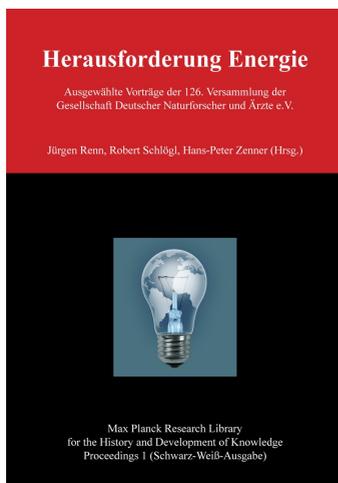


Max Planck Research Library for the History and Development of Knowledge

Proceedings 1

Franz Trieb and Hans Müller-Steinhagen:

Strom aus der Wüste: Grundlagen des DESERTEC Konzepts



In: Jürgen Renn, Robert Schlägl and Hans-Peter Zenner (Hrsg): *Herausforderung Energie : Ausgewählte Vorträge der 126. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte e.V.*

Online version at <http://edition-open-access.de/proceedings/1/>

ISBN 978-3-8442-4282-9

First published 2011 by Edition Open Access, Max Planck Institute for the History of Science under Creative Commons by-nc-sa 3.0 Germany Licence.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>

Printed and distributed by:

Neopubli GmbH, Berlin

<http://www.epubli.de/shop/buch/7803>

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>

Kapitel 7

Stromimport aus der Sahara: Grundlagen des DESERTEC Konzepts

Franz Trieb und Hans Müller-Steinhagen

7.1 Kurzfassung

Das vorliegende Paper zeigt die Perspektive einer nachhaltigen Bereitstellung von Strom und Trinkwasser für Europa (EU), den Mittleren Osten (ME) und Nordafrika (NA) und die entsprechende Wandlung des Versorgungssektors bis zum Jahr 2050. Es wird gezeigt, dass mit erneuerbaren Energiequellen und Effizienzgewinnen sowie der Nutzung fossiler Brennstoffe zum Ausgleich von Angebots- und Bedarfsengpässen ein Wechsel zu einer konkurrenzfähigen, sicheren und umweltkompatiblen Energieversorgung möglich ist.

Da mindestens zwei Jahrzehnte benötigt werden, bis die notwendigen Maßnahmen volkswirtschaftlich wirksam werden, sind unmittelbar politische Entscheidungen zur Schaffung geeigneter wirtschaftlicher Rahmenbedingungen notwendig, die hier skizziert werden.

Eine Schlüsselrolle für das wirtschaftliche und physische Überleben der gesamten Region kommt der engen Kooperation zwischen der EU und den Staaten des Mittleren Ostens und Nordafrikas (MENA) bei der Markteinführung erneuerbarer Energie und einem Verbund durch Hochspannungsgleichstrom-Übertragung (HGÜ) zu.

7.2 Einleitung

Um den Übergang zu einer Energieversorgung realisieren zu können, die kostengünstig und umweltverträglich ist und auf gesicherten Ressourcen beruht, müssen die in Tabelle 1 genannten Kriterien angelegt werden, damit das langfristige Ergebnis einer umfassenden Definition von Nachhaltigkeit entspricht.

Ein zentrales Kriterium für die Elektrizitätserzeugung ist ihre stets bedarfsgerechte Verfügbarkeit. Heute wird dies durch den Verbrauch fos-

siler oder nuklearer Energiequellen in perfekt gespeicherter Form erreicht, aus denen jederzeit Nutzenergie bereitgestellt werden kann, egal wann und wo sie benötigt wird. Dies stellt die einfachste Art der bedarfsorientierten Energieversorgung dar. Allerdings zahlen wir für den Verbrauch der gespeicherten Energiereserven unseres Planeten einen hohen Preis: Sie werden in absehbarer Zeit erschöpft sein und ihre Abfallprodukte verschmutzen die Atmosphäre.

Tabelle 7.1: Angelegte Nachhaltigkeitskriterien für die Stromerzeugung

<i>Sicher</i>	verschiedene, sich ergänzende Quellen und Reserven elektrische Leistung nach Bedarf langfristig verfügbare Ressourcen sichtbare und zeitnah ausbaubare Technologie
<i>Kostengünstig</i>	niedrige Kosten keine langfristigen Subventionen
<i>Kompatibel</i>	geringe Emissionen Klimaschutz geringe Risiken fairer Zugang

Mit Ausnahme der Wasserkraft ist die Nutzung der existierenden natürlichen Energieflüsse für die Stromerzeugung bislang nicht weit verbreitet, weil sie sich verglichen mit fossilen und nuklearen Brennstoffen weniger leicht ausbeuten und speichern lassen.

Manche dieser Stromquellen können mit einem verträglichen Maß an technischem Aufwand über eine begrenzte Zeit gespeichert werden, andere müssen in Abhängigkeit ihrer Bereitstellung durch die Natur unmittelbar dann genutzt werden, wenn sie verfügbar sind (Tabelle 7.1, Tabelle 7.2). Die Stromversorgung der Zukunft muss eine ausgewogene Mischung aus Technologien und Ressourcen finden, die in der Lage ist, neben der Verfügbarkeit nach Bedarf auch sämtliche anderen Nachhaltigkeitskriterien zu erfüllen.

Tabelle 7.2: Portfolio von Technologien und Ressourcen für die Stromerzeugung

<i>ideal gespeicherte Energieträger</i>	Kohle, Braunkohle Erdöl, Erdgas Kernpaltung, Kernfusion
<i>speicherbare Energieträger</i>	Wasserkraft Biomasse Solarthermische Kraftwerke Geothermie (Hot Dry Rock)
<i>fluktuierende Energieträger</i>	Windenergie Photovoltaik Wellen, Gezeiten

Der vorliegende Bericht beschreibt das Ergebnis umfassender Studien am Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und entwirft ein Szenario zur Deckung des Strombedarfs und zur Stromversorgung in einer integrierten EU-MENA-Region bis zur Mitte des Jahrhunderts und unterstreicht die Bedeutung internationaler Zusammenarbeit mit dem Ziel wirtschaftlicher und umweltverträglicher Nachhaltigkeit (MED-CSP 2005, TRANS-CSP 2006)[1, 2].

7.3 Strom- und Wasserbedarf nehmen zu

Die Hauptursache des zunehmenden Strom- und Wasserverbrauchs in der Region ist das Bevölkerungswachstum. Schätzungen der Vereinten Nationen zufolge wird die Bevölkerung in der Region Europa mit ca. 600 Mio. Einwohnern in etwa konstant bleiben, während die Region MENA von 300 Mio. im Jahr 2000 auf ebenfalls 600 Mio. bis zur Jahrhundertmitte anwachsen wird [3].

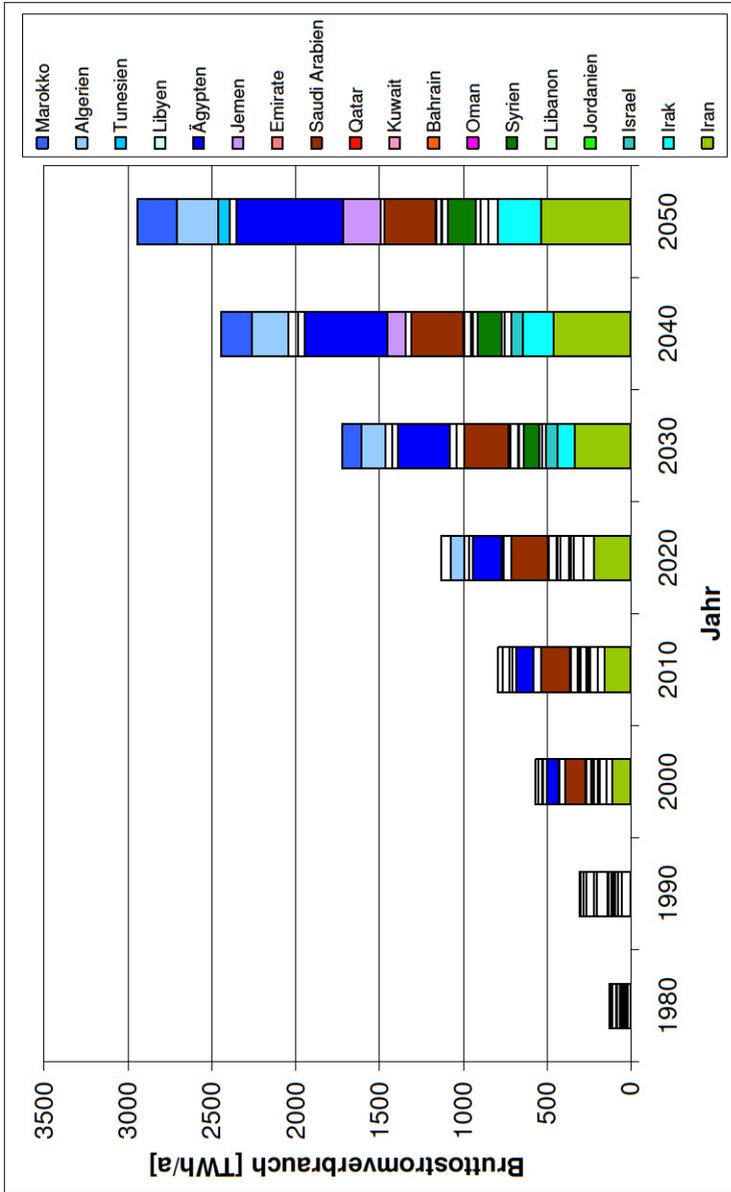


Abbildung 7.1: Szenario des Strombedarfs für die in der vorliegenden Studie untersuchten MENA-Länder [1]

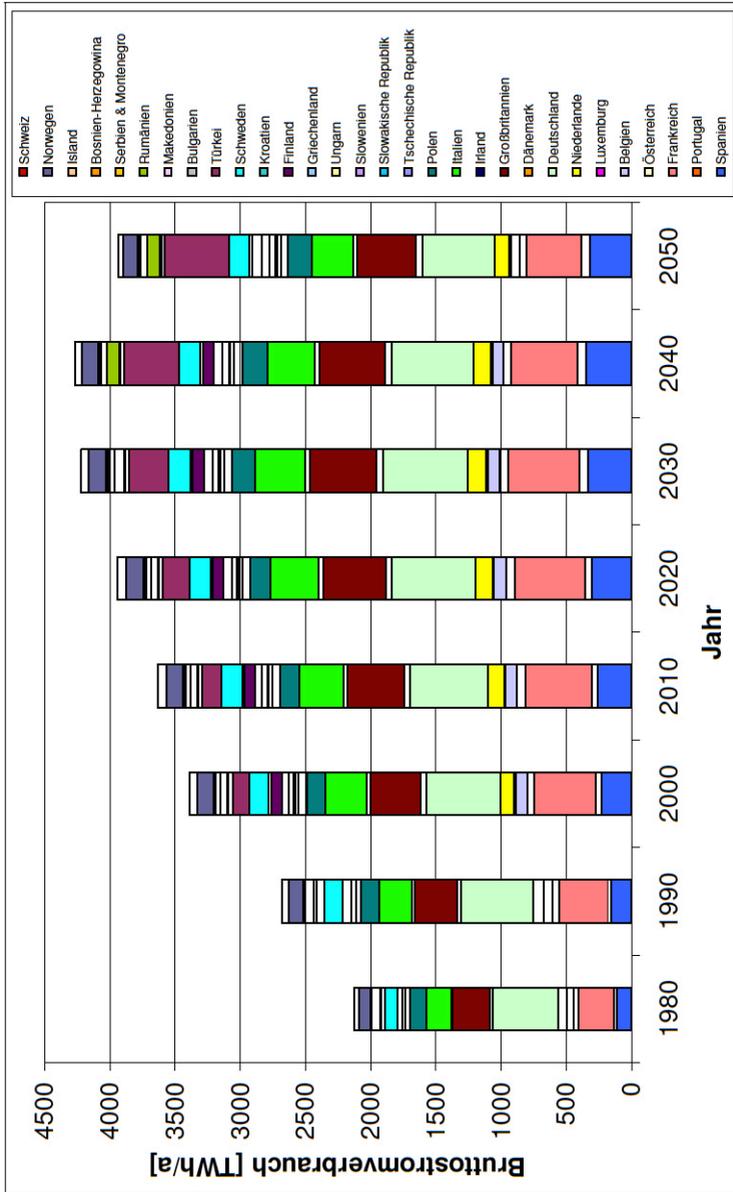


Abbildung 7.2: Szenario des Strombedarfs für die in der vorliegenden Studie untersuchten Länder Europas [2]

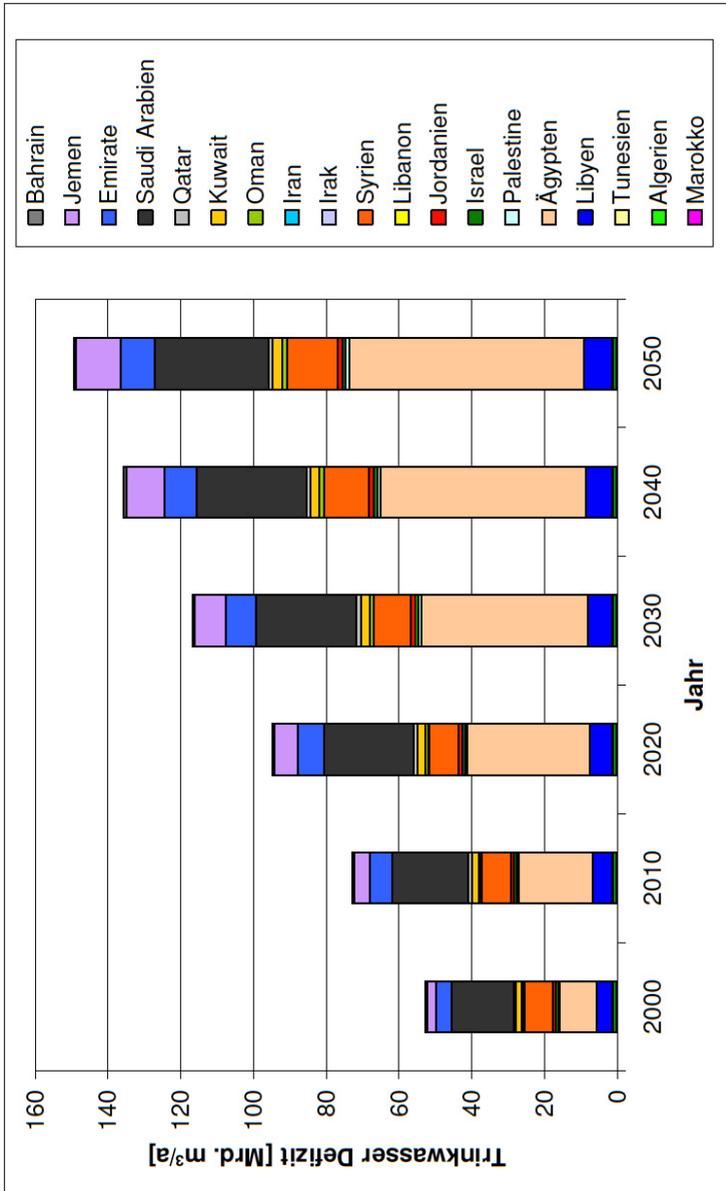


Abbildung 7.3: Trinkwasserdefizit, definiert als die Differenz zwischen Wasserbedarf und erneuerbaren Trinkwasserreserven für jedes der MENA-Länder [4].

Ein weiterer Wachstumsfaktor ist die Wirtschaft, die mit zwei gegensätzlichen Effekten auf den Strom- und Wasserbedarf einwirkt: einerseits steigt der Bedarf, weil neue Dienstleistungen in einer sich entwickelnden Wirtschaft entstehen. Andererseits nimmt die Effizienz von Produktion, Verteilung und Endverbrauch zu, was die Bereitstellung von mehr Dienstleistungen bei konstanter oder sogar reduzierter Energiemenge ermöglicht. In den vergangenen Jahrzehnten ließ sich bei fast allen Industrienationen eine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch beobachten. Maßnahmen zur Effizienzsteigerung müssen zunächst einmal finanziert werden können, deshalb muss bereits ein gewisses wirtschaftliches Niveau jenseits des bloßen Existenzbedarfs erreicht sein. Dieses trifft inzwischen auf die meisten EU-MENA-Länder zu. Für die zugrunde liegende Bedarfsuntersuchung siehe [5].

Die Analyse zeigt, dass bis zum Jahr 2050 der Stromverbrauch im Mittleren Osten und in Nordafrika wahrscheinlich auf ca. 3000 TWh/a (Abbildung 7.1) ansteigen, also mit dem derzeitigen Konsum in Europa vergleichbar sein wird. Aufgrund der angenommenen steigenden Effizienzgewinne ergibt das Modell niedrigere Werte hinsichtlich des vorhergesagten Bedarfs als die Mehrzahl existierender Szenarien [6, 7, 8, 9]. Andererseits gibt es auch Szenarien, die von einem noch niedrigeren Bedarf ausgehen [10, 11]. Die daraus resultierende Reduktion des Bedarfs in Europa nach 2040 (wie Abbildung 7.2 zeigt) ist allerdings nur schwer vorhersehbar. Ebenso ist eine Stagnation oder ein leicht anwachsender Verbrauch möglich, da Effizienzgewinne in der Regel für neue energieintensive Dienstleistungen aufgebraucht werden (beispielsweise Elektromobilität oder Wasserstoffantriebe für den Transportsektor). Solche denkbaren Paradigmenwechsel finden hier keine Berücksichtigung.

In der Studie AQUA-CSP wurde eine ähnliche Analyse für den Wassersektor in MENA-Ländern durchgeführt [12]. Die Differenz zwischen verfügbaren, erneuerbaren Trinkwasserressourcen und dem wachsenden Wasserbedarf führt, wie in Abbildung 7.3 dargestellt, zu einem erheblichen Defizit, dem nur unzureichend durch Meerwasserentsalzung mithilfe fossiler Brennstoffe und hauptsächlich mit einer Überausbeutung der Grundwasserressourcen begegnet wird. In vielen Ländern der MENA-Region führt dies bereits zu einem spürbaren Absinken des Grundwasserspiegels, zum Eindringen von Salzwasser in die Grundwasserreservoirs und zu einer schnellen Ausdehnung der Wüsten.

Dem Szenario zufolge tendiert dieses Defizit dazu, von den gegenwärtigen 60 Milliarden m^3 pro Jahr, die beinahe dem jährlichen Fluss des Nils beim Eintritt in Ägypten entsprechen, auf 150 Milliarden m^3 im Jahr 2050

anzusteigen. Ägypten, Saudi Arabien, Jemen und Syrien sind die Länder mit den größten Defiziten. Dabei sieht das Szenario bereits eine Verbesserung der Effizienz der Wasserverteilung, Aufbereitung und Wiederverwendung sowie ein verbessertes Wassermanagement, um hohe Qualitätsstandards zu erreichen, vor. Es ist offensichtlich, dass die MENA-Länder in nicht allzu ferner Zukunft vor einem sehr ernstem Problem stehen werden, wenn nicht rechtzeitig Gegenmaßnahmen getroffen werden. Meerwasserentsalzung kann eine zusätzliche Option darstellen, aber nur, wenn die dafür notwendige Energie nachhaltig bereit gestellt werden kann. Angenommen, dass durchschnittlich 3.5 kWh Strom für die Entsalzung von einem Kubikmeter Meerwasser benötigt werden, würde dies einen zusätzlichen Bedarf an fast 550 TWh/Jahr bis 2050 für die Entsalzung bedeuten. Dies entspricht dem aktuellen Strombedarf eines Landes wie Deutschland [12].

7.4 Verfügbare technische Optionen

In der Finanz- und Versicherungsbranche gibt es eine klare Antwort auf die Frage des Risiko-Managements: die Diversifizierung des Anlagenbestands [13]. Diese simple Wahrheit ist im Energiesektor bisher völlig ignoriert worden. Hier wurden Investitionsentscheidungen vorrangig nach den Kriterien „geringste Kosten“ und „bewährte Technologie“ getroffen und das Portfolio war üblicherweise auf fossile Brennstoffe, Wasser- und Kernkraft beschränkt. Diese kurzsichtige Politik ist sowohl für die Konsumenten als auch für die Umwelt schädlich: die Preise aller Arten fossiler Brennstoffe einschliesslich Uran haben sich seit dem Jahr 2000 um ein Vielfaches erhöht und das Verbrennen dieser Stoffe verschmutzt die globale Atmosphäre in einem nicht mehr akzeptablen Maße.

Stromverbraucher und Steuerzahler haben in den meisten Ländern in EU-MENA keine andere Wahl, als die ständig steigenden Kosten fossiler Brennstoffe zu bezahlen, denn durch die Energiepolitik der Vergangenheit wurde versäumt, Alternativen aufzubauen und diese als Teil des Energiemarktes zu etablieren.

Das Ganze wird nicht besser durch die Tatsache, dass fossile und nukleare Energietechnologien auch heute noch etwa 75 % der öffentlichen Zuschüsse im Energiesektor [14] erhalten, eine Zahl, die auf über 90 % ansteigen würde, rechnete man externe Kosten - die in der Regel den Steuerzahler, aber nicht den Stromverbraucher belasten - ebenfalls als versteckte Subvention dazu.

Dabei steht schon heute eine eindrucksvolle Auswahl an erneuerbaren Energietechnologien zur Verfügung [15]. Einige davon erzeugen schwankende Energieflüsse, wie beispielsweise Windkraft- und Photovoltaikanlagen (PV), andere dagegen wie Biomasse, Wasserkraft und konzentrierende solarthermische Kraftwerke (CSP) können sowohl elektrische Spitzen- als auch Grundlast nach Bedarf bereitstellen (Tabelle 7.3).

Das langfristige wirtschaftliche Potenzial erneuerbarer Energiequellen in EU-MENA ist viel größer als der Bedarf, und besonders das Potenzial der Sonnenenergie stellt alle anderen Quellen buchstäblich in den Schatten. Bis zu 250 GWh Strom können von jedem Quadratkilometer (km^2) Wüste mittels solarthermischer Kraftwerke jährlich gewonnen werden. Dies ist 250 Mal mehr als aus Energiepflanzen oder 5 Mal mehr als aus den besten vorhandenen Wind- oder Wasserkraftproduktionsstätten gewonnen werden kann. Jeder Quadratkilometer Land in MENA erhält eine Menge Solarenergie, die 1.5 Millionen Fässern Erdöl entspricht.¹ Ein Feld mit konzentrierenden Solarkollektoren von der Größe des Nasser-Sees in Ägypten (Assuan Damm) wäre in der Lage, eine Energiemenge zu ernten, die der gesamten derzeitigen Erdölproduktion des Mittleren Ostens entspricht.²

Außer der Sonne gibt es auch noch andere erneuerbare Energiequellen in EU-MENA: es existiert ein Potenzial von 2000 TWh aus Windenergie und weitere 4000 TWh/Jahr aus geothermalen Quellen, Wasserkraft und Biomasse, deren Nutzung landwirtschaftliche und kommunale Abfälle mit einschließt. Auch Photovoltaik, Wellen- und Gezeitenkraft kommt ein beachtliches Potenzial in der Region zu. Im Gegensatz zu fossilen und nuklearen Brennstoffen sind erneuerbare Energiequellen in der Region im Überfluss vorhanden. Allerdings weist jede dieser erneuerbaren Energiequellen eine spezifische geografische Verteilung auf (Abbildung 7.4). Jedes Land wird deshalb seine individuelle Mischung von Ressourcen anstreben, wobei Wasserkraft, Biomasse und Windenergie die bevorzugten Quellen im Norden und Sonnen- und Windenergie die stärksten Quellen im Süden der EU-MENA-Region sind.

¹Sonneneinstrahlung $2400 \text{ kWh/m}^2/\text{Jahr}$, 1600 kWh Wärmewert pro Barrel (Fass).

²Die Oberfläche des Nasser-Sees beträgt 6000 km^2 . Die Erdölproduktion des Mittleren Ostens liegt derzeit bei 9×10^9 Barrel/Jahr.

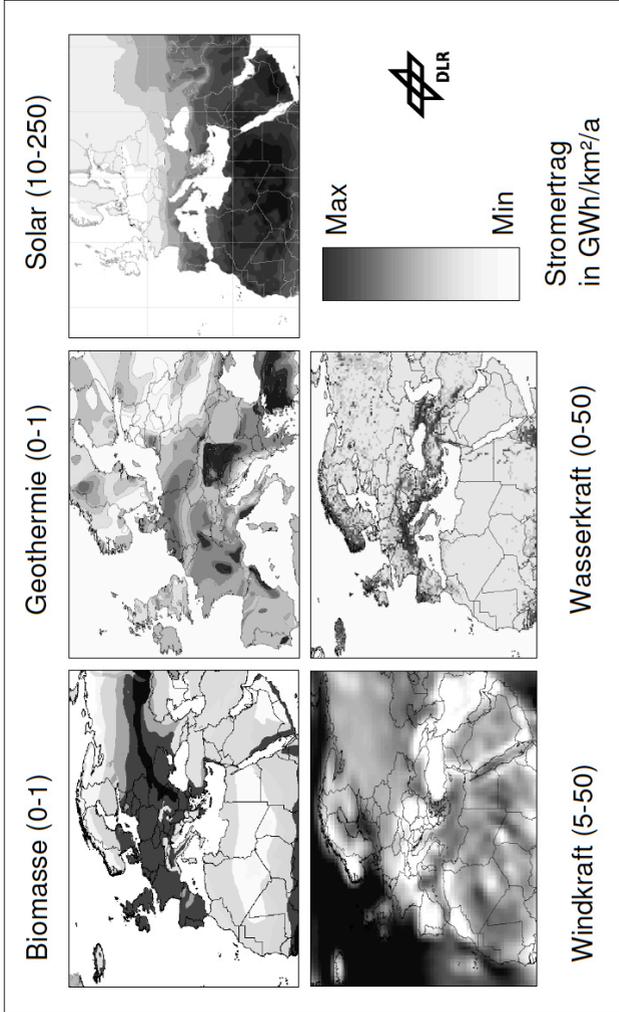


Abbildung 7.4: Geographische Verteilung erneuerbarer Energiequellen für EU-MENA, mit minimalem und maximalem jährlichen Stromertrag (in Klammern), der aus jeweils 1 km² Landfläche gewonnen werden kann. Solarenergie beinhaltet sowohl photovoltaische als auch konzentrierende solarthermische Kraftwerke. Die verschiedenen Eigenschaften jeder Ressource sind in Tabelle 7.3 aufgeführt [1].

Tabelle 7.3: Eigenschaften derzeitiger Stromerzeugungstechnologien, * Beitrag installierter Leistung zu gesicherter Leistung, ** mittlere jährliche Auslastung

	Leistungs- klasse	Leistungs- kredit*	Kapazitäts- faktor**	Resource	Anwen- dungen	Bemerkung
Windkraft	1 kW-5 MW	0-30%	15-50%	kinetische Energie des Windes	Strom	fluktuierend, angebotsbestimmt
Photovoltaik	1 W-5 MW	0%	15-25%	direkte und diffuse Strahlung auf eine entsprechend dem Breitengrad geeignete Fläche	Strom	fluktuierend, angebotsbestimmt
Biomasse	1 kW-25 MW	50-90%	40-90%	Biogas aus biolo- gischen Abfällen, feste Biomasse aus Holz und Agrarprodukten	Strom und Wärme	saisonale Schwankungen, gut speicherbar, bedarfsbestimmt
Geothermie, Hot Dry Rock	25-50 MW	90%	40-90%	Wärme aus Gestei- ren in mehreren 1000 Metern Tiefe	Strom und Wärme	keine Schwankungen bedarfsbestimmt
Wasserkraft	1 kW-1000 MW	50-90%	10-90%	kinetische Energie und Druck aus Laufwasser und Speicherseen	Strom	saisonale Schwankungen, gut speicherbar, auch als Pumpspeicher für andere Quellen
Aufwindkraftwerk	100-200 MW	10-70% je nach Speicher	20-70%	Direkte und diffuse Strahlung auf eine horizontale Fläche	Strom	saisonale Schwankungen, gut speicherbar, Grundlast
Solarthermische Kraftwerke	10 kW-200 MW	0-90% je nach Speicherröße und Hybridbetrieb	20-90%	Direkte Strahlung auf eine der Sonne nachgeführte Fläche	Strom und Wärme	solare Schwankungen durch Speicher und Hybridbetrieb aus- gleichbar, bedarfsbestimmt
Gasturbine	0,5-100 MW	90%	10-90%	Erdgas, Heizöl	Strom und Wärme	bedarfsbestimmt
Dampfkraftwerk	5-500 MW	90%	40-90%	Kohle, Braunkohle Erdgas, Heizöl	Strom und Wärme	bedarfsbestimmt
Atomkraftwerk	5>500 MW	90%	90%	Uran	Strom und Wärme	Grundlast



Abbildung 7.5: Portfolio verfügbarer erneuerbarer Technologien zur Stromerzeugung (Quelle: BMU, DLR)

Fossile Energiequellen wie Kohle, Erdöl und Erdgas stellen eine nützliche Ergänzung zu dem Mix aus erneuerbarer Energie dar, da sie perfekt gespeicherte Energieformen sind, die leicht zum Energieausgleich und zur Absicherung der Netzstabilität genutzt werden können. Wenn ihr Verbrauch bis zu dem Punkt gedrosselt werden kann, an dem sie ausschließlich als Reservekapazität dienen, wird voraussichtlich ihr Preisanstieg gebremst und daraus eine nur geringe Belastung für die wirtschaftliche Entwicklung resultieren, und ihr Umwelteinfluss wird minimiert. Darüber hinaus wird ihre Verfügbarkeit um Jahrzehnte, wenn nicht sogar um Jahrhunderte verlängert.

Kernkraftwerke dagegen sind für eine Kombination mit erneuerbaren Energien weniger gut geeignet, weil ihre Erzeugung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht dem ständig schwankenden Bedarf angepasst werden kann, insbesondere bei einem weiteren Ausbau von PV und Windkraft. Weiterhin übersteigen die Stilllegungskosten von Kernkraftwerken die Baukosten [16]. Ein halbes Jahrhundert nach ihrer Markteinführung bestehen noch immer ungelöste Probleme wie die unkontrollierte Verbreitung von Plutonium und die Beseitigung von Atommüll. Die zweite nukleare Option,

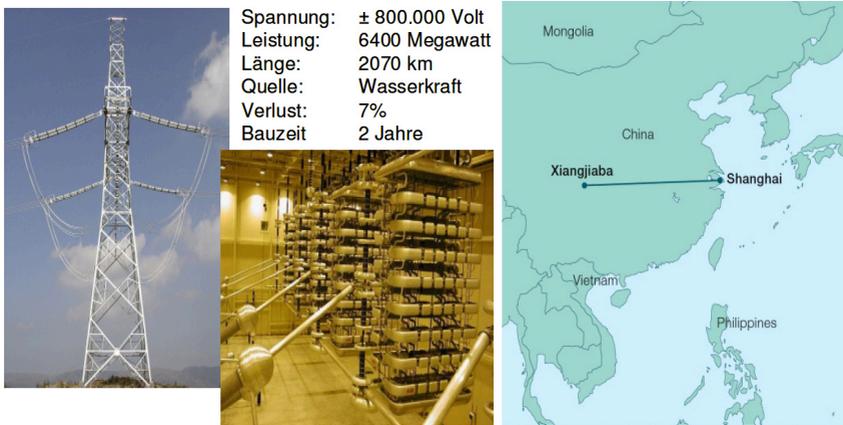


Abbildung 7.6: Ein Beispiel moderner Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung in China (Quelle: ABB)

die Kernfusion, wird aller Voraussicht nach nicht vor 2050 marktfähig sein und ist deshalb für unser Szenario nicht relevant [17].

Einige erneuerbare Energietechnologien sind ebenfalls in der Lage, Grund- und Spitzenlast nach Bedarf zur Verfügung zu stellen. Dazu gehören geothermale Systeme (z.B. das Hot Dry Rock Verfahren), die sich derzeit noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase befinden, große Wasserkraftwerke in Norwegen, Island und den Alpen, die meisten Biomasse-Anlagen und konzentrierende solarthermische Kraftwerke (CSP) in MENA. Letztere nutzen als solar betriebene Dampfkraftwerke die hohe jährliche Sonnenscheindauer in dieser Region, die Möglichkeit solar-thermischer Energiespeicherung für den Nachtbetrieb und die Option der Zufeuerung mit fossilen Brennstoffen oder Biomasse. In Europa sind solarthermische Kraftwerke starken saisonalen Schwankungen unterworfen. Konstante Leistung für die Grundlast kann nur unter Zuhilfenahme eines beträchtlichen Anteils an fossilen Brennstoffen geliefert werden. Aufgrund der stärkeren und über das Jahr gleichmäßigeren Sonnenstrahlung in MENA sind die Kosten konzentrierender Solarenergie dort üblicherweise niedriger und ihre Verfügbarkeit ist besser als in Europa. Deshalb existiert ein bedeutender Markt für Solarstromimporte, die die heimischen europäischen Quellen ergänzen und jederzeit verfügbare (Regel-)Leistung zu wettbewerbsfähigen Preisen bereitstellen können.

7.5 Die Rolle solarthermischer Kraftwerke

Mit Kohle, Uran, Erdöl und Erdgas betriebene Dampf- und Gasturbinen sind die heutigen Garanten für elektrische Netzstabilität, indem sie sowohl Grund- als auch Spitzenlast erzeugen. Allerdings können Turbinen auch mit thermischer Energie aus konzentrierenden Solarkollektoren (Abbildung 7.7) angetrieben werden. Kraftwerke dieses Typs mit 30-80 MW Leistung sind in Kalifornien bereits seit 20 Jahren erfolgreich im Einsatz und neue Kraftwerke werden derzeit in den USA, Spanien und weiteren Ländern errichtet. Bis 2015 könnten weltweit etwa 10 GW Leistung installiert werden, bis 2025 sogar 60-100 GW. Heute, im Jahr 2011, ist weltweit etwa 1 GW in Betrieb. Konzentrierende Solarkollektoren sind effiziente Brennstoffsparer in Dampfkraftwerken. Laut einer aktuellen Studie könnten die heutigen Einspeisetarife für Solarstrom in Spanien von etwa 27 ct/kWh bis 2020 auf unter 10 ct/kWh sinken [18].

Ebenso wie konventionelle Kraftwerke können solarthermische Kraftwerke Grund- und Spitzenlaststrom (sowie auch Regelleistung) liefern, indem sie tagsüber die verfügbare Sonnenenergie nutzen, nachts thermische Energiespeicher verwenden und im Falle längerer Phasen ohne Sonnenschein auf fossile Brennstoffe oder Biomasse als Wärmequelle zurückgreifen. Wie herkömmliche Kraftwerke, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, liegt die Verfügbarkeit von solchen Kraftwerken nahezu bei 100 %, allerdings bei deutlich niedrigerem Brennstoffverbrauch. Zwei CSP Kraftwerke mit thermischen Energiespeichern für zusätzliche acht Stunden Betriebszeit bei voller Last werden seit einigen Jahren in der spanischen Sierra Nevada bei Guadix betrieben. Diese Anlagen (ANDASOL 1 & 2) mit einer Kapazität von jeweils 50 MW haben einen jährlichen Solaranteil der Stromerzeugung von 85 %, der Rest wird mit Erdgas erzeugt

Ein weiteres Merkmal zeichnet solarthermische Kraftwerke aus: die Möglichkeit der kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme, um die höchstmögliche Effizienz für die Energieumwandlung zu erreichen. Neben Strom können solche Anlagen auch Dampf für Absorptionskältemaschinen (AC), industrielle Prozesswärme oder thermische Meerwasserentsalzung (MED) liefern. Eine Machbarkeitsstudie für solche Anlagen in fünf Ländern der Mittelmeerregion wurde im Mai 2010 erfolgreich abgeschlossen [19].

7.6 Nachhaltige Energie- und Wasserversorgung für EU-MENA

Anhand der in Tabelle 7.1 formulierten Nachhaltigkeitskriterien und unter Berücksichtigung zusätzlicher technischer, sozialer und wirtschaftlicher



Abbildung 7.7: Links: Konfiguration eines konzentrierenden Solarkraftwerks mit Kraft-Wärme-Kopplung für Kälteerzeugung (absorption chiller AC) and Meerwasserentsalzung (multi-effect desalination MED). Mitte oben: Linear Fresnel Kollektorfeld der Firma Novatec bei Murcia, Spanien. Mitte unten: Wärmespeicher und Parabolrinnenkollektoren im andalusischen Solarkraftwerk ANDASOL 1, Rechts unten: Solarturmkraftwerk CESA 1 in Almeria. Rechts oben: ANDASOL 1 und 2 (Quellen: Novatec, Cobra S.A., DLR).

Rahmenbedingungen, die an anderer Stelle bereits beschrieben wurden [1, 2], wurde vom DLR ein Szenario für die Energieerzeugung für 50 Länder der MENA-Region bis zum Jahr 2050 entwickelt. Mit Ausnahme von Windenergie und Wasserkraft, die heute bereits beide als voll etabliert gelten können, werden erneuerbare Energieformen kaum vor dem Jahr 2020 im Strommix sichtbar werden (Abbildung 7.8 und Abbildung 7.9). Gleichzeitig wird das Auslaufen der Nutzung von Kernenergie in vielen europäischen Ländern und der aus Umweltschutzgründen stagnierende Verbrauch von Stein- und Braunkohle einen zunehmenden Druck auf die Erdgasvorkommen ausüben, deren Verbrauch steigen wird und auf deren Funktion zur Energiegewinnung verstärkt zurückgegriffen werden wird.

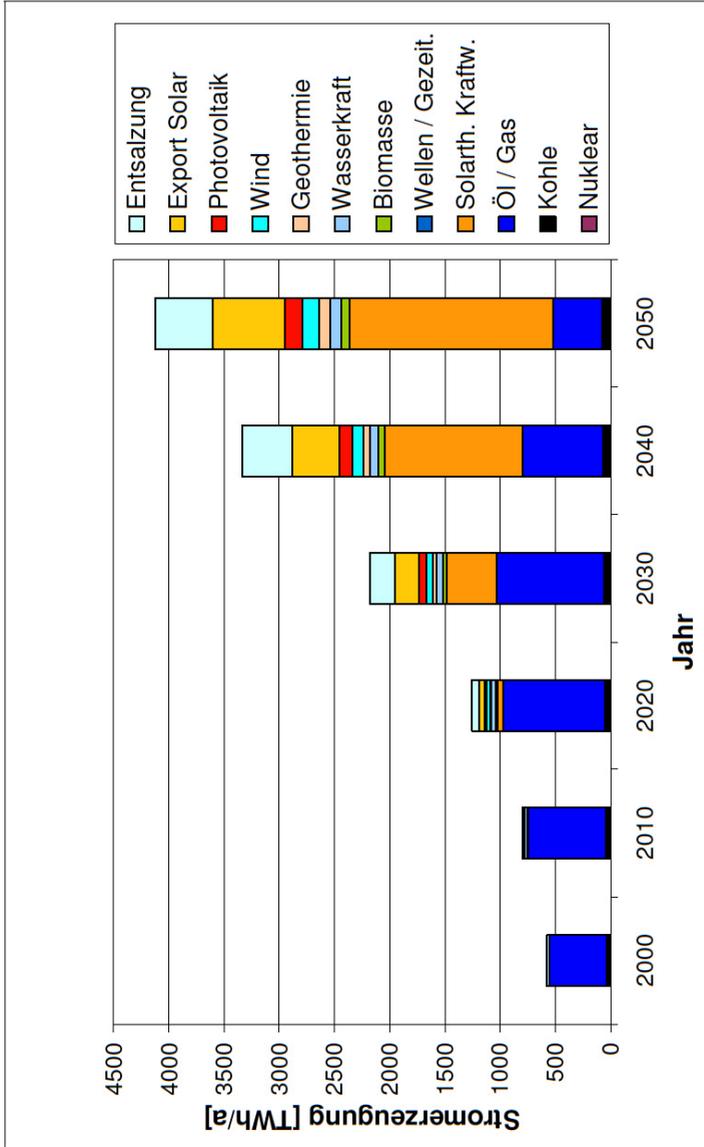


Abbildung 7.8: Stromerzeugung auf der Basis erneuerbarer und fossiler Energiequellen in MENA zur Deckung des wachsenden Energiebedarfs unter Berücksichtigung von Solarstromexporten nach Europa und dem zusätzlichen Strombedarf für die Meerwasserentsalzung in der Region.

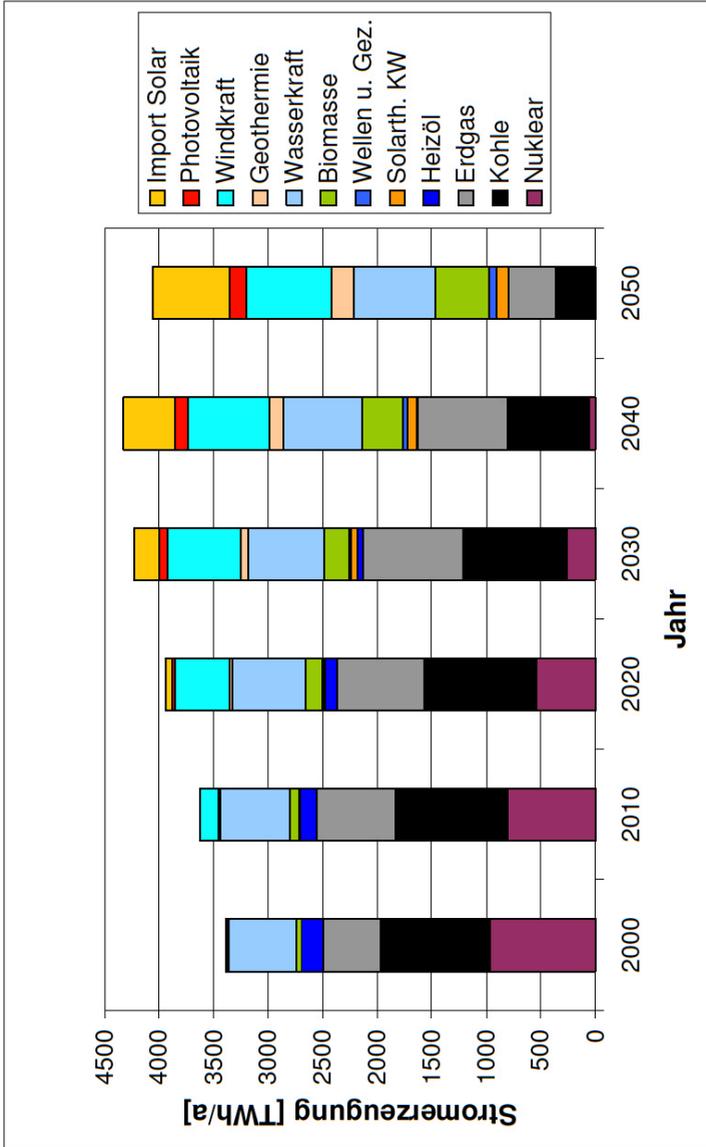


Abbildung 7.9: Stromerzeugung auf der Basis erneuerbarer, nuklearer und fossiler Energiequellen in Europa zur Deckung des Energiebedarfs unter Berücksichtigung von Solarstromimporten aus MENA.

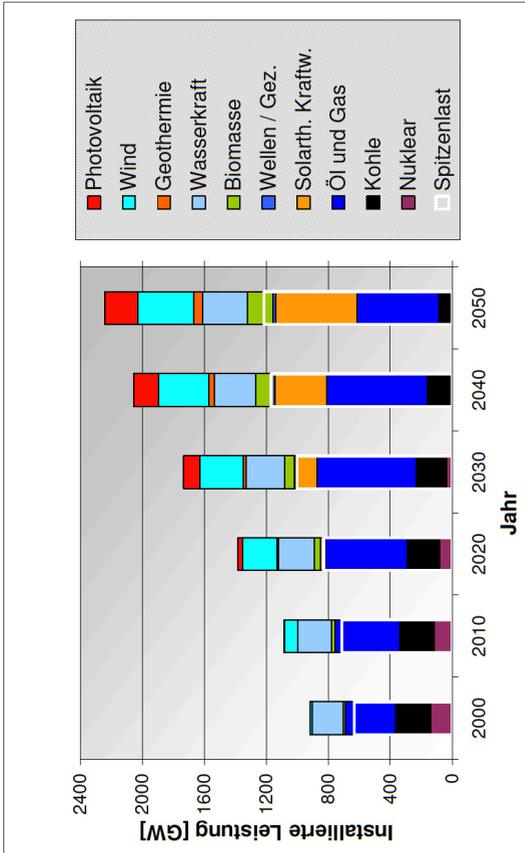


Abbildung 7.10: Installierte Leistung im Vergleich zur kumulierten Spitzenlast (transparentes Feld mit weißem Rahmen) für die gesamte Region EU-MENA. Die gesicherte, jederzeit verfügbare Leistung des Kraftwerksparcs wurde für jedes einzelne Land mit Hilfe der in Tabelle 7.3 angegebenen Leistungskredite der verschiedenen Technologien so kalkuliert, dass sie jederzeit die Spitzenlast mit einer zusätzlichen Reserve von 25 % abdecken kann. Im Jahr 2050 werden 68 % der installierten Leistung solarthermischer Kraftwerke für den lokalen Strombedarf, 19 % für den Solarstrom-export und 13 % für die Meerwasserentsalzung genutzt werden. Die hier gezeigte installierte Leistung liefert insgesamt die in Abbildung 7.8 und Abbildung 7.9 dargestellten Strommengen und sichert die Netzstabilität zu jeder Zeit.

Bis 2020 werden erneuerbare Energieformen wie Wind und Photovoltaik vor allem zur Reduzierung des Brennstoffverbrauchs, aber nur wenig zur Verminderung der notwendigen konventionellen Kraftwerke für Regelleistung beitragen. Aufgrund des wachsenden Bedarfs und der Ablösung der Kernkraft wird der Verbrauch fossiler Brennstoffe vor 2020 nicht wesentlich reduziert werden können. Heizöl für die Stromerzeugung wird bis 2030 aus Kostengründen weitgehend verschwunden sein, gefolgt von Kernkraft im letzten Jahrzehnt des Szenarios, die dann nicht mehr gebraucht wird. Der Verbrauch an Erdgas und Kohle wird deshalb mittelfristig bis 2030 ansteigen, aber danach bis 2050 auf ein kompatibles und finanziell verträgliches Maß reduziert werden können. Auf lange Sicht ist nicht auszuschließen, dass neue Verbrauchertypen wie Elektroautos den Energiebedarf weiter ansteigen lassen und demzufolge eine stärkere Ausbeutung erneuerbarer Energien notwendig wird. Ausreichend Potenziale sind dafür in jedem Fall vorhanden.

Der Strommix im Jahr 2000 stammte aus nur fünf Quellen, von denen die meisten begrenzt sind, während die Mischung im Jahr 2050 auf zehn Energiequellen beruhen wird, die in der Mehrzahl erneuerbar sind. Aus diesem Grund erfüllt das hier vorgestellte Szenario die von der Europäischen Kommission deklarierte „European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy“, im gleichnamigen Green Paper und Hintergrunddokument, das auf eine größere Diversifizierung und Sicherheit des europäischen Energiebestands abzielt [7, 8].

Eine wesentliche Bedingung für die Gestaltung einer nachhaltigen Elektrizitätsversorgung ist die Bereitstellung gesicherter Leistung nach Bedarf mit einer Reserve in Höhe von ca. 25 % zusätzlich zur erwarteten Spitzenlast (Abbildung 7.10). Vor dem Beginn einer signifikanten Solarstromübertragung im Jahr 2020 kann dies nur gewährleistet werden, indem die Kapazität und der Brennstoffkonsum von Spitzenlastkraftwerken mittels Erdgas - und zu einem späteren Zeitpunkt auf Basis von Kohlevergasung - erweitert wird. Damit entlasten Solarstromimporte den Verbrauch fossiler Energieträger, stellen aber keine Konkurrenz zu heimischer Windkraft- und PV-Nutzung dar.

In Europa verdoppelt sich im Szenario der Erdgasverbrauch bezogen auf das Anfangsjahr 2000, wird aber dann wieder auf das ursprüngliche Niveau sinken, nachdem im Jahr 2020 ein wachsender Anteil an CSP Übertragung aus den MENA-Ländern neben geothermischer Energie und Wasserkraft aus Skandinavien via Hochspannungsgleichstrom-Übertragung (HGÜ) eingeführt wird. Europäische erneuerbare Energiequellen, die sicher abrufbare Leistung bereitstellen könnten, sind mit Blick auf ihr Po-

tenzial sehr begrenzt. Deshalb wird die Solarstrom-Übertragung von MENA nach Europa unabdingbar sein, um sowohl die Kapazität und den Brennstoffkonsum von Erdgas betriebenen Spitzenlastkraftwerken durch jederzeit lückenlos abrufbare, erneuerbare Leistung zu ersetzen.

In den MENA-Ländern stellen konzentrierende thermische Solarkraftwerke die einzige erneuerbare Quelle dar, die tatsächlich in der Lage ist, den schnell anwachsenden Stromkonsum zu befriedigen, da sie sowohl Grundlaststrom als auch Regelleistung nach Bedarf liefern können. Speicherwerkkraft, um das fluktuierende Wind- und PV-Stromangebot auszugleichen, ist praktisch nicht vorhanden. Nach unserem Szenario werden im Jahr 2050 fossile Energiequellen lediglich als Notfallreserve genutzt werden, zum grössten Teil auch in solarthermischen Kraftwerken. Dies wird den Verbrauch von Brennstoffen auf ein verträgliches Maß reduzieren und die andernfalls rapide steigenden Stromerzeugungskosten senken. Fossile Brennstoffe werden weiterhin genutzt werden, um jederzeit gesicherte Leistung zu garantieren, während erneuerbare Energien deren Verbrauch stark reduzieren werden.

Zur Ergänzung des erneuerbaren Strommixes wird eine effiziente Backup-Infrastruktur benötigt: Einerseits muss sie eine gesicherte bedarfsorientierte Kapazität durch schnell reagierende, mit Erdgas befeuerte Spitzenlastkraftwerke bereitstellen. Andererseits muss eine effiziente Netzinfrastruktur bereitstehen, die die Übertragung erneuerbaren Stroms von den am besten geeigneten Produktionsstätten zu den Hauptverbrauchszentren erlaubt. Eine mögliche Lösung ist die Kombination von HGÜ-Leitungen und dem konventionellen Wechselspannungsnetz.

Im Niederspannungsbereich werden auch dezentralisierte Strukturen an Bedeutung gewinnen, indem beispielsweise der Betrieb von PV, Wind-, Mikro-Gasturbinen und Blockheizkraftwerken so kombiniert wird, als wären sie ein großes, virtuelles Kraftwerk. Eine solche Netzinfrastruktur wird nicht durch die Nutzung von erneuerbaren Energieformen allein begründet sein. Vielmehr wird diese Entwicklung wahrscheinlich ohnehin stattfinden, um das wachsende europäische Netz zu stabilisieren, um größere Versorgungssicherheit zu erhalten und um den Wettbewerb zu stärken [20, 21].

Bis 2050 werden Übertragungsleitungen mit einer Kapazität von jeweils 2,5-5,0 GW rund 700 TWh Solarenergie pro Jahr von 20 bis 40 verschiedenen Orten im Mittleren Osten und Nordafrika zu den Hauptverbrauchszentren in Europa liefern (Abbildung 7.11 und Tabelle 7.4).

HGÜ steht seit mehreren Jahrzehnten als ausgereifte Technologie zur Verfügung und gewinnt zunehmend an Bedeutung für die Stabilisierung von großflächigen Stromnetzen, insbesondere wenn mehr fluktuierende Res-

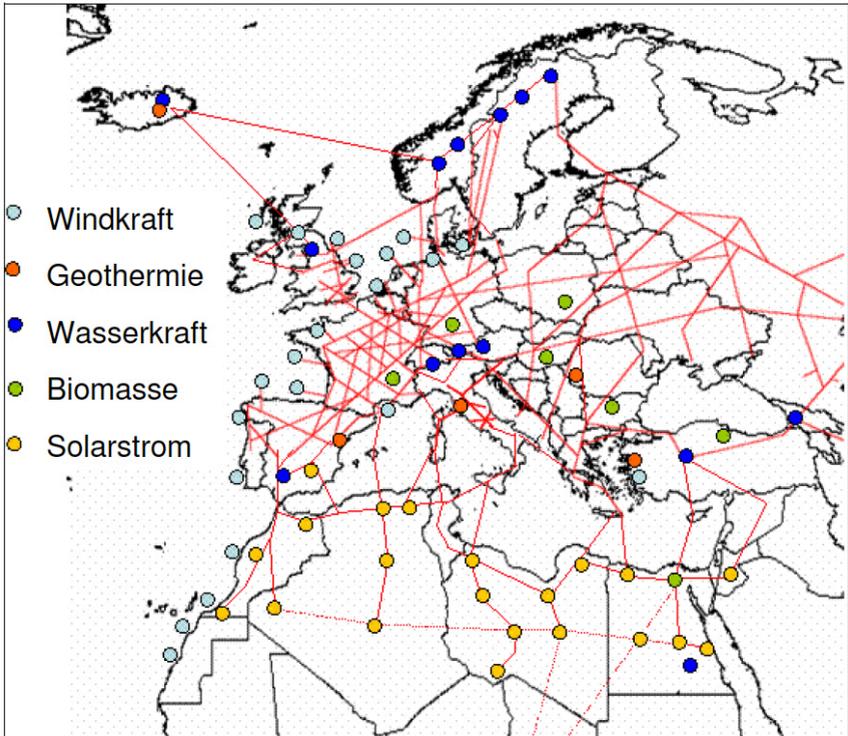


Abbildung 7.11: Schematische Darstellung eines möglichen zukünftigen Verbundes mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen in der Region EU-MENA. Solche „Stromautobahnen“ könnten das konventionelle Wechselstromnetz ergänzen, um einen effizienten Ferntransport erneuerbarer Energie von den besten Produktionsstandorten zu den Verbrauchszentren zu ermöglichen (nach [20]).

Tabelle 7.4: Indikatoren für den EU-MENA Solarstromexport aus solarthermischen Kraftwerken (CSP) via Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) zwischen 2020 und 2050 nach dem TRANS-CSP Szenario. Im Jahr 2050 werden 20 bis 40 HGÜ-Leitungen mit einer Leistung von je 2,5–5,0 GW insgesamt etwa 700 TWh Strom von MENA nach Europa übertragen und dort in den Ballungszentren einspeisen. Die Tabelle zeigt auch die kumulierte Investition bis 2050 für Leitungen und Kraftwerke sowie die gesamten Stromkosten inkl. Übertragung in konstantem Geldwert des Jahres 2000 (zur Abschätzung heutiger oder zukünftiger nominaler Kosten - zum heutigen oder zukünftigen Geldwert - muss die Inflation ab dem Jahr 2000 dazugerechnet werden). Stromkosten wurden auf der Basis 5 % Zinssatz und 40 Jahre Lebensdauer für CSP bzw. 80 Jahre für HGÜ-Leitungen berechnet [2].

<i>Jahr</i>		<i>2020</i>	<i>2030</i>	<i>2040</i>	<i>2050</i>
<i>Anzahl × Leistung</i> <i>GW</i>		2 × 5	8 × 5	14 × 5	20 × 5
<i>Transfer TWh/a</i>		60	230	470	700
<i>Mittlere Auslastung</i>		0,60	0,67	0,75	0,80
<i>Umsatz Mrd. €/a</i>		3,8	12,5	24,0	35,0
<i>Landfläche</i>	<i>CSP</i>	15 × 15	30 × 30	40 × 40	50 × 50
<i>km × km</i>	<i>HGÜ</i>	3100 × 0,1	3600 × 0,4	3600 × 0,7	3600 × 1,0
<i>Investition</i>	<i>CSP</i>	42	134	245	350
<i>Mrd. €</i>	<i>HGÜ</i>	5	16	31	45
<i>Stromkosten</i>	<i>CSP</i>	0,050	0,045	0,040	0,040
<i>€/kWh</i>	<i>HGÜ</i>	0,014	0,010	0,010	0,010

sources eingebunden werden. HGÜ tragen dazu bei, Ausgleichseffekte zwischen entfernten und lokalen Energiequellen zu erhöhen, und gegebenenfalls Betriebsausfälle großer Kraftwerke durch Backup-Kapazitäten aus der Ferne abzufangen.

Als Nebeneffekt dieser Entwicklung wird Solarstrom aus MENA-Ländern eine attraktive Option zur Erweiterung des europäischen Stromerzeugungs-Portfolios werden. Aufgrund der Abundanz und der saisonalen Konstanz der Solarenergie aus den Wüsten wird sie billiger und leichter erhältlich sein als in Europa erzeugte Solarenergie. In einer zukünftigen Allianz für erneuerbare Energien zwischen Europa und MENA werden Solar- und Windenergie, Wasserkraft, geothermische Energie sowie Biomasse an den Orten genutzt, wo sie am reichhaltigsten vorliegen.

Diese Energie wird über zum Teil große Entfernungen per HGÜ durch ganz Europa und MENA übertragen und dann in das konventionelle AC-Netz eingespeist, von wo es an die Verbraucher verteilt wird. In Analogie zum Autobahnnetz wird ein zukünftiges HGÜ-Netz eine geringe Anzahl von Einlässen und Auslässen haben, die es mit dem konventionellen Wechselspannungsnetz verbinden, weil es vorrangig der Fernenergieübertragung dient, während das Wechselspannungsnetz mit dem Straßensystem auf dem Land und in Stadtgebieten vergleichbar ist und wie bisher die Aufgabe der lokalen Verteilung der Energie übernimmt. Der Verlust der in MENA generierten Solarenergie durch HGÜ wird über eine Entfernung von 3000 km etwa 10 % betragen.

Im Jahr 2050 könnten 20 bis 40 Stromleitungen mit einer Kapazität von jeweils 2500-5000 MW etwa 15 % der Europäischen Energie als saubere Energie aus der Wüste liefern. Der Wert dieser Importe gründet sich auf niedrige Produktionskosten von langfristig ca. 5 ct/kWh (ohne weitere potenzielle Kostenreduzierungen über CO₂-Handel zu berücksichtigen) und eine hohe Flexibilität hinsichtlich Grund-, Regel- und Spitzenlastbetrieb [22, 23].

Es existiert die weit verbreitete Überzeugung, dass für jede Windfarm oder PV-Anlage ein mit fossilen Brennstoffen betriebenes Backup-Kraftwerk installiert werden muss. Im Gegensatz dazu zeigte ein Modell stündlicher Zeitverläufe des Energieversorgungssystems ausgewählter Länder gemäß unserem Szenario, dass sogar ohne zusätzliche Stromspeicherkapazitäten die existierende Regelleistung der Spitzenlastkraftwerke zum Ausgleich von Bedarfsfluktuationen ausreicht. Dies gilt, solange die fluktuierende Leistung kleiner bleibt als die installierte Leistung vorhandener Spitzenlastkraftwerke, was in unserem Szenario der Fall ist.

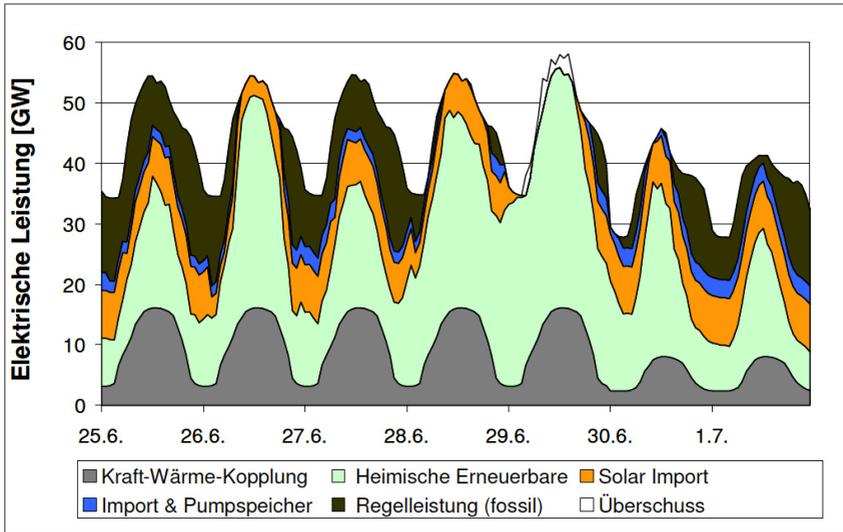


Abbildung 7.12: Ausschnitt aus einer stündlichen Modellierung der Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2050 mit hohen Anteilen erneuerbarer Energie [24].

Tatsächlich wird sich der Bedarf an konventionellen Grundlastkraftwerken, die eine konstante Ausgangsleistung erzeugen, als Konsequenz des wachsenden Anteils erneuerbarer Energien Schritt für Schritt verringern (Abbildung 7.12). Grundlaststrom wird durch Kraft-Wärme-Kopplung, die Brennstoffe auf fossiler und Biomasse-Basis nutzt, durch Laufwasserkraft und durch Windkraft- und Photovoltaikanlagen gewonnen. Regelleistung wird aus besser speicherbaren Quellen wie Speicherwasserkraft, Biomasse oder geothermischer Energie gewonnen. Diese Kombination von Energiequellen wird den täglichen Lastverlauf nicht vollständig abdecken, sich ihm aber stark annähern. Die verbleibende Spitzenlastkapazität (oder besser gesagt Regellast) wird durch Pumpspeicherkraftwerke, Speicherwasserkraft, solarthermische Kraftwerke und auf fossilen Brennstoffen basierenden Spitzenlastkraftwerken bereitgestellt. Zusätzlich wird ein bedarfsseitig verbessertes Lastmanagement zunehmend dafür genutzt werden, die Nutzung von Pumpspeicherkapazität und fossilen Brennstoffen für Spitzenlast zu minimieren, deren Betrag verglichen mit heute in etwa gleich bleiben wird [24].

Die im Jahr 2050 noch verbleibenden, mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kapazitäten werden ausschließlich Ausgleichsaufgaben und der kombinierten Strom- und Wärmegenerierung dienen. Dies entspricht der Strategie, diese wertvollen, perfekt gespeicherten Energiereserven ausschließlich für die Zwecke zu nutzen, für die sie am besten geeignet sind, anstelle sie für den Alltagsgebrauch aufzuzehren. Grundlastkraftwerke mit konstanter Ausgangsleistung, die durch Kernspaltung, Kernfusion oder Braunkohle angetrieben werden, sind für ein solches System nicht passfähig, weil sie nicht in der Lage sind, die Lücke zwischen dem teilweise fluktuierenden Angebot aus erneuerbaren Energiequellen und dem ebenso fluktuierenden Bedarf zuverlässig zu schließen. Tatsächlich werden mit Erdgas betriebene Kraftwerke die bevorzugte Wahl für diese Zwecke sein. Langfristig werden nach 2050 erneuerbare Quellen in Verbindung mit fortgeschrittenem Speicher- und Lastmanagement und in enger Koordinierung mit anderen Energiesektoren wie Wärme- und Kälteerzeugung sowie dem Transport- und Mobilitätssektor letztendlich auch den verbleibenden Strombedarf übernehmen.

7.7 Kostengünstiger Strom aus erneuerbarer Energie

Bei einem weltweit zügigen Ausbau von solarthermischen Kraftwerken kann eine Reduzierung der Solarstromkosten aufgrund der Rationalisierungseffekte mit einer Entwicklungsrate von ca. 85-90 %³ erreicht werden [26]. Ein solches Kraftwerk kann heute beispielsweise in Abhängigkeit von der Sonnenscheindauer Strom zu ca. 0,15-0,20 €/kWh erzeugen (Abbildung 7.13), wenn man von einer Verzinsung des Kapitals von 6,5 %/a und einer Lebensdauer von 25 Jahren ausgeht. Bei einer Installation von weltweit 10.000 MW würden die Kosten in Folge der Lerneffekte auf ungefähr 0,08-0,10 €/kWh fallen, und auf bis zu 0,04-0,06 €/kWh nach Installation einer 100.000 MW-Kapazität.⁴ Eine solche Kostenreduzierung könnte bei einer angenommenen globalen Expansion von heute 1000 MW auf etwa 40.000 MW bis zum Jahr 2020 und ungefähr 240.000 MW bis 2030 erfolgen, inklusive der Kapazitäten für die Meerwasserentsalzung [1, 2, 12]. Aktuelle Szenarien gehen sogar von deutlich stärkerem Wachstum solarthermischer

³Eine Lernrate von 90 % bedeutet, dass die spezifische Investition sich immer dann um 10 % reduziert, wenn die weltweit installierte Kapazität der Sonnenkollektoren verdoppelt wird [25, 26].

⁴Diese Kosten basieren auf einem ausschließlich solarbetriebenen Modus und wären im Hybridmodus aufgrund der besseren Tilgungsraten des Kraftwerksblocks geringfügig niedriger. Alle Kosten in konstantem (realem) Geldwert (€) des Jahres 2000 ohne Inflation.

Kraftwerke aus [27, 28]. Langfristig könnten weltweit insgesamt 500.000 – 1.000.000 MW bis zum Jahr 2050 installiert werden. Alle Kosten sind in konstantem Geldwert des Jahres 2000 (ohne Inflation) angegeben.

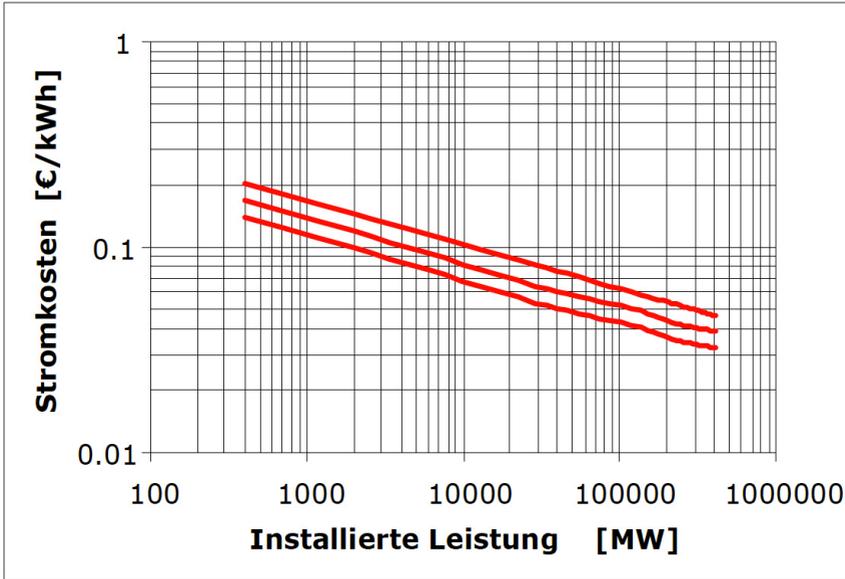


Abbildung 7.13: Voraussichtliche Entwicklung der Stromkosten solarthermischer Kraftwerke unter der Annahme eines kontinuierlichen weltweiten Ausbaus für eine Einstrahlung von 2000, 2400 und 2800 kWh/m²/a (konstanter Geldwert in € des Jahres 2000, 25 Jahre Lebensdauer, Diskontrate 6,5 %/a, vergl. [26, 2]).

Alle erneuerbaren Stromquellen zeichnen sich durch ähnliche Erfahrungskurven aus und werden mit zunehmendem Ausbau kostengünstiger. Im Gegensatz zu den meisten erneuerbaren Energiequellen, die Ausbaugrenzen hinsichtlich ihrer installierbaren Leistung aufweisen, übersteigt das technisch verfügbare Sonnenenergiepotenzial in den MENA-Ländern den projizierten zukünftigen Strombedarf um etwa ein Hundertfaches.

Außerdem werden die Kosten der sauberen Energie aus den Wüsten aufgrund der besseren Sonnenstrahlung inklusive der Übertragungskosten niedriger sein als Sonnenenergie, die aus demselben in Europa verwendeten

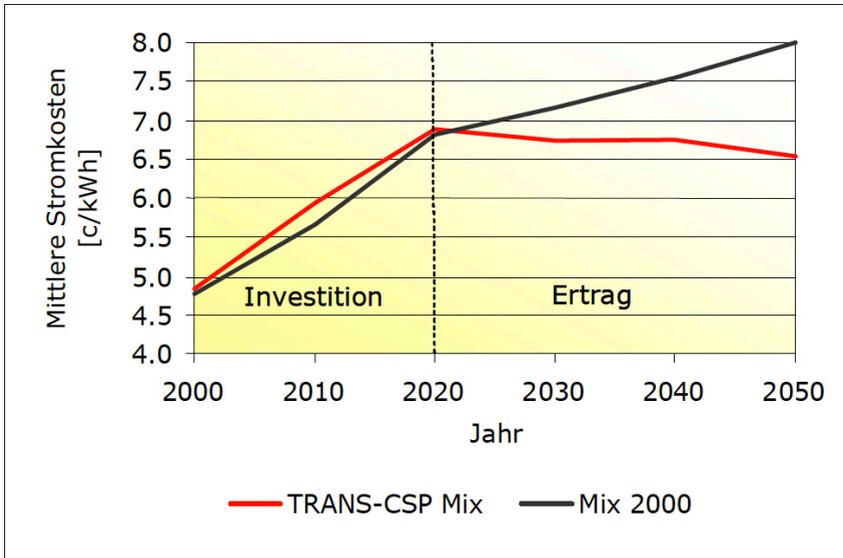


Abbildung 7.14: Kosten im Spanischen Strommix entsprechend dem TRANS-CSP Szenario im Vergleich zu einer Beibehaltung des Strommixes des Jahres 2000 [2]. Alle Kostenangaben in konstantem Geldwert (€) des Jahres 2000.

Kraftwerkstyp stammt. Nimmt man den spanischen Strommix als Beispiel, wie in [2] beschrieben, dann zeigt ein Szenario aus einer Mischung aus heimischen erneuerbaren Energien, Solarenergie aus Nordafrika und fossilen Brennstoffen mittelfristig stabile und sogar leicht sinkende Stromkosten. Geht dagegen alles wie gewohnt weiter, wird dies zu sich immer höher schraubenden Energiekosten führen (Abbildung 7.14), wie es seit 2000 der Fall ist. Im TRANS-CSP Szenario wird die Expansion erneuerbarer Energien in Marktnischen wie dem Deutschen oder dem Spanischen Erneuerbaren Energiegesetz bis etwa 2020 stattfinden und zu vorübergehend leicht erhöhten Kosten führen. Während dieser Zeit wird der Anteil erneuerbarer Energien ansteigen, während die Kosten für Strom erneuerbarer Herkunft sinken werden.

Sobald Kostengleichheit mit fossilen Energieträgern erreicht ist, werden erneuerbare Kapazitäten schneller anwachsen und damit weitere Steigerungen der nationalen Stromkosten vermeiden. Auf diese Weise können

die mittleren Stromkosten konstant gehalten bzw. in manchen Fällen sogar wieder auf ein niedrigeres Niveau gesenkt werden, indem der Anteil erneuerbarer Energiequellen erhöht wird. Dieses Konzept ist in allen EU-MENA-Ländern realisierbar.

Wie der unaufhaltsame Anstieg der Energiekosten deutlich zeigt, ist eine Einführung erneuerbarer Energiequellen im großen Umfang die einzige sichtbare Lösung, wenn man eine weitere Kostenanhebung auf lange Sicht im Energiesektor vermeiden und mittelfristig zu einem relativ niedrigen Stromkostenniveau zurückkehren will. Dies stimmt mit der Verpflichtung der meisten Energieversorger überein, ihren Kunden den kostengünstigsten Strom zu liefern. Solarstromimporte aus den Wüsten sind ein Schlüsselement einer solchen Strategie.

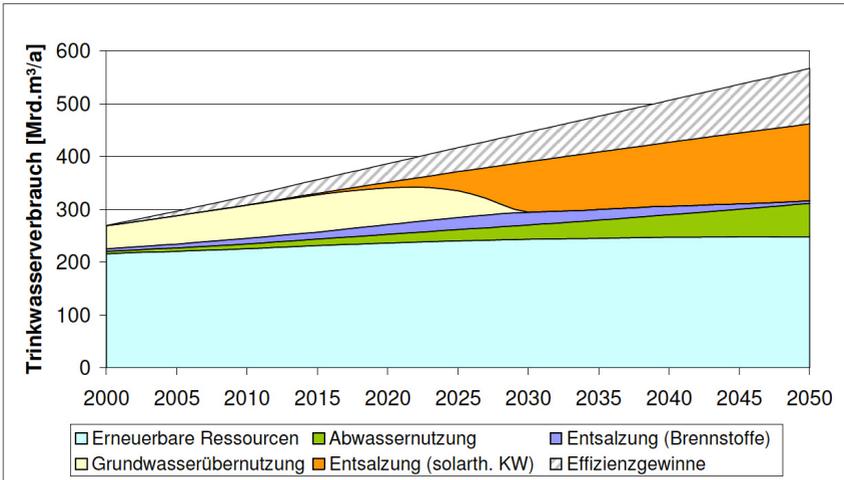


Abbildung 7.15: Szenario der Wasserversorgung in MENA bis zum Jahr 2050. Quelle: [12]

Eine finanziell tragbare und nachhaltige Energieressource wird darüber hinaus für einen noch existenzielleren Rohstoff benötigt: durch Meerwasserentsalzung gewonnenes Trinkwasser. Solarthermische Kraftwerke und andere erneuerbaren Energien können auch hier eine Lösung bieten [29]. Die AQUA-CSP Studie zeigt das Potential von CSP für die Meerwasserentsalzung in der MENA-Region und beschreibt die verfügbaren technischen Optionen, die von solarbetriebener Membranen-Entscheidung bis zur

kombinierten Erzeugung von Solarstrom und Wärme für die thermische Mehrstufenentsalzung reichen [12].

Tatsächlich gibt es keinen anderen Weg, um eine ernstzunehmende Wasserkrise in der MENA-Region zu verhindern, die bisher nur durch eine ansteigende Übernutzung von Grundwasserreserven hinausgeschoben wird. Es müssen alle vorhandenen Optionen aktiviert werden, mit dem Ziel eines besseren Wassermanagements durch eine höhere Effizienz bei der Wasserverteilung und beim Endverbrauch, der Abwasseraufbereitung und -wiederverwertung sowie der Meerwasserentsalzung basierend auf erneuerbaren Energiequellen (Abbildung 7.15).

7.8 Eine Alternative zu Klimawandel und Kernenergie

Durch die Implementierung unseres Szenarios können die Kohlenstoffemissionen auf Werte reduziert werden, die mit dem globalen Ziel vereinbar sind, den Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre soweit zu reduzieren, dass eine globale Erwärmung im Bereich von 1,5-3,9 °C gehalten werden kann [30]. Ausgehend von 1790 Mio. Tonnen Kohlendioxid pro Jahr im Jahr 2000, können die Emissionen auf 690 Mt/a in 2050 verringert werden, anstatt auf 3700 Mt/a anzuwachsen (Abbildung 7.16). Die bis 2050 erreichbare Pro-Kopf-Emissionsmenge von 0,58 t/cap/a im Stromsektor ist akzeptabel mit Blick auf die vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU) empfohlene Gesamtemissionsmenge von 1-1,5 t/cap/a [31]. Weitere Einsparungen nach 2050 sind erreichbar. Auch andere Schadstoffe werden auf diese Weise reduziert, ohne auf eine Erweiterung der Kernenergie und die damit zusammenhängenden Risiken zurückgreifen zu müssen.

Kohlenstoffabspaltung und -speicherung (CCS) betrachten wir in unserer Studie als Ergänzung, aber nicht als Alternative zu erneuerbaren Energien, da sie die Effizienz von Kraftwerken vermindert und dadurch den Verbrauch von fossilen Brennstoffen um bis zu 30 % beschleunigt. Aufgrund der Tatsache, dass die Kosten der Kohlenstoffabspaltung stets zusätzlich zu den Kosten fossiler Brennstoffe entstehen, führt CCS zu einem früheren Erreichen des Kostendeckungspunktes mit erneuerbaren Energien und zu deren schnellerer Markteinführung.

Die Fläche, die für die gesamte Infrastruktur erneuerbarer Energien unter Einbeziehung der vorgeschlagenen HGÜ-Leitungen im Zeitraum bis 2050 benötigt wird, umfasst etwa 1 % der gesamten Landfläche der EU-MENA-Region. Dies ist mit der derzeit für die Transport- und Verkehrsinfrastruktur genutzten Landfläche in Europa vergleichbar. Unter

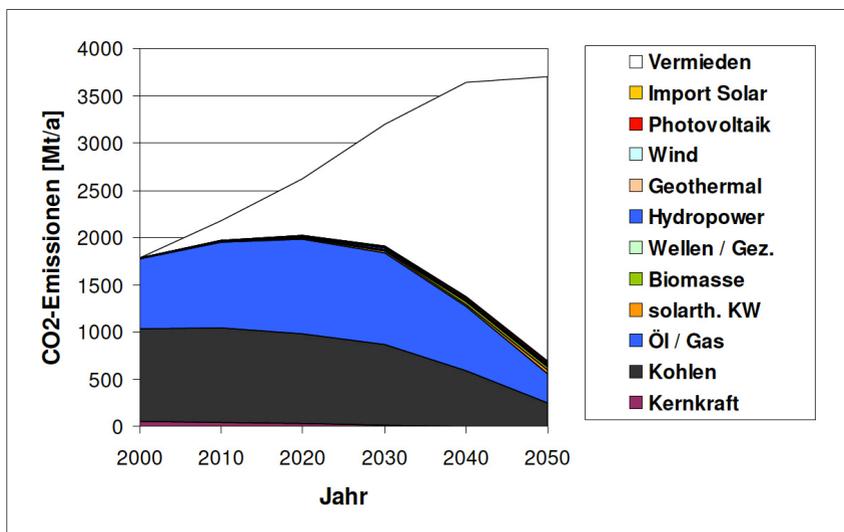


Abbildung 7.16: CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung in Millionen Tonnen pro Jahr für alle untersuchten Länder in EU-MENA sowie die durch die Implementierung der hier vorgestellten Szenarien vermeidbaren Emissionen (Vergleichsfall: Mix des Jahres 2000 wird beibehalten, wobei die Emissionen proportional zum steigenden Verbrauch anwachsen).

Verwendung eines geographischen Informationssystems (GIS) wurden drei Beispiele von HGÜ-Leitungen anhand einer Lebenszyklusanalyse [32] analysiert, die sehr gut geeignete Standorte für die Solarstromerzeugung in MENA mit drei bedeutenden europäischen Verbrauchszentren verbinden. Das GIS wurde so programmiert, dass die Kosten, die Umweltbeeinträchtigungen und die Sichtbarkeit der Stromleitungen minimiert wurden, und lieferte Ergebnisse, die aus unserer Sicht innerhalb eines ökonomisch und ökologisch akzeptablen Bereichs liegen. Üblicherweise sind die Auswirkungen durch HGÜ-Leitungen auf die Umwelt geringer als die vergleichbarer Wechselstromleitungen herkömmlicher Technologie.

Alles in allem zeigt unser Szenario eine Möglichkeit auf, negative Umwelteinflüsse der Energieerzeugung effektiv zu verringern. Dieses Modell könnte auch für einen weltweiten Einsatz gelten. Unter anderem wurde dies

durch eine Studie des US-Amerikanischen *Department of Energy (DOE)* zur Machbarkeit dieses Konzepts in den USA bestätigt [33].

Wie schon gezeigt, wird in Zukunft die Meerwasserentsalzung im großen Stil unverzichtbar sein. Wenn sie anstelle von fossilen Brennstoffen mit Sonnenenergie betrieben wird, können ihre Auswirkungen auf die Umwelt wesentlich reduziert werden. Dennoch stellt die Meerwasserentsalzung selbst aufgrund der entstehenden Salzlauge und der erforderlichen chemischen Zusätze zum Schutz der Anlage eine beachtliche Belastung für die Umwelt dar.

Nano-Filtration des Wasserzuflusses kann den Bedarf an chemischen Zusätzen reduzieren, allerdings wird in diesem Fall mehr Energie benötigt. Aus diesem Grund haben eine erhöhte Effizienz des Wasserverbrauchs, besseres Wassermanagement und verbesserte Wasserinfrastruktur ebenfalls eine sehr hohe Priorität, um den Bedarf an Entsalzung gering zu halten. Zudem wird eine neue Generation sauberer und umweltverträglicher Meerwasserentsalzungsanlagen entstehen, die die Versorgung zukünftiger Generationen nachhaltig sichern kann [12].

7.9 Elektrizität in anderen Energiesektoren

Eine nachhaltige Lösung muss auch für die Sektoren Wärme- und Kälteerzeugung sowie den Transportsektor gefunden werden. Energieeffizienz und ein wachsender Anteil an erneuerbaren Energien sind nützliche Orientierungshilfen für diese Sektoren. Auf lange Sicht existiert die Option, einen teilweisen Wechsel von traditioneller Wärme und Brennstoffen hin zu elektrischem Strom zu vollziehen. Beispiele für einen solchen Wechsel sind elektrische Wärmepumpen oder direkte Nutzung von Elektrizität zur Raum- und Wassererwärmung sowie Elektro- oder Hybridfahrzeuge. Hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit stellt der sich aus diesem Wechsel ergebende höhere Strombedarf kein Problem dar, wenn der Strom hauptsächlich aus erneuerbaren Energien gewonnen wird. Im Stromsektor wird jede Kilowattstunde Strom aus Solar- und Windenergie zwei bis drei kWh aus Steinkohle, Erdöl, Erdgas oder Uran gewonnener Primärenergie ersetzen.⁵

Diese Relation hängt von der tatsächlichen Effizienz der konventionellen Primärenergieumwandlung ab, die zwischen etwa 20 % im Transportsektor und etwa 80 % bei der Raumheizung rangiert. Auf diese Weise wird die Nutzung erneuerbaren Stroms zu Effizienzgewinnen in allen Energiesektoren beitragen. Ein teilweiser langfristiger Wandel anderer Sek-

⁵ Wenn man von einer typischen Effizienz eines konventionellen Kraftwerks von 30-50 % ausgeht.

toren hin zu sauberer elektrischer Energie ist möglich, da das Potential erneuerbarer Energie in EU-MENA groß genug ist, um den zusätzlichen Bedarf zu decken. Neben Strom existieren direkte Lösungen mithilfe von erneuerbaren Energiequellen auch für diese Sektoren, wie z.B. die Nutzung von Bio-Brennstoffen für Transport und Wärmeerzeugung, energieeffiziente Gebäude und Solarwassererhitzer, um nur einige Beispiele zu nennen [15].

Kombinierte Wärme- und Stromerzeugung ist eine wichtige Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz fossiler Brennstoffe. Einige erneuerbare Technologien, wie Biomasse, geothermische Energie und CSP Kraftwerke nutzen ebenfalls diese Option zur kombinierten Erzeugung von Wärme und Strom – typischerweise mit Hilfe von Dampf – für industrielle Prozesse, Kühlung und Entsalzung, und werden einen wachsenden Anteil im Stromversorgungssystem der Zukunft einnehmen.

7.10 Schlussfolgerungen

Der vorliegende Bericht quantifiziert das Potential erneuerbarer Energien in Europa, dem Mittleren Osten und Nordafrika und bestätigt, dass diese in der Lage sind, eine sichere und bedarfsgerechte Stromversorgung bereitzustellen. Für einen schnellen Wechsel zu sauberer und sicherer Energie ist eine Verbindung der Elektrizitätsnetze Europas, des Mittleren Ostens und Nordafrikas (EU-MENA) von großem Vorteil. Unsere Studie bewertet das Potential und den Nutzen von Solarenergie aus den Wüsten. Das konventionelle Stromnetz ist nicht geeignet, große Strommengen über weite Entfernungen zu transportieren. Deshalb wird eine Kombination aus dem konventionellen Wechselspannungsnetz für die lokale Verteilung und HGÜ-Technologie für die Fernübertragung von Regelleistung nach Europa genutzt. Das Konzept basiert hauptsächlich auf erneuerbaren Energien mit Backup durch fossile Brennstoffe. Nachhaltige Energie wird ebenfalls für die Trinkwasserversorgung durch Meerwasserentsalzung notwendig sein.

Die Ergebnisse unserer Studien können in den folgenden Aussagen zusammengefasst werden:

1. Ein ausgewogener Mix aus verschiedenen erneuerbaren Energiequellen, gestützt durch fossile Brennstoffe, kann nachhaltige, wettbewerbsfähige und sichere Elektrizität bereitstellen. Unser Szenario für EU-MENA geht vom im Jahr 2000 existierenden 16 % Anteil erneuerbarer Energie aus und erreicht einen Anteil von 80 % im Jahr 2050. Zur Ergänzung der erneuerbaren Energiequellen wird eine effiziente Backup-Infrastruktur benötigt, die eine sichere bedarfsgerechte

te Stromkapazität mittels schnell reagierender, mit Erdgas betriebener Spitzenlastkraftwerke bereitstellt und mit Hilfe einer effizienten Netzinfrastruktur Strom erneuerbarer Herkunft nach Bedarf von den ertragreichsten Produktionsstandorten an die Hauptverbrauchszentren liefert.

2. Zur Markteinführung von Strom erneuerbarer Herkunft wird anfängliche Unterstützung in Form von langfristigen Stromabnahmeverträgen benötigt, die die Betriebskosten und einen angemessenen Gewinn aus dem investierten Kapital decken. Dies wird sich in einem geringfügigen Anstieg der nationalen Strompreise niederschlagen, aber langfristig deren Eskalation dank des wachsenden Anteils immer günstiger werdender erneuerbarer Energien abwenden.
3. Bei sofortiger Einführung kann der Wechsel zu einem nachhaltigen Energiemix innerhalb einer Zeitspanne von 15 Jahren zu einer kostengünstigeren Stromerzeugung führen, als bei Beibehaltung der gewohnten Strategie der Fall wäre. Fossile Brennstoffe mit ständig wachsenden Kosten werden sukzessive durch erneuerbare und in der Mehrzahl einheimische Energieformen ersetzt.
4. Die negativen sozioökonomischen Effekte des Anwachsens der Preise fossiler Brennstoffe seit dem Jahr 2000 können bis 2020 gestoppt werden, wenn adäquate politische und rechtliche Rahmenbedingungen für die Markteinführung erneuerbarer Energiequellen rechtzeitig etabliert werden. Langfristige Stromabnahmeverträge, die beispielsweise in den Erneuerbaren-Energie-Gesetzen in Deutschland und Spanien verordnet werden, sind effektive Instrumente für die Markteinführung von erneuerbaren Energien. Wenn anfängliche Tarifaufschläge in der Folge auf Null reduziert werden, können sie vielmehr als öffentliche Investition in eine bezahlbare und sichere Energieerzeugung betrachtet werden, und nicht als staatliche Subvention.
5. Solarenergie, die durch solarthermische Kraftwerke in MENA erzeugt und mit Hilfe von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) nach Europa transferiert wird, kann eine sichere Kapazität für Grundlast- und Spitzenlaststrom bereitstellen, und somit europäische Energiequellen wirksam ergänzen. Wird zwischen den Jahren 2020 und 2050 mit einem Transfer von 60 TWh/a begonnen, könnten Sonnenenergieimporte bis zum Jahr 2050 auf bis zu 700 TWh/a ausgebaut werden. Hohe Sonnenstrahlung in MENA und niedrige Übertragungsverluste von ca. 10 % nach Europa werden in einem

konkurrenzfähigen Preis von ca. 0,05 €/kWh⁶ für den Import von Sonnenenergie resultieren.

6. Anstelle einer Verdoppelung der Kohlendioxidemissionen bis zum Jahr 2050, die mit großer Wahrscheinlichkeit Folge der Beibehaltung des gewohnten Schemas wäre, können die CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung in EU-MENA in unserem Szenario auf 38 % der Emissionen des Jahres 2000 reduziert werden. Nur 1 % der Landfläche wird dafür benötigt, das entspricht der gegenwärtigen Landnutzung für Transport und Verkehr in Europa.
7. Wachsende Trinkwasserdefizite in MENA werden zunehmend die Entsalzung von Meerwasser erfordern, allerdings muss dies mittels erneuerbarer Energie erfolgen. Solarstrom für die Umkehrosmose und solare Kraft-Wärme-Kopplung für die thermische Meerwasserentsalzung sind die Hauptanwärter für eine solche nachhaltige Lösung.
8. Europäische Unterstützung für MENA zur Markteinführung von erneuerbaren Energien kann den Druck auf fossile Brennstoffressourcen verringern, der andernfalls aus dem wirtschaftlichen Wachstum in dieser Region entstünde. Auf diese Weise kann indirekt auch dazu beigetragen werden, fossile Brennstoffvorräte für Europa zu sichern.
9. Der notwendige politische Prozess könnte durch eine Partnerschaft für erneuerbare Energie und eine gemeinsame Handelszone in EU-MENA initiiert werden und in einer Gemeinschaft für Energie-, Wasser- und Klimasicherheit gipfeln.

Um diese Vorteile zu realisieren, müssen die Regierungen der EU-MENA-Länder jetzt die Initiative ergreifen und die rechtlichen und finanziellen Rahmenbedingungen für eine neue Investition in saubere und nachhaltige Energie schaffen. Die im Jahr 2008 durch Nicolas Sarkozy gegründete Union für das Mittelmeer (UfM) und der damit verbundene Mediterranean Solar Plan (MSP) sowie die 2009 durch die Munich-Re und die Desertec Foundation ins Leben gerufene Industrieinitiative Dii GmbH haben in Europa wie Nordafrika grosses Interesse an dem Thema „Wüstenstrom“ geweckt. Zahlreiche weitere Initiativen à la Desertec wurden inzwischen im Norden wie im Süden gestartet, um das Konzept der „Erschliessung erneuerbarer Energiequellen an ihren besten Standorten und den Transport der Energie über teils grosse Entfernungen zu den Verbrauchszentren“ zu verwirklichen. Die EU-Aussenministerin Ashton sprach vor kurzem in einem Bericht an das Europäische Parlament von einer möglichen „Energieunion“

⁶In konstantem Geldwert des Jahres 2000, Zins real 6 % auf 40 Jahre, Umrechnung in heutige Preise durch hinzufügen der Inflation.

im Rahmen einer „Partnerschaft für Demokratie und gemeinsame Entwicklung mit der Region südlich des Mittelmeers“.

Da Energie auch eine Vorbedingung für eine nachhaltige Wasserversorgung ist, ist eine kurzfristige Entscheidung der EU-MENA-Regierungen, diesen Pfad zu ebnen und geeignete Rahmenbedingungen dafür zu schaffen, von fundamentaler Bedeutung für die gesamte Region.

Literatur

- [1] F. Trieb, C. Schillings, S. Kronshage, P. Viebahn, N. May, C. Paul, U. Klann, M. Kabariti, A. Bennouna, H. Nokraschy, S. Hassan, L. Georgy Yussef, T. Hasni, N. Bassam, and H. Satoguina, “Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region. German Aerospace Center (DLR), Study for the German Ministry of Environment, Nature Conversation and Nuclear Safety,” April 2005.
- [2] F. Trieb, C. Schillings, S. Kronshage, P. Viebahn, N. May, C. Paul, U. Klann, M. Kabariti, A. Bennouna, H. Nokraschy, S. Hassan, L. Georgy Yussef, T. Hasni, N. Bassam, and H. Satoguina, “TRANS–CSP Trans–Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power. German Aerospace Center (DLR), German Ministry of Environment, Nature Conversation and Nuclear Safety.” www.dlr.de/tt/trans-csp, June 2006.
- [3] United Nations (UN), “World Population Prospects. The 2004 Revision Population Data Base, Medium Growth Scenario, Department of Economic and Social Affairs, Population Division Homepage.” <http://esa.un.org/unpp>, 2006.
- [4] F. Trieb and H. Müller–Steinhagen, “Concentrating Solar Power for Seawater Desalination in the Middle East and North Africa (submitted for review),” *Desalination*, 2007.
- [5] F. Trieb and U. Klann, “Modelling the Future Electricity Demand of Europe, Middle East and North Africa. Internal Report, DLR.” http://www.dlr.de/tt/institut/abteilungen/system/projects/all_projects/projektbeschreibung_med-csp/additional_reports/Demand-Model_20061128.pdf, 2006.
- [6] International Energy Agency (IEA), “World Energy Outlook 2006.” <http://www.worldenergyoutlook.org>, Paris, 2006.

- [7] Commission of the European Communities, “World Energy Technology Outlook 2050 (WETO-H2).” http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/weto-h2_en.pdf, 2006.
- [8] Commission of the European Communities, “GREEN PAPER. A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy. COM(2006) 105 final Brussels.” http://europa.eu.int/comm/energy/green-paper-energy/index_en.htm, 2006.
- [9] L. Mantzos and P. Capros, “European Energy and Transport Trends to 2030. Update 2005. The European Commission.” http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/figures/trends_2030/1_pref_en.pdf, Brussels, 2005.
- [10] G. Benoit and A. Comeau, “A Sustainable Future for the Mediterranean.” <http://shop.earthscan.co.uk/ProductDetails/mcs/productID/667>, Earthscan 2005.
- [11] S. Teske, A. Zervos, and O. Schäfer, “Energy (R)evolution (Greenpeace).” http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/energie/energyrevolutionreport_engl.pdf, EREC, 2007.
- [12] F. Trieb, C. Schillings, P. Viebahn, C. Paul, H. Altowaie, T. Sufian, W. Alnaser, M. Kabariti, W. Shahin, A. Bennouna, H. Nokraschy, J. Kern, G. Knies, N. El Bassam, I. Hasairi, A. Haddouche, H. Glade, and A. Aliewi, “AQUA–CSP Concentrating Solar Power for Seawater Desalination. German Aerospace Center (DLR), Study for the German Ministry of Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (ongoing).” www.dlr.de/tt/aqua-csp, Stuttgart, 2007.
- [13] S. Awerbuch and M. Berger, “Energy diversity and security in the EU. Applying portfolio theory to EU electricity planning and policy-making, IEA Report EET/2003/03.” <http://www.iea.org/textbase/papers/2003/port.pdf>, February, 2003.
- [14] European Environment Agency (EEA), “Energy Subsidies in the European Union, EEA Technical Report 1/2004.” http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2004_1/en, Copenhagen, 2004.
- [15] W. Dürschmidt, G. Zimmermann, and D. Böhme, “Renewable Energies. Innovation for the Future. German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety.” <http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/37453/36356>, Berlin, 2006.

- [16] Nuclear Decompassing Authority (NDA), “Managing the Nuclear Legacy. A Strategy for Action. Whitepaper of the UK Nuclear Decommissioning Authority.” www.nda.gov.uk, London, 2002.
- [17] Helmholtz-Gemeinschaft der Großforschungsunternehmen (HGF), “Hearing on Nuclear Fusion before the Bundestag Committee for Education, Research and Technology Assessment.” http://fire.pppl.gov/eu_bundestag_english.pdf, Berlin, 2001.
- [18] AT Kearney, “Solar Thermal Electricity 2025. Clean Electricity on Demand: Attractive STE Cost Stabilize Energy Production.” http://www.atkearney.de/content/veroeffentlichungen/whitepaper_detail.php/id/51077/practice/telekomm, ESTELA, June 2010.
- [19] MED-CSD, “Combined Solar Power and Desalination Plants (Project MED-CSD). Techno-Economic Potential in Mediterranean Partner Countries. Observatoire Méditerranéen de l’Energie.” <http://www.med-csd-ec.eu/eng>, May 2010.
- [20] G. Asplund, “Sustainable Energy Systems with HVDC Transmission, at IEEE PES 2004 General Meeting, Denver, 6-12 June 2004.” http://ewh.ieee.org/cmte/ips/2004GM/2004GM_GlobalPowerSystems.pdf, www.abb.com, 2004.
- [21] Union of the Electricity Industry, Eurelectric, “Mediterranean Interconnection. SYSTMED.” <http://public.eurelectric.org/Content/Default.asp?PageID=35>, Brussels, 2003.
- [22] F. Trieb, R. Tamme, and H. Müller–Steinhagen, *Solarthermische Kraftwerke. Regelleistung aus Sonnenenergie. ETG-Fachbericht 127. Die Dynamik des Netzes. Konsequenzen für Erzeugung, Übertragung und Verteilung im sich verändernden Umfeld.* Berlin und Offenbach: VDE Verlag, 2011. ISBN 978-3-8007-3336-1, <http://www.vde-verlag.de/proceedings-en/453336012.html>.
- [23] F. Trieb, H. Müller–Steinhagen, and J. Kern, “Financing Concentrating Solar Power in the Middle East and North Africa. Subsidy or Investment?,” *Energy Policy*, vol. 39, pp. 307–317, 2011.
- [24] L. A. Brischke, “Model of a Future Electricity Supply in Germany with Large Contributions from Renewable Energy Sources using a Single Node Grid (in German), VDI Fortschritt Berichte, Reihe 6, Energietechnik, Nr. 530, ISBN 3-18-353006-6.” <http://>

www.vdi-nachrichten.com/onlineshops/buchshop/literaturshop/lang-anzeige.asp?vr_id=7124, VDI Düsseldorf, 2005.

- [25] L. Neij et al., “Experience Curves: A Tool for Energy Policy Assessment. Lund University. European Commission.” http://www.iset.uni-kassel.de/extool/Extool_final_report.pdf, Lund, 2003.
- [26] R. Pitz–Paal, J. Dersch, and B. Milow, “European Concentrated Solar Thermal Road Mapping. ECOSTAR. SES6-CT-2003-502578. European Commission, 6th Framework Programme, German Aerospace Center.” ftp://ftp.dlr.de/ecostar/ECOSTAR_Roadmap2005.pdf, Cologne, 2005.
- [27] Greenpeace, “Concentrating Solar Power: Global Outlook 2009. Greenpeace, ESTELA and SolarPaces.” <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/concentrating-solar-power-2009>, 2009.
- [28] International Energy Agency (IEA), “Technology Roadmap Concentrating Solar Power.” www.iea.org, Paris, 2010.
- [29] A. Bennouna and H. Nokraschy, “A Sustainable Solution to the Global Problem of Water Scarcity in the Arab World, Proceedings of GCREADER Conference, Amman,” 2006.
- [30] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2001. Synthesis Report. Summary for Policy Makers.” www.ipcc.ch/pub/un/syrenng/spm.pdf, 2001.
- [31] H. Graßl et al., “World in Transition. Towards Sustainable Energy Systems, German Advisory Council on Global Change. WBGU.” http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003_engl.html, Berlin March, 2003.
- [32] N. May, “Eco-Balance of Solar Electricity Transmission from North Africa to Europe. Diploma Thesis. University of Braunschweig.” <http://www.dlr.de/tt/trans-csp>, 2005.
- [33] H. Price, “DLR TRANS–CSP Study Applied to North America, Department of Energy of the United States of America (DOE).” <http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?purl=/910505-F2lSrR>, 2007.
- [34] BMU, “The Renewable Energy Sources Act. German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU).” <http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/6465/5982>, Berlin, 2004.

- [35] F. Trieb, H. Müller–Steinhagen, J. Kern, J. Scharfe, M. Kabariti, and A. Al Taher, “Technologies for Large Scale Seawater Desalination Using Concentrated Solar Radiation (submitted for review),” *Desalination*, 2007.
- [36] World Bank, “Global Environmental Facility, Promotion of a Wind Power Market in Jordan: Project Executive Summary, GEF Council Work Programme Submission.” http://www.gefweb.org/documents/Council_Documents/GEF_C28/documents/2555JordanWindExecutive-Summary04-26-06Clean.pdf, Washington, 2006.