



# SOLARTHERMISCHE STROMERZEUGUNG

*Von Franz Trieb, Carsten Hoyer, Stefan Kronshage,  
Richard Meyer, Marion Schroedter-Homscheidt*

# Solar-

Potenziale und Märkte

# kraft-

**D**ie solare Einstrahlung ist der „Brennstoff“ der Solarenergie. Dessen Verfügbarkeit bestimmt entscheidend die Wirtschaftlichkeit eines Kraftwerkprojektes. Wann scheint wo, wie viel Sonne? Über diese Frage stolpert zwangsläufig jeder, der aus der Nutzung von solarer Einstrahlung Profit schlagen möchte.

# werke

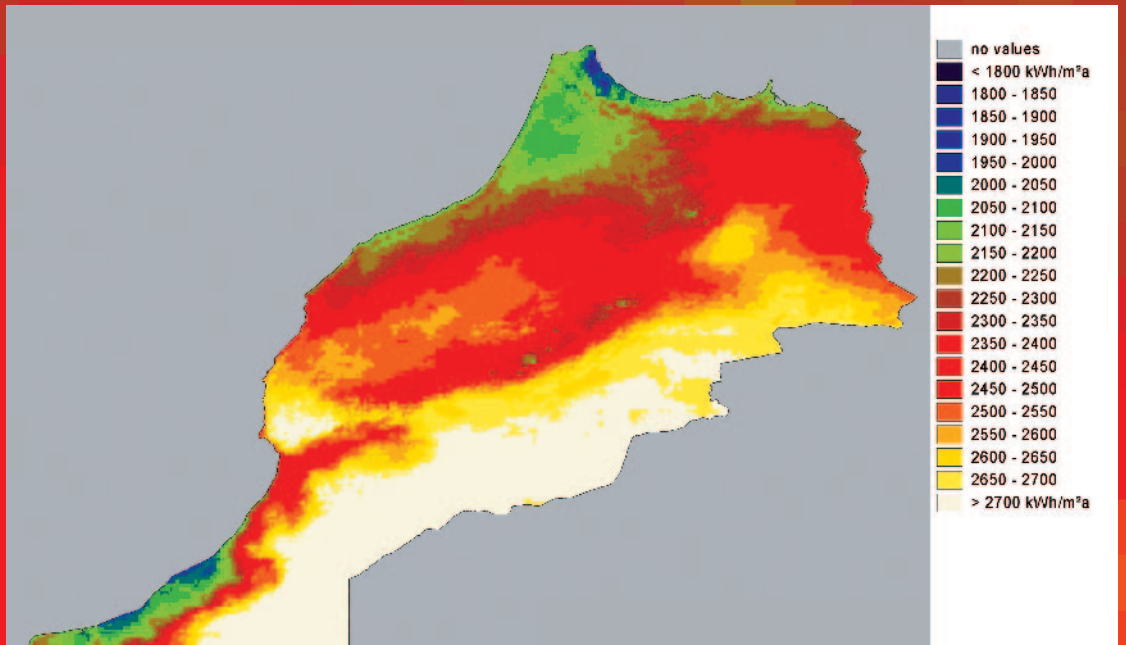
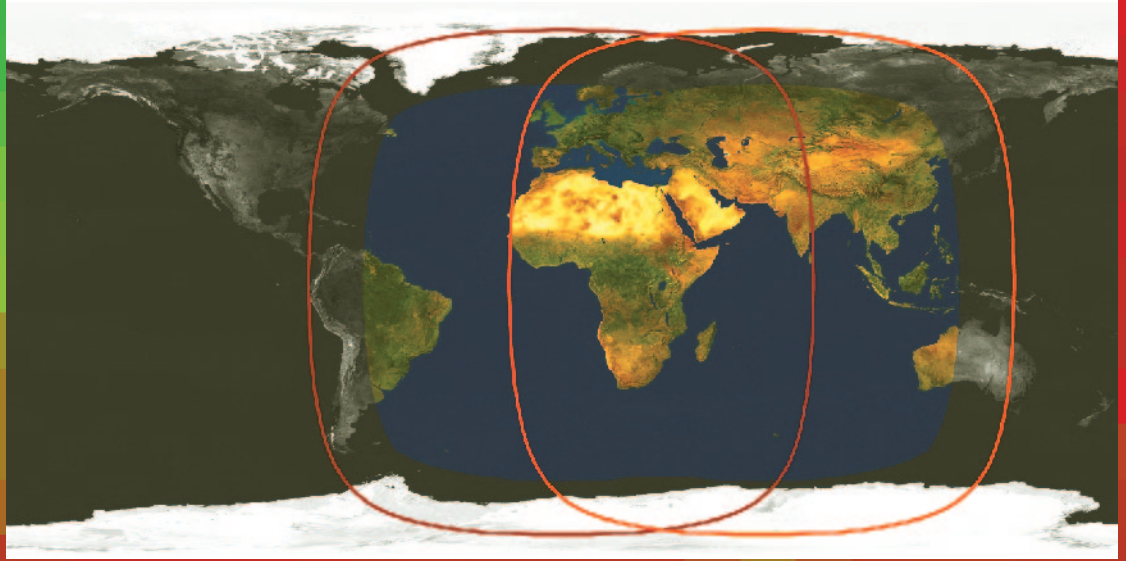


Abb. oben: Sichtbereiche von Meteosat Prime (rot, links) und Meteosat east (orange, rechts). Die farbige Fläche kann in hoher Qualität ausgewertet werden. Für Meteosat Prime werden Daten von 1983 bis 2005 und Meteosat East von 1998 bis 2008 bereit stehen.

Abb. unten: Die Karte zeigt die mittlere Jahressumme der Direktnormalstrahlung der Jahre 2000 bis 2002 für Marokko.

In der Phase der Projektplanung brauchen die Planer präzise Informationen darüber, wo wieviel Sonneneinstrahlung zu erwarten ist, um einen guten Standort zu finden, die Komponenten der Anlage optimal aufeinander abzustimmen und die wirtschaftlichen Erträge zu prognostizieren.

Im Betrieb werden aktuelle Solarstrahlungsinformationen benötigt, um den Betrieb der Anlage zu überwachen. Da die Einstrahlung nicht konstant ist, schwankt dementsprechend auch die produzierte Strom- oder Wärmemenge. Um hier Soll- und Isterträge abzugleichen, braucht der Betreiber aktuelle Informationen über seine Energiequelle.

### Abhilfe durch Satellitendaten

Satellitenfernerkundung kann hier sehr gute Dienste leisten. Die wesentlichen atmosphärischen Komponenten, die die Sonneneinstrahlung auf der Erde beeinflussen, sind Wolken, Aerosole und Wasserdampf. Alle diese Komponenten können mit meteorologischen Satelliten gemessen werden.

Die Wissenschaftler des DLR-Instituts für Physik der Atmosphäre und vom Institut für technische Thermodynamik haben ein Verfahren entwickelt, um aus Satellitendaten die solare Einstrahlung am Erdboden zu bestimmen. Die Wolken haben dabei den stärksten Einfluss. Diese werden aus den halbstündlichen Bildern des europäischen Wettersatelliten Meteosat, der etwa 36.000 Kilometer über dem Schnittpunkt des Äquators und des Nullmeridians im Golf von Guinea steht, bestimmt. Das Verfahren nutzt sowohl den sichtbaren als auch den infraroten Kanal von Meteosat. Der Infrarotkanal ermöglicht eine bessere Bestimmung der Bewölkung bei Sonnenauf- und -untergang und kann auch hohe Eiswolken erkennen. Staub und andere Aerosolpartikel reduzieren zudem die Einstrahlung durch Streuung und Absorption. In die Berechnung des Strahlungstransfers fließen deshalb auch Messungen und Modellwerte von Spurengasen (v.a. Wasserdampf) und Partikeln in der Atmosphäre ein.

### Präzise Langzeitmessungen

Ein besonderer Vorteil der Satelliten ist, dass sie diese Komponenten flächendeckend in gleicher Qualität messen und

die Daten in Archiven gespeichert werden können. So können ganze Regionen auch retrospektiv ausgewertet werden. Es sind keine Reisen in die Zielregionen notwendig und lange Zeiträume können analysiert werden, ohne dass erst lange und kostspielig vor Ort gemessen werden muss.

Strahlungsdaten, die auf Satellitendaten beruhen, haben eine bessere Aussagekraft als Bodenmessungen. Da die Einstrahlung von Jahr zu Jahr stark schwanken kann, sind lange Zeiträume notwendig, um die Auslegung und die Wirtschaftlichkeitsrechnungen auf eine solide Basis zu stellen. Bodenmessungen über mehrere Jahre stehen fast nie in der Nähe eines gewünschten Standortes zur Verfügung. Die flächendeckende Bestimmung der solaren Strahlungsressource ermöglicht die Suche eines optimalen Standortes und ist daher mit entscheidend für die Markteinführung solarer Energietechnologien. Denn Kraftwerke können so an Standorten mit möglichst niedrigen Energiegestehungskosten realisiert werden.

### Service für Endverbraucher

Am DLR wurden zur Zeit zwei Services aufgebaut: SOLEMI („Solar Energy Mining“) und ENVISOLAR („Environmental Information Services for Solar Energy Industries“). Der Schwerpunkt von SOLEMI ist die Bereitstellung von historischen Langzeitdaten (Meteosat Prime mehr als 20 Jahre, Meteosat East zehn Jahre) mit großer räumlicher Ausdehnung. ENVISOLAR wird diese Archive in die Zukunft fortführen und zeitnahe Daten bereitstellen.

Das Endprodukt ist ein leistungsfähiger Datensatz zur Analyse solarer Ressourcen, den das DLR künftig Projektplanern und der Industrie als Service zur Verfügung stellen wird. Produkte sind z.B. Karten mit Jahressummen oder stündliche Zeitreihen der Direktnormalstrahlung in Kilowattstunden pro Quadratmeter. Investoren solarthermischer Kraftwerke haben damit schon lange vor Baubeginn ein Hilfsmittel zur Hand, das ihnen aufzeigt, wie viel Strom am gewünschten Ort gewonnen werden kann.

ENVISOLAR nutzt den neuen Wettersatelliten Meteosat 8 (MSG), der seit dem 29. Januar 2004 im Einsatz ist und erweiterte Möglichkeiten bietet. Alle 15 Minuten liefert MSG im optischen und im Infrarotbereich eine neue Aufnahme mit einer räumlichen Auflösung von drei Kilometern.

Zudem verfügt er über einen zusätzlichen breitbandigen Kanal im sichtbaren Spektralbereich mit einer Kilometer Auflösung. Insgesamt misst MSG in zwölf Spektralkanälen. Zum Vergleich: Sein Vorgänger beobachtete die Erde nur in drei Kanälen mit zweieinhalb bzw. fünf Kilometer Auflösung. Unter anderem erlaubt die zweite Meteosat-Generation eine noch genauere Beschreibung von Wolken und Wasserdampf in der Atmosphäre. Dies bietet neue Möglichkeiten zur verbesserten Strahlungsbestimmung, die derzeit im EU-Projekt HELIOSAT-3 entwickelt werden.

ENVISOLAR wird derzeit im Auftrag der ESA parallel zu SOLEMI im DLR unter Führung des DFD und bei seinen Partnern Ecole des Mines (F) und Universität Oldenburg (D) aufgebaut. ENVISOLAR Services werden, ebenso wie SOLEMI, Betreibern von solarthermischen- und Photovoltaikanlagen in Zukunft wertvolle Dienste erweisen. Der Schwerpunkt liegt hier neben der Erweiterung der SOLEMI-Zeitreihen um die Meteosat-8 (MSG) basierten Informationen insbesondere auf zeitnahen Diensten, wie die bereits erwähnte Überwachung des Betriebs von Solaranlagen. Dank der aktuell empfangenen Satellitendaten kann mit hoher Genauigkeit errechnet werden, wie viel Energie die jeweilige Anlage aus dem einfallenden Sonnenlicht gewinnen müsste. Weicht der tatsächlich erreichte Wert von den erfassten ENVISOLAR-Daten ab, ist das für den Betreiber ein verlässliches Indiz, dass mit seiner Solaranlage etwas nicht in Ordnung ist. Ein weiterer Schwerpunkt des ENVISOLAR-Projekts sind zudem Strahlungsvorhersagen bis zu 48 Stunden im Voraus zur Anlagensteuerung konventioneller und solarer Kraftwerke.

### Senkung der Investitionskosten

In der Planung von Solarenergienutzung ist die verfügbare Einstrahlung nicht das einzige entscheidende Kriterium, denn die Stromgestehungskosten hängen für Solarkraftwerke auch von den notwendigen Investitionskosten ab. Der zweite Schritt ist daher die Ermittlung potenzieller Standorte und der Investitionskosten an diesen Standorten. Für diesen Zweck sind geographische Informationssysteme (GIS) geeignet, die weltweit zunehmend im Bereich der infrastrukturellen Planung und Projektentwicklung eingesetzt und mit einer ständig aktualisierten Datenbasis ausgestattet werden. Zunächst wer-

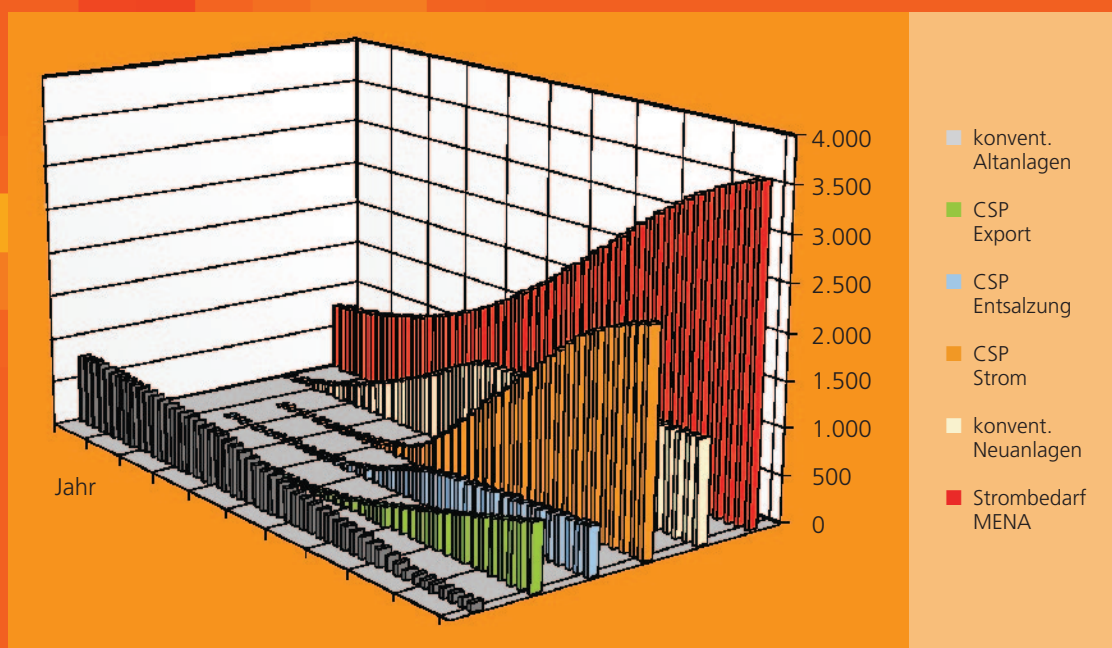
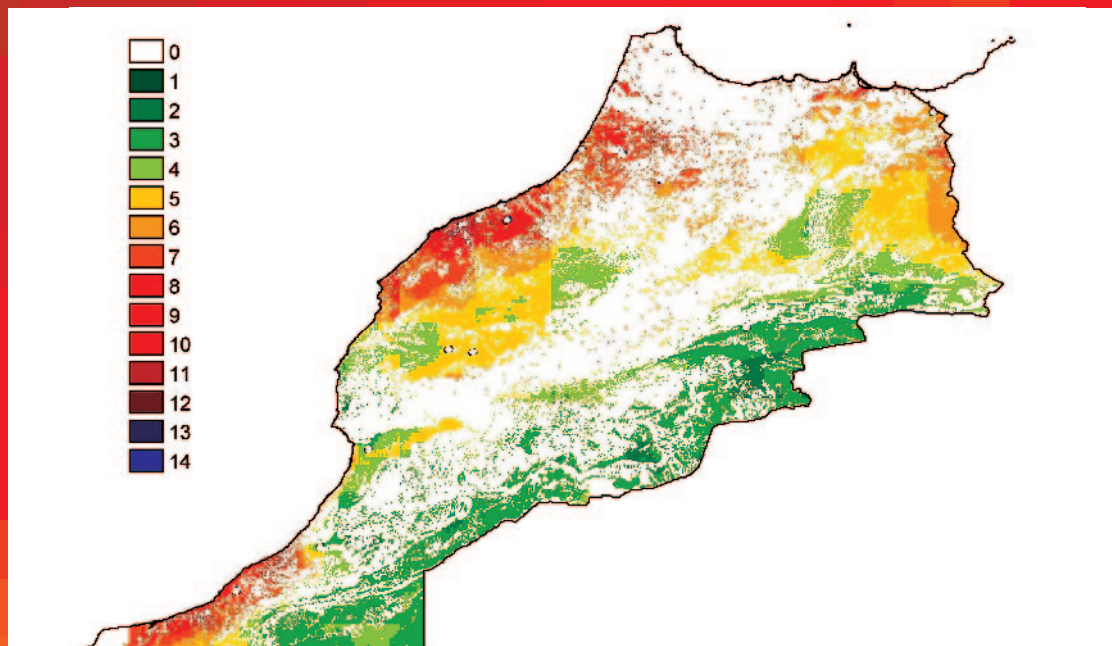


Abb. oben: Ökonomische Standortrangfolge für Solarkraftwerke mit 200 Megawatt Leistung für Marokko (0: Kein Standort, 1: Beste Standortklasse).

Abb. unten: Ausbaupotenziale für solarthermische Kraftwerke (CSP) zur Stromerzeugung, Meerwasserentsalzung und für den Solarstromexport im Mittleren Osten und Nordafrika (MENA) für ein Referenz-

szenario mit mittleren Wachstumsraten der Bevölkerung und des Pro-Kopf-Inland Einkommens. Weiter sind alte und neue konventionelle Kraftwerkskapazitäten und der Gesamtstrombedarf in MENA dargestellt. Etwa 15 Prozent der erzeugten solarthermischen Energie wird in 2050 zur Entsalzung von Meerwasser verwendet, etwa 20 Prozent werden exportiert. (Quelle: MED-CSP Studie, 2004)



Zeitraum	Phase	Installierte Leistung für Strom und Wasser	Kum. Investition MUS\$	Voraussetzungen	Kostenniveau für Strom und Wasser *
2004-2006	Einstieg mit Pilotanlagen und Technologietransfer	5 MW, 1.7 Mm <sup>3</sup> /a, 25% solar	20	Public Private Partnership, politische Unterstützung,  Zuschüsse, Soft Loans, ggf. Einspeisegesetz, langfristige Strom- und Wasserabnahmeverträge, Garantien	5.1-7.8 ct/kWh 75-90 ct/m <sup>3</sup>
2006-2010	Technologie-transfer	355 MW, 118 Mm <sup>3</sup> /a	1.300	wie oben	3.8-6.8 ct/kWh 75-90 ct/m <sup>3</sup>
2010-2015	Technologie-einführung	2.100 MW, 700 Mm <sup>3</sup> /a, 50% solar	7.400	wie oben	3-6 ct/kWh 60-90 ct/m <sup>3</sup>
2015-2020	Markter-schließung	6.600 MW, 2.200 Mm <sup>3</sup> /a, 75% solar	21.900	Public Private Partnership, langfristige Strom- und Wasser-abnahmeverträge, Garantien	3-5.2 ct/kWh 29-90 ct/m <sup>3</sup>
2020-2025	Markt-expansion	21 GW, 7 Mrd. Mm <sup>3</sup> /a, >75% solar	80.000	Public Private Partnership, langfristige Strom- und Wasser-abnahmeverträge	3-5 ct/kWh 15-75 ct/m <sup>3</sup>
2025-2050	Kommerzielle Phase	offen	offen	keine	3-5 ct/kWh 5-65 ct/m <sup>3</sup>

Die Tabelle zeigt die einzelnen Phasen der Markteinführung solarthermischer Kraftwerke, den Kapazitätsausbau und die damit verbundenen Investitionen sowie das erreichbare Kostenniveau für Strom und gegebenenfalls entsalztes Wasser aus solchen Anlagen. Spätestens 2015 wird ein Kostenniveau erreicht, das konventionellen Anlagen entspricht. Danach werden solarthermische Kraftwerke zunehmend den internationalen Kraftwerkmarkt beherrschen, da sie eine der wirtschaftlichsten und ergebnisreichsten Optionen darstellen werden.

\* Hybridbetrieb mit 8.000 Vollaststunden pro Jahr. Bandbreite zwischen einem Szenario mit weitgehend privater Finanzierung (neun Prozent Zins, 20 Jahre Kapitaldienst) und einem Szenario mit Anteilen öffentlicher Finanzierung im Rahmen einer Private Public Partnership (vier Prozent, 40 Jahre Kapitaldienst).

den dabei ungeeignete Standorte ausgeschlossen, wenn z.B. die Geländesteigung größer als 2,1 Prozent ist oder die Flächen bereits anderweitig genutzt werden: Wälder, Landwirtschaft, Siedlungsflächen, Schutzgebiete usw. Auf den geeigneten Flächen wird anschließend zusammen mit den Einstrahlungsdaten der Ertrag eines Kraftwerkes simuliert. Zusammen mit den Projektkosten (Kraftwerksbau, Anbindung an die Infrastruktur, Versicherungskosten, Kapitalkosten) können so Stromgestehungskosten an jedem potenziellen Standort abgeschätzt werden. Aus dieser Abschätzung kann dann entweder eine Rangliste potenzieller Standorte erzeugt werden, die den Planern hilft, die besten Standorte zu finden, oder es kann z.B. das wirtschaftliche Potenzial der solarthermischen Stromerzeugung in einer Region abgeschätzt werden.

Aus den Potenzialabschätzungen können in einem dritten Schritt Strategien für die Markteinführung entwickelt werden. So werden im Rahmen des vom Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderten Projekts

„Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region“ (MED-CSP) die Ressourcen- und die Bedarfspotenziale solarthermischer Kraftwerke auf der Basis von Wachstumsmodellen für die Mittelmeerländer in verschiedenen Szenarien bis 2050 ermittelt. Dabei wird der Strom-, Wasser- und der Industriesektor im Mittleren Osten und Nordafrika (MENA) und der Export von Solarstrom nach Europa untersucht. Die Studie erstellt eine Datenbasis für die Entwicklung von Markteinführungsstrategien im Rahmen der „Global Market Initiative for Concentrating Solar Power“ (GMI-CSP) und der „Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation“ (TREC) und gibt Anhaltspunkte für deren Umsetzungspotenziale.

### Blick in die Zukunft

Der Ausbau solarthermischer Kraftwerke ist bis 2025 durch die Herstellungskapazitäten der solarthermischen Kraftwerkskomponenten begrenzt, so dass der schnell wachsende Energiebedarf in MENA bis dahin noch weitgehend konventionell gedeckt werden muss. Nach 2025 werden ausreichende Produktionskapazitäten erreicht und mehr und mehr

der Bedarf zum begrenzenden Faktor. Solarthermische Kraftwerke übernehmen dann große Anteile der Versorgung. Die verfügbaren solaren Energieressourcen schränken das Potenzial im betrachteten Zeitraum nicht ein. Ein klimaverträglicher und nachhaltiger Ausbau der Energie- und Wasserversorgung im Mittelmeerraum und im Mittleren Osten stellt wegen des schnell wachsenden Bedarfs – bei moderatem Wachstum erreichen die MENA-Länder bis 2050 in etwa den heutigen Strombedarf Europas – eine große Herausforderung dar, bei der solarthermische Kraftwerke eine Schlüsselfunktion erfüllen werden.

Franz Trieb, Carsten Hoyer und Stefan Kronshage sind wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart. Richard Meyer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen. Marion Schroedter-Homscheidt ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Oberpfaffenhofen. ◀