur Meerwasserentsalzung reicht aus um die drohende Wasserkrise in der Region abzuwenden. Auf der anderen Seite wird deutlich, dass der notwendige Ausbau der Meerwasserentsalzung ein langwieriger Prozess ist der erst ab 2025 nennenswerte Anteile der Wasserversor-

gung liefern, dann aber infolge exponentiellen Wachstums schon innerhalb von 10 Jahren die notwendige Kapazität erreichen kann (Abbildung 4 and Tabelle 1). Damit kann die gefährliche Übernutzung des Grundwassers von derzeit 45 Mrd. m<sup>3</sup>/a voraussichtlich nicht vor 2030 beendet werden und wird bis 2020 sogar noch auf 70 Mrd. m<sup>3</sup>/a zunehmen.



**Abbildung 4: Szenario der Wasserversorgung im Mittleren Osten und Nordafrika unter Berücksichtigung nachhaltiger und nicht-nachhaltiger Quellen sowie der Meerwasserentsalzung mit solarthermischen Kraftwerken (schraffierter Bereich: Einsparungen gegenüber dem Business-As-Usual-Szenario).**

In einigen Regionen könnten die Grundwasserreserven erschöpft sein bevor eine nachhaltige Versorgung erreicht wird, so dass voraussichtlich auch die konventionelle Meerwasserentsalzung bis auf den fünffachen Wert gegenüber heute ausgebaut werden muss. Die maximal möglichen Wachstumsraten der solarthermischen Kraftwerksindustrie werden voraussichtlich die begrenzte Größe für die Ausbaugeschwindigkeit solarthermischer Anlagen zur Meerwasserentsalzung sein, da sie heute praktisch bei Null anfängt. Auf der anderen Seite sind die Meerwasserentsalzungsanlagen nur ein kleinerer Anteil des gesamten solarthermischen Kraftwerkmarktes, der im Wesentlichen zur Stromerzeugung ausgebaut werden wird. Damit gibt es gewisse Möglichkeiten, den Ausbau zugunsten der Wasserversorgung zumindest regional zu beschleunigen, falls sehr drastische Krisen entstehen sollten. Trotzdem sollten die Regierungen der Länder des Mittleren Ostens und Nordafrikas unverzüglich geeignete politische und ökonomische Rahmenbedingungen schaffen, um eine rasche Markteinführung dieser Technologie zu ermöglichen, z.B. in Form geeigneter Abnahmeverträge für Strom und Wasser aus solchen Anlagen.

<b>Nordafrika</b>		<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Bevölkerung	Million	141.9	167.3	192.8	214.5	231.9	244.3
Verfügbare Wasserressourcen	Mrd.m³/a	81.8	81.8	81.8	81.8	81.8	81.8
Genutzte Nachhaltige Ressourcen	Mrd.m³/a	72.8	77.5	83.5	90.5	98.7	108.6
Landwirtschaftlicher Bedarf	Mrd.m³/a	80.4	92.1	103.0	111.4	117.6	120.9
Kommunaler Bedarf	Mrd.m³/a	8.6	12.1	16.8	22.6	29.7	38.4
Industrieller Bedarf	Mrd.m³/a	5.4	7.6	10.6	14.3	18.8	24.3
Gesamtbedarf	Mrd.m³/a	94.4	111.9	130.3	148.3	166.1	183.6
pro Kopf Verbrauch	m³/cap/a	666	669	676	691	716	752
Wiederverwendetes Wasser	Mrd.m³/a	3.2	5.6	9.2	14.5	21.7	31.3
Solarthermische Wasserentsalzung	Mrd.m³/a	0.0	0.2	4.7	49.5	60.9	74.9
Minimale solarth. Kraftw. Kapazität	GW	0.0	0.1	2.0	21.2	26.1	32.1
Konventionelle Entsalzung	Mrd.m³/a	0.4	1.3	4.6	9.5	8.1	2.0
Übernutzung des Grundwassers	Mrd.m³/a	21.2	33.2	38.3	0.0	0.0	0.0
Natürliche Ressourcen	Mrd.m³/a	69.6	71.6	73.5	74.9	75.5	75.3

<b>Westliches Asien</b>		<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Bevölkerung	Million	126.0	149.9	177.2	200.6	220.8	236.9
Verfügbare Wasserressourcen	Mrd.m³/a	238.3	238.3	238.3	238.3	238.3	238.3
Genutzte Nachhaltige Ressourcen	Mrd.m³/a	139.3	148.8	160.6	170.3	180.0	190.2
Landwirtschaftlicher Bedarf	Mrd.m³/a	127.7	136.7	147.1	153.1	155.9	155.8
Kommunaler Bedarf	Mrd.m³/a	8.5	10.9	14.4	18.6	23.9	30.5
Industrieller Bedarf	Mrd.m³/a	4.2	5.7	7.8	10.7	14.8	20.2
Gesamtbedarf	Mrd.m³/a	140.4	153.4	169.4	182.4	194.6	206.5
pro Kopf Verbrauch	m³/cap/a	1114	1023	956	909	881	872
Wiederverwendetes Wasser	Mrd.m³/a	0.9	2.5	5.3	9.5	15.9	25.3
Solarthermische Wasserentsalzung	Mrd.m³/a	0.0	0.0	0.8	9.4	13.6	16.5
Minimale solarth. Kraftw. Kapazität	GW	0.0	0.0	0.3	4.0	5.8	7.1
Konventionelle Entsalzung	Mrd.m³/a	0.7	1.8	3.0	3.1	1.4	0.4
Übernutzung des Grundwassers	Mrd.m³/a	0.4	2.8	5.2	0.0	0.0	0.0
Natürliche Ressourcen	Mrd.m³/a	138.5	146.3	155.2	160.8	164.1	164.8

<b>Arabische Halbinsel</b>		<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Bevölkerung	Million	48.5	64.8	82.0	99.4	115.8	131.0
Verfügbare Wasserressourcen	Mrd.m³/a	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
Genutzte Nachhaltige Ressourcen	Mrd.m³/a	8.2	8.8	9.8	11.1	12.8	15.0
Landwirtschaftlicher Bedarf	Mrd.m³/a	29.5	36.7	43.4	49.3	53.9	57.3
Kommunaler Bedarf	Mrd.m³/a	4.1	5.7	7.2	8.8	10.5	12.4
Industrieller Bedarf	Mrd.m³/a	0.6	0.9	1.1	1.3	1.6	1.8
Gesamtbedarf	Mrd.m³/a	34.3	43.3	51.6	59.4	66.0	71.6
pro Kopf Verbrauch	m³/cap/a	707	667	630	597	570	547
Wiederverwendetes Wasser	Mrd.m³/a	0.4	1.0	2.0	3.3	5.0	7.1
Solarthermische Wasserentsalzung	Mrd.m³/a		0.2	5.0	36.6	46.4	54.4
Minimale solarth. Kraftw. Kapazität	GW	0.0	0.1	2.1	15.7	19.8	23.3
Konventionelle Entsalzung	Mrd.m³/a	4.0	7.7	10.7	11.3	6.8	2.3
Übernutzung des Grundwassers	Mrd.m³/a	22.1	26.5	26.1	0.3	0.0	0.0
Natürliche Ressourcen	Mrd.m³/a	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8

<b>Gesamt MENA</b>		<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Bevölkerung	Million	316.4	382.0	452.0	514.5	568.5	612.2
Verfügbare Wasserressourcen	Mrd.m³/a	327.9	327.9	327.9	327.9	327.9	327.9
Genutzte Nachhaltige Ressourcen	Mrd.m³/a	220.2	235.2	253.9	271.9	291.5	313.8
Landwirtschaftlicher Bedarf	Mrd.m³/a	237.6	265.6	293.5	313.8	327.4	334.1
Kommunaler Bedarf	Mrd.m³/a	21.2	28.7	38.4	50.0	64.1	81.2
Industrieller Bedarf	Mrd.m³/a	10.3	14.2	19.5	26.3	35.2	46.4
Gesamtbedarf	Mrd.m³/a	269.1	308.5	351.4	390.1	426.7	461.7
pro Kopf Verbrauch	m³/cap/a	851	808	777	758	751	754
Wiederverwendetes Wasser	Mrd.m³/a	4.4	9.1	16.5	27.3	42.6	63.8
Solarthermische Wasserentsalzung	Mrd.m³/a	0.0	0.5	10.4	95.5	120.9	145.8
Minimale solarth. Kraftw. Kapazität	GW	0.0	0.2	4.5	40.9	51.7	62.4
Konventionelle Entsalzung	Mrd.m³/a	5.2	10.8	18.3	23.9	16.3	4.6
Übernutzung des Grundwassers	Mrd.m³/a	43.7	62.5	69.6	0.3	0.0	0.0
Natürliche Ressourcen	Mrd.m³/a	215.9	225.7	236.6	243.5	247.4	248.0

**Tabelle 1: Zusammengefasst Daten aller MENA Länder im AQUA-CSP Referenzszenario bis 2050. Nordafrika: Marocco, Algerien, Tunesien, Libyen, Ägypten. West Asien: Iran, Irak, Syrien, Jordanien, Libanon, Israel, Palestina. Arabische Halbinsel: Saudi Arabien, Kuwait, Bahrain, Qatar, Vereinigte Arabische Emirate, Oman, Jemen.**

Die mittelfristig größten Märkte für solarthermische Kraftwerke mit Meerwasserentsalzung wurden in Ägypten (3.6 Mrd.m<sup>3</sup>/y), Saudi Arabien (3.4 Mrd.m<sup>3</sup>/y), Libyen (0.75 Mrd.m<sup>3</sup>/y), Syrien (0.54 Mrd.m<sup>3</sup>/y), and Jemen (0.53 Bm<sup>3</sup>/y) identifiziert. Alle Länder der Region zusammen haben ein Marktvolumen von 10.5 Mrd.m<sup>3</sup>/y bis 2020 und 145 Mrd.m<sup>3</sup>/y bis 2050. Eine entschlossene Politik zur Markteinführung wird notwendig sein, um die notwendigen Ausbauraten rechtzeitig vor dem endgültigen Kollaps der schon heute überstrapazierten Grundwasserreserven zu erreichen.

**Kapitel 5 (Socio-Ökonomische Auswirkungen)** untersucht die Auswirkungen einer kontinuierlichen Markteinführung solarthermischer Kraftwerke zur Meerwasserentsalzung, die aufgrund von Skalen- und Lerneffekten mit einem ständigen Rückgang der Erzeugungskosten einher gehen. Konzentrierende Kollektoren ersetzen Brennstoff in konventionellen Kraftwerken zu einem äquivalenten Preis von heute etwa 50 US\$ pro Barrel Rohöl, mit der Perspektive nach 2010 den Preis von 35 US\$/barrel und bis 2020 die Schwelle von 20 US\$/barrel zu unterschreiten. Langfristig sind für den „solaren“ Brennstoff Kosten unter 15 US\$ pro Barrel erreichbar, während Heizöl und auch andere fossile Brennstoffe dieses niedrige Niveau voraussichtlich nie wieder erreichen werden. Wärme aus konzentrierenden solarthermischen Kollektorfeldern für den Kraftwerksbetrieb wird damit in absehbarer Zeit zur wahrscheinlich preisgünstigsten Energiequelle der MENA-Region werden. Damit wird Klimaschutz auch zur ökonomisch günstigsten Option.

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen, dass solarthermische Kraftwerke für die kombinierte Erzeugung von Strom und Wasser mit einer vernünftigen Kapitalverzinsung betrieben werden können, wenn realistische, unsubventionierte Preise zugrunde gelegt werden. Dies muss im besonderen Kontext der heutigen Strom- und Wasserversorger in MENA gesehen werden, die in der Regel keine oder sogar eine negative Verzinsung des eingesetzten Kapitals erreichen und damit beide Produkte stark subventionieren.

Angesichts der steigenden Kosten und der begrenzten Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe ist die allgemein vertretene Einschätzung richtig, dass konventionelle Meerwasserentsalzung keine Lösung der drohenden Wasserkrise in der MENA Region darstellt, wohl aber die solarthermische Meerwasserentsalzung in Kombination mit einer effizienteren Wassernutzung. Eine Wasserversorgung auf der Basis begrenzter fossiler Energieressourcen mit unbekannter Kostenperspektive wäre in der Tat äußerst riskant, während sich eine Versorgung auf der Basis einer unbegrenzten und mit der Zeit preisgünstigeren Technologie als durchaus sinnvoll darstellt. Solarthermische Meerwasserentsalzung kann zudem die Subventionslast der meisten Regierungen in der MENA Region vermindern und damit öffentliche Gelder für die dringend notwendigen Innovationen und Effizienzsteigerungen freisetzen.



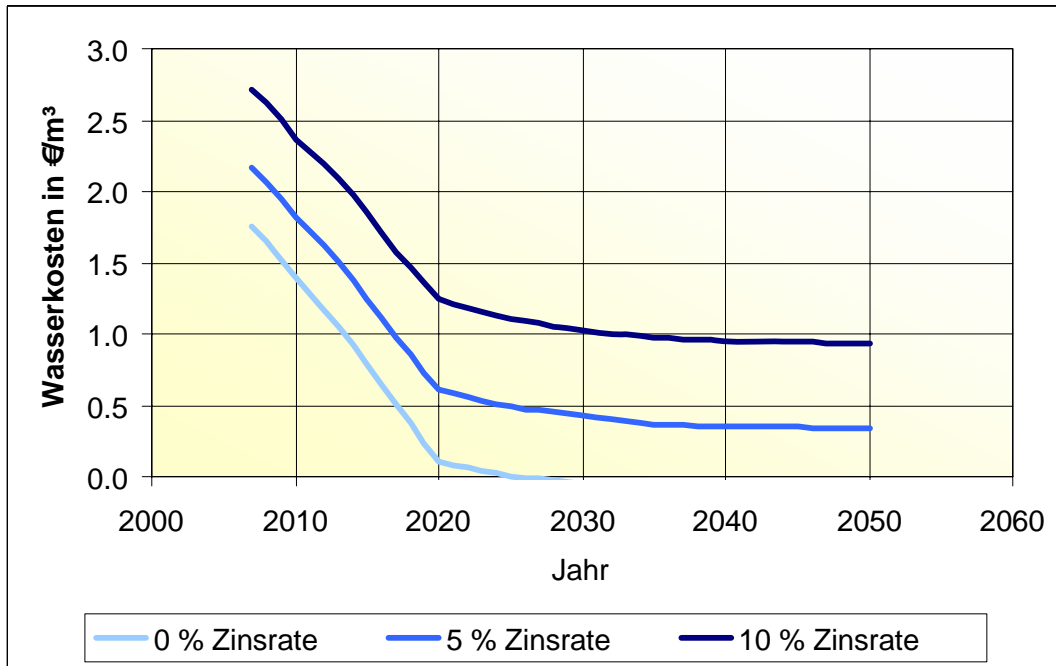


Abbildung 5: Wasserkosten für solarthermische Kraftwerke mit Multi-Effekt-Entsalzung (CSP/MED) für verschiedene Verzinsungen des Einsatzkapitals und für einen festen Stromerlös von 0.05 €/kWh. Langfristig können im Referenzfall mit 5 % Realverzinsung Wasserkosten von 0.34 €/m³ erreicht werden. Höhere Stromerlöse würden den Wasserpreis senken und umgekehrt. Angenommener Wechselkurs US\$/€= 1.

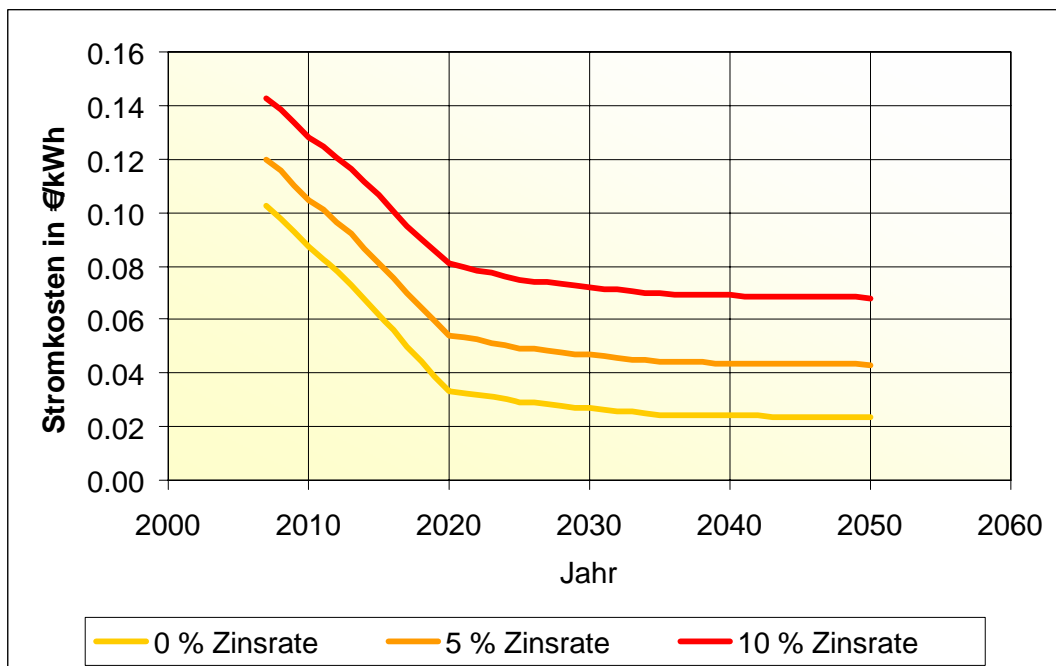


Abbildung 6: Stromkosten für solarthermische Kraftwerke mit Multi-Effekt-Entsalzung (CSP/MED) für verschiedene Verzinsungen des Einsatzkapitals und für einen festen Wassererlös von 0.5 €/m³. Langfristig können im Referenzfall mit 5 % Realverzinsung Stromkosten von 0.04 €/kWh erreicht werden. Höhere Wassererlöse würden den Strompreis senken und umgekehrt. Angenommener Wechselkurs US\$/€= 1.

Auf der anderen Seite konnte in der Studie gezeigt werden, dass der derzeit durchgeführte Raubbau an Grundwasserreserven nicht nur eine ökologische, sondern auch eine ökonomische Belastung in mehrstelliger Milliardenhöhe darstellt.

Das in der AQUA-CSP Studie entwickelte Konzept einer nachhaltigen Wasserversorgung der MENA Region auf der Basis erneuerbarer Energie und Effizienz ist nicht nur wesentlich sicherer und umweltkompatibler, sondern mittelfristig auch deutlich preisgünstiger als eine Business-As-Usual Strategie, die zu einer unerträglichen Situation für die gesamte Region führen würde.

Vernünftige Investitionen und geeignete ökonomische Rahmenbedingungen sind eine Voraussetzung für die effiziente Markteinführung solarthermischer Kraftwerke zur Strom- und Wasserversorgung in der MENA Region. Eine Bevölkerung, die sich bis zum Jahr 2050 in etwa verdoppeln wird, wird nicht nur mehr Energie und Wasser, sondern auch neue Lebensräume benötigen, die im Wüstengürtel der Erde in der Regel nicht leicht zu erschließen sind. Solarthermische Kraftwerke mit Meerwasserentsalzung eröffnen die Perspektive, landwirtschaftliche und kommunale Flächen in der Wüste zu erschließen, wobei die Wüste selbst die dazu notwendigen energetischen Ressourcen liefert. Anstatt zunehmend um immer knappere Energie-, Wasser- und Landressourcen zu kämpfen, haben die Gesellschaften der MENA Region damit die konkrete Chance einer kooperativen Erschließung ihrer erneuerbaren Reserven für eine nachhaltige Zukunft.

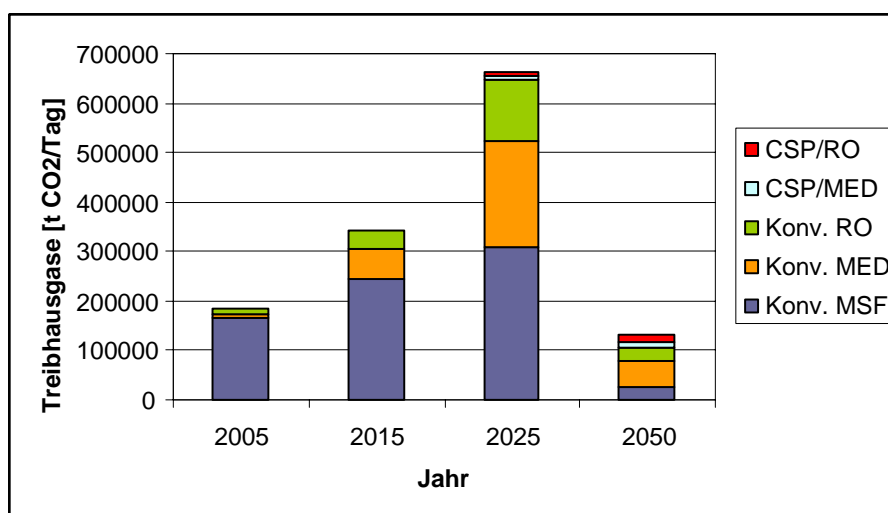
**Kapitel 6 (Auswirkungen auf die Umwelt)** untersucht die Umweltwirkungen solarthermischer Kraftwerke mit Meerwasserentsalzung. Die wichtigsten Auswirkungen von Wasserentsalzungsanlagen sind folgende:

- Die Entnahme von Meerwasser kann Lebewesen mitreißen und durch Aufprall schädigen,
- Luftemissionen von Schadstoffen und Treibhausgasen entstehen vor allem bei der Erzeugung der für die Entsalzung benötigten Energiemengen in Form von Wärme oder Strom,
- chemische Zusätze werden zum Schutz der Entsalzungsanlagen vor Verkrustungen, biologischem Befall, Schaumbildung usw. zugeführt und mit dem Abwasser abgegeben,
- die heiße und hochkonzentrierte Salzlösung im Abwasser kann zur Schädigung verschiedener Spezies führen.

Die Emissionen der Wasserentsalzung wurden auf der Basis einer Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus der untersuchten CSP/RO und CSP/MED Systeme ermittelt, von der Konstruktion über den Betrieb bis zur Entsorgung der Anlagen, und mit konventionellen Systemen verglichen. Der größte Teil der Emissionen konventioneller Entsalzungsanlagen stammt aus der Energieerzeugung und kann durch Nutzung solarthermischer Kraftwerke zu 99 % vermieden werden. Die

Auswirkungen chemischer Zusätze der Entsalzung und des konzentrierten Abwassers auf die marine Umwelt können durch sorgfältige Umweltanalysen gelindert werden, indem besonders sensible Bereiche ausgeschlossen werden und auf eine gute Vermischung geachtet wird. Horizontale, poröse Einlassrohre unter dem Meeresboden können sowohl Schäden bei der Entnahme vermeiden als auch das Wasser vorreinigen – der Meeresboden wird dabei als vorgeschalteter Filter genutzt – sowie eine bessere Verteilung der Abwasser gewährleisten. Zusätzlich kann eine Nanofiltration vorgeschaltet werden, die die meisten Substanzen entfernt, die für die Notwendigkeit chemischer Zusätze verantwortlich sind und auf diese Weise entfallen. Dies erfordert einen erhöhten Energieeinsatz, der durch Solarstrom umweltfreundlich und kostengünstig zur Verfügung gestellt werden kann. Erst die Substitution konventioneller Energieträger und chemischer Zusätze durch Sonnenenergie erlaubt den starken Ausbau der Meerwasserentsalzung entsprechend unserem Szenario, der sonst nicht umweltkompatibel zu bewerkstelligen wäre.

Zukünftige CSP/RO und CSP/MED Entsalzungsanlagen werden extrem niedrige Emissionen im Vergleich zu heutigen Anlagen aufweisen. Die Investitionen für die Entsalzungsanlagen werden zwar aufgrund der beschriebenen Umweltschutzmaßnahmen etwa 20 % über denen konventioneller Anlagen liegen, aber der verwendete „solare“ Brennstoff wird dafür viel preisgünstiger sein als fossile Brennstoffe. Extrem saubere Entsalzungsanlagen werden zukünftig angesichts der großen Mengen zu entsalzenden Wassers unverzichtbar sein. Trotzdem werden die negativen Umweltwirkungen konventioneller Entsalzungsanlagen bis 2025 zunehmen, sofern keine rechtlichen Beschränkungen eingeführt werden, womit angesichts der prekären Lage in MENA nicht zu rechnen ist. Erst nach 2025 wird der Anteil sauberer Entsalzungsanlagen groß genug werden, um die Emissionen auf ein verträgliches Maß zurückzufahren (Abbildung 7).



**Abbildung 7: Lebenszyklusanalyse der Treibhausgasemissionen aus der Meerwasserentsalzung im AQUA-CSP Referenzszenario für die gesamte MENA Region. Ein ähnlicher Verlauf ergibt sich auch für andere Emissionen. CSP = Concentrating Solar Power (solarthermisches Kraftwerk), RO = Reverse Osmosis (Umkehrosmose), MED = Multi-Effekt-Destillation, Konv. = konventionell, MSF = Multi-Stage-Flash Entsalzung**

## **Schlussfolgerungen**

Im Gegensatz zu den Schlussfolgerungen und Empfehlungen der meisten aktuellen Analysen des Wassersektors in der Region Mittlerer Osten und Nordafrika kommt die AQUA-CSP Studie zu dem Ergebnis, dass Meerwasserentsalzung einen signifikanten Beitrag zu einer nachhaltigen Wasserversorgung leisten kann. Dies setzt allerdings den Einsatz einer sehr kostengünstigen, erneuerbaren Energiequelle voraus, die in Form von Sonnenenergie in den ariden Gebieten des Mittleren Ostens und Nordafrikas naturgemäß im Übermaß vorhanden ist.

Solarthermische Kraftwerke für die Meerwasserentsalzung haben eindeutig das Potenzial, große Anteile der Wasserversorgung zu liefern und die drohende Verknappung der Wasserreserven abzuwenden, und das zu relativ geringen Kosten, weitgehend emissionsfrei und auf der Basis einer heimischen, sicheren Energiequelle.

Die großangelegte Verbreitung von Meerwasserentsalzungsanlagen in der Region setzt weitgehend emissionsfreien Betrieb voraus. Damit müssen nicht nur die Emissionen der Energieversorgung, sondern auch die direkten Emissionen in Form chemischer Zusätze vermieden werden. Der Ersatz dieser Stoffe ist durch eine vorgeschaltete Filtration des Meerwassers möglich, und die dafür notwendige Energie steht in Form von Sonnenenergie reichlich und kostengünstig zur Verfügung. Zudem stellen solarthermische Kraftwerke in der MENA Region die einzige denkbare Energiequelle dar, die in einem Zeitfenster von 15-25 Jahren auf die Größenordnung skalierbar ist, die zur Vermeidung einer ernsten Versorgungskrise notwendig ist, und die gleichzeitig auf einer nachhaltigen Ressource basiert.

Die Markteinführung solarthermischer Kraftwerke zur Meerwasserentsalzung muss unverzüglich zusammen mit Maßnahmen zur effizienteren Nutzung von Trinkwasser umgesetzt werden. Geeignete politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen müssen geschaffen werden, um eine schnelle und effektive Implementierung von Pilotanlagen und einen schnellen Ausbau der verfügbaren Entsalzungskapazität zu erreichen. Parallel dazu müssen saubere Entsalzungsanlagen entwickelt und demonstriert werden, um größere Entsalzungskapazitäten umweltkompatibel verwirklichen zu können. Jede Verzögerung kann katastrophale Konsequenzen für die wirtschaftliche Entwicklung und für den sozialen Frieden in der MENA Region zur Folge haben.