



Globale Potentialanalysen von solaren Energieträgern zur Versorgung des weltweiten Strombedarfs.

Eine Studie zur Unterstützung der Desertec Foundation.

Jan Philip Everding

Heft 2
September 2013
ISSN: 2197-5957

Herausgeber:
Prof. Dr. Frank Schüssler
Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth
Fachbereich Bauwesen und Geoinformation
Ofener Straße 16-19, 26121 Oldenburg (Oldb.)

Vorwort zur Reihe

Die Studien zu Geoinformationen in der Wirtschaft vermitteln Resultate aus ausgewählten Bachelorarbeiten, Lehrprojekten und kleineren Forschungsprojekten, die besondere Relevanz für Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung aufweisen.

Dabei steht der Wunsch im Vordergrund, praxisorientierte Arbeiten zu publizieren, um die mit hohem zeitlichen Aufwand und großem Engagement gewonnenen Erkenntnisse nicht in Regalwinkeln oder auf Festplatten vergessen zu lassen.

Zur Qualitätssicherung trägt bei, dass alle Hefte vor Publikation einem Begutachtungsverfahren unterworfen werden. Bei Bachelorarbeiten stellt dies die Begutachtung durch Erst- und Zweitprüfer sicher, bei anderen Projekten die Herausgeberschaft oder berufene Zweitgutachter.

Die Open-Access-Philosophie wird mit der vorliegenden Reihe beherzigt: Die einzelnen Hefte können kostenlos gelesen, gedruckt, kopiert und verteilt werden. Gemäß der im Jahr 2003 unterzeichneten „BERLINER ERKLÄRUNG ÜBER DEN OFFENEN ZUGANG ZU WISSENSCHAFTLICHEM WISSEN“ stellt die einzige Einschränkung dar, dass die Urheberschaft der Autorinnen und Autoren angemessen anerkannt und zitiert wird.

Prof. Dr. Frank Schüssler

Bislang erschienene Hefte

- Heft 1 MIDDENDORF, A. (2013): Wirtschaftsförderung 2.0 – Eine Zukunftsperspektive für die „WFO Wirtschaftsförderung Osnabrück GmbH“? Eine empirische Analyse des Potentials von Social Media in der kommunalen Wirtschaftsförderung.
- Heft 2 EVERDING, J. P. (2013): Globale Potenzialanalysen von solaren Energieträgern zur Versorgung des weltweiten Strombedarfs. Eine Studie zur Unterstützung der DESERTEC Foundation.

Vorwort zum Heft

Akteure aus Öffentlichkeit und Politik werden durch die DESERTEC-Vision des „Stroms aus der Wüste“ sowohl fasziniert als auch beunruhigt. Ist es technisch und politisch realisierbar, günstigen Strom in ariden Gebieten der Erde zu gewinnen? Lässt sich der Strom nicht nur lokal konsumieren, sondern bei einer Überschussproduktion auch aus der Sahara nach Deutschland leiten? Machen wir uns von einer neuen Staatengruppe abhängig oder diversifizieren wir unsere Energieversorgung? Wer ist Befürworter, wer ist Gegner des Projekts? Seit 2009 arbeiten DESERTEC Foundation in Hamburg und DII in München an diesen und weiteren Fragestellungen.

An der Jade Hochschule wird das Thema seit 2010 im Rahmen der Lehrveranstaltung „Geographische Energieforschung“ im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen Geoinformation behandelt. Darüber hinaus besteht eine mehrjährige Zusammenarbeit mit der DESERTEC-Foundation in Hamburg. Im Jahr 2012 legte ANNEKE SCHIPPL in Kooperation mit der DESERTEC Foundation die erste Bachelorarbeit zum Thema vor: „GIS-basierte Potentialanalyse für solarthermische Kraftwerke. Entscheidungsunterstützung zur Implementierung des DESERTEC-Konzepts im subsaharischen Afrika“. JAN PHILIP EVERDING war während der Ergebnispräsentation in Hamburg anwesend entschloss sich ebenfalls dazu, seine Abschlussarbeit in diesem Kontext zu verfassen.

JAN PHILIP EVERDING beschäftigt sich im vorliegenden Heft mit der Erstellung von globalen Potentialanalysen von solaren Energieträgern. Dabei integriert er öffentlich zugängliche Datensätze (NASA, ESA, USGS etc.) in ein Geographisches Informationssystem und analysiert sowohl die Solarstrahlung, als auch Ausschlusskriterien wie Landnutzung, Topographie und Elektrizitätsbedarf. Auf herausragende Art und Weise integriert er somit die beiden Bereiche Geoinformation und Wirtschaft, die seinen Studiengang und diese Schriftenreihe prägen.

Prof. Dr. Frank Schüssler

Jade Hochschule Oldenburg
Ofener Straße 16/19
26121 Oldenburg
Fachbereich: Bauwesen und Geoinformation
Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen
Geoinformation
1. Prüfer: Prof. Dr. Frank Schüssler
2. Prüfer: Michael Straub



**Globale Potenzialanalysen von solaren Energieträgern
zur Versorgung des weltweiten Strombedarfs**

Eine Studie zur Unterstützung der DESERTEC Foundation

Bachelorarbeit

vorgelegt am 30.01.2013

Jan Philip Everding
Matrikelnummer: 5023506
Ravensburger Weg 15
33428 Harsewinkel
E-Mail: j.p.everding@googlemail.com

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen	3
Tabellen	3
1 Einleitung	4
1.1 Aufgabenstellung und Ziele	5
1.2 Vorgehensweise	6
2 DESERTEC	7
2.1 DESERTEC Foundation	7
2.2 Konzept	7
2.3 Dii GmbH	8
3 Regenerative Energiequellen	8
3.1 Nutzung der direkten Sonnenenergie	10
3.1.1 Solarstrahlung	10
3.1.1 Photovoltaik	10
3.1.1.1 Inselanlagen	11
3.1.1.2 Netzgekoppelte Anlagen	12
3.1.2 Solarthermische Kraftwerke	13
3.1.2.1 Parabolrinnenkraftwerke	15
3.1.2.2 Fresnelkraftwerke	15
3.1.2.3 Solarturmkraftwerke	16
3.1.2.3 Dish-Sterling-Anlagen	17
3.2 Weitere regenerative Energiequellen	17
4 Flächenpotenziale	21
4.1 Geographische Informationssysteme	21
4.2 Datengrundlage	21
4.2.1 NASA SEE 6.0	21
4.2.2 Global Land Cover 2000	22
4.2.3 Digitales Geländemodell SRTM	23
4.2.4 World Database of Protected Areas	24
4.2.5 Global Soil Maps	25
4.3 Ausschlusskriterien	26
4.4 Ermittelte Flächen	27
5 Berechnung des potenziellen Energieertrages	31
5.1 Photovoltaik	31
5.2 Solarthermische Kraftwerke	32
6 Weltweite Möglichkeiten einer nachhaltigen solaren Elektrizitätsversorgung	34
6.1 Klassifizierung von zehn Weltregionen	34
6.2 Potenzielle Erträge von Solarenergie in verschiedenen Weltregionen	35
6.3 Der globale Stromverbrauch 2009 und Elektrizitätsbedarf 2050	36
6.4 Elektrizitätsbedarf und potenzielle Erträge im Vergleich	37
7 Fazit	39
7.1 Ausblick	39
7.2 Handlungsvorschläge	41
Literatur	43

Abbildungen

Abb. 1: Jährliches Energieangebot und weltweiter Primärenergiebedarf.....	9
Abb. 2: Nutzung regenerativer Energien	9
Abb. 3: Solarstrahlung.....	10
Abb. 4: Aufbau eines solaren Inselsystems.....	12
Abb. 5: Die Konzentration von solarer Strahlung	13
Abb. 6: Prinzip eines thermischen Speichers.....	14
Abb. 7: Parabolrinnenkraftwerk.....	15
Abb. 8: Fresnelkraftwerk.....	16
Abb. 9: Solarturmkraftwerk	16
Abb. 10: Dish-Sterling-Anlage.....	17
Abb. 11: Windenergiepotenzial Onshore.....	18
Abb. 12: Theoretisch nutzbare Flächen zur Stromerzeugung aus Biomasse.....	18
Abb. 13: Weltweit bestehende und geplante Geothermie-Projekte.....	19
Abb. 14: Stromerzeugung durch Wasserkraft.....	19
Abb. 15: Potenzielle und reale Standorte regenerativer Energien zur Stromerzeugung	20
Abb. 16: Weltweite Direkt- und Globalstrahlung.....	22
Abb. 17: Global Land Cover 2000.....	23
Abb. 18: SRTM 90m Digital Elevation Data.....	24
Abb. 19 "Shifting Sand" in unterschiedlichen Datensätzen	25
Abb. 20: Potenzialflächen solarthermischer Kraftwerke	29
Abb. 21: Potenzialflächen von Solarturmkraftwerken	29
Abb. 22: Globales Photovoltaikpotenzial.....	30
Abb. 23: Weltregionen	34
Abb. 24: Energiepotenzial und Elektrizitätsbedarf nach verschiedenen Weltregionen	38
Abb. 25: Wachstum des CSP-Marktes nach vier Szenarien.....	40

Tabellen

Tab. 1: Ausschlusskriterien für die Potenzialberechnung	26
Tab. 2: Globales Flächenpotenzial solarer Kraftwerke.....	30
Tab. 3: Globales Energiepotenzial von Photovoltaikanlagen.....	32
Tab. 4: Globales Energiepotenzial von solarthermischen Kraftwerken.....	33
Tab. 5: Potenzielle Erträge aus Solarenergie nach Weltregionen.....	35
Tab. 6: Stromverbrauch in 2009 und Elektrizitätsbedarf 2050	36
Tab. 7: Potenzielle Erträge und Elektrizitätsbedarf im Vergleich	38

1 Einleitung

In den letzten zwei Jahrzehnten wurde ein grundlegender Umbau unserer Energiewirtschaft eingeleitet. Die deutsche Energiewende, mit den primären Zielen Atomausstieg und Dekarbonisierung, könnte dabei zum Vorbild internationaler Energiepolitik werden. Dass auch andere Staaten mit einer Energiewende beginnen, ist nicht nur mit Blick auf die Endlichkeit fossiler Ressourcen und die ungelösten Probleme der Kernenergie von Nöten. Vielmehr haben die Auswirkungen unseres Energiehungers mittlerweile ein globales Ausmaß erreicht und sind Hauptauslöser des weltweiten Klimawandels. Besonders die schnell steigende Weltbevölkerung, der zunehmende Wohlstand und der damit verbundene Energieverbrauch haben zu einem sprunghaften Anstieg des Energiebedarfs und nach wissenschaftlicher Ansicht zur Klimaerwärmung beigetragen und unterstreichen damit die Dringlichkeit einer globalen Energiewende (QUASCHNING 2011: 13).

Sowohl Politiker als auch Wissenschaftler vertreten die Ansicht, dass dieser Wandel hin zu erneuerbaren Energien eine zentrale Aufgabe unserer Zukunft sein wird:

„Der Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung ist eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts.“ Prof. Eicke Weber, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE (FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT 2011: o.S.)

"Instead of subsidizing yesterday's energy sources, we need to invest in tomorrow's." Barack Obama, US-Präsident (THE WHITE HOUSE 2011: o.S.)

„Die erneuerbaren Energien sind die tragende Säule für unsere Energieversorgung der Zukunft. Ihr Ausbau ist das zentrale Ziel des Energiekonzeptes der Bundesregierung.“ Klaus-Dieter Scheurle, Staatssekretär im Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS 2012: o.S.)

Allein nationale Umstellungen reichen also nicht mehr aus, um die Probleme zu lösen. Denn der Ort, wo CO₂-Emissionen entstehen oder vermieden werden, ist für die Atmosphäre und den Klimaschutz unerheblich – ausschlaggebend ist letztlich die Gesamtgeschwindigkeit der globalen CO₂-Reduktion (DESERTEC FOUNDATION 2012c: o.S.). Eine umfassende und dauerhafte Lösung für Klimapolitik, Versorgungssicherheit und einen gerechten Zugang zu Energie ist notwendig und kann nur in globalem Maßstab geschaffen werden.

Der passende Ort, um diese Probleme zu regeln und strengere Richtlinien einzuführen, sollte eigentlich die Weltklimakonferenz sein. Doch in Kopenhagen 2009 oder auch in Doha Ende 2012 wurde deutlich, dass umfassende Gesetze nur schwer zu erzielen sind. Vor allem die großen Klimasünder verfolgen zurzeit noch ihre individuellen Interessen und blockieren dadurch einen schnellen und günstigen Ausstieg aus fossilen und nuklearen Energieträgern (SÜDDEUTSCHE ZEITUNG 2012: o.S.). Kurzfristig könnte deshalb ein „Club der Energiewendestaaten“ – wie ihn Bundesumweltminister Peter Altmaier kürzlich vorgeschlagen hat – sinnvoll sein, um auch andere Regierungen schnell zu einem Umdenken zu bewegen (TAGESSCHAU 2013: o.S.).

Von privater Seite her haben ganzheitliche Visionen, wie das DESERTEC Konzept, große Chancen Treibhausgasemissionen massiv zu verringern, eine nachhaltige Energieversorgung umzusetzen und den Klimawandel abzubremesen. Denn schließlich haben Investitionen in die weltweit ergiebigsten Standorte den größten Nutzen für den Klimaschutz.

Welches Potenzial dabei in der Solarenergie steckt, hat Thomas Edison, der Erfinder der Glühbirne, bereits 1931 gesehen:

“I’d put my money on the sun and solar energy. What a source of power! I hope we don’t have to wait until oil and coal run out before we tackle that.” (ROGERS 2007: o.S.)

Tatsächlich haben solare Energieträger, allen voran die Photovoltaik, in den letzten Jahren ein rasantes Wachstum erlebt. Allein 2011 wuchs der Photovoltaikmarkt um die installierte Leistung von rund 27 GW, dies entspricht einem Anstieg von etwa 40 Prozent (NPD SOLARBUZZ 2012: o.S.). Nun stellt sich die Frage, welchen Beitrag solare Energieträger zum Energiemix der Zukunft leisten können und schließlich beitragen werden. Denn oft wird das Potenzial solarer Energieträger skeptisch beurteilt. Inwieweit sie tatsächlich entscheidend zur Sättigung des weltweit wachsenden Energiebedarfs beitragen können und welche physikalischen, technischen, ökologischen und infrastrukturellen Grenzen den Energieträgern gesetzt sind (KOHL 2008: 5), soll in der folgenden Arbeit dargelegt werden.

1.1 Aufgabenstellung und Ziele

Wegweisend war in diesem Zusammenhang die MED-CSP Studie des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR), welche unter anderem gezeigt hat, dass allein das technische Potenzial von solarthermischen Kraftwerken in Europa, dem Nahen Osten und Nordafrika (EU-MENA Region) den dortigen aktuellen Strombedarf um ein Vielfaches übersteigt. Allerdings ist diese Studie nun acht Jahre alt und hat in ihrer Potenzialberechnung nur Parabolrinnenkraftwerke einbezogen. Neue Technologien – wie Solarturmkraftwerke – genügen jedoch anderen Standortanforderungen und können somit möglicherweise neue Potenzialflächen erschließen. Inwieweit dies zutrifft, wird unter anderem in der nachfolgenden Studie untersucht.

Zur Berechnung der Potenzialflächen eignen sich geographische Informationssysteme hervorragend. So lassen sich unter anderem durch Strahlungs-, Boden- und Höhendaten sowie weiteren Ausschlusskriterien potenzielle Photovoltaikflächen errechnen. Generell war die Energiegeographie, welche Wechselwirkungen zwischen Ressourcen, Raum und Politik untersucht, bis vor wenigen Jahren noch ein relativ vernachlässigtes Forschungsfeld im Bereich der Geographie (BRÜCHER 2009: 31). Initiativen, wie die Gründung des Arbeitskreises Geographische Energieforschung, bringen diesem Thema nun eine stärkere Gewichtung bei. Deren Ansätze und Studien können vor allem zu einer effizienteren Nutzung der begrenzten Flächenverfügbarkeit führen. Diese Arbeit ist also auch ein Beitrag, um die Bedeutung der Energiegeographie und die Möglichkeiten energiegeographischer Analysen hervorzuheben.

Neben dem globalen Potenzialertrag solarthermischer Kraftwerke soll dementsprechend auch der der Photovoltaik berechnet werden. Beide Erträge werden schließlich mit dem

zukünftigen Strombedarf einer wachsenden Weltbevölkerung in Verbindung gebracht. Durch die Aufteilung der Potenziale und des Bedarfs nach Weltregionen, können schlussendlich Aussagen zur Leistungsfähigkeit der solaren Technologien in bestimmten Gegenden der Erde getroffen werden.

1.2 Vorgehensweise

Um die Leistungsfähigkeit beurteilen zu können, soll zunächst auf das DESERTEC Konzept eingegangen werden. Außerdem wird die Solarstrahlung – die als Grundlage der Potenzialberechnung gilt – näher erläutert und es wird auf die verschiedenen solaren Energieträger eingegangen. Deren Wirkungsgrade und Landnutzungsfaktoren sind entscheidende Parameter zur Berechnung des jeweiligen potentiellen Ertrags. Darauf folgend werden unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien Flächen- und Ertragspotenziale bestimmt. Zuletzt werden die Ergebnisse mit dem Stromverbrauch 2009 und dem Elektrizitätsbedarf 2050 verglichen. Der Stromverbrauch aus dem Jahr 2009 wird hinzugezogen, weil es der zurzeit aktuellste, weltweit verfügbare Datensatz ist. Der Elektrizitätsbedarf im Jahr 2050 verdeutlicht hingegen, wie sich der Stromverbrauch langfristig entwickeln wird.

Es ist jedoch zu verdeutlichen, dass diese Analyse nach groben Restriktionen durchgeführt wurde und durch die Genauigkeiten der frei verfügbaren Datensätze in ihrer Aussagekraft beschränkt ist. Auf globaler Ebene ist die Genauigkeit für Schlussfolgerungen bei Weitem ausreichend, für konkrete Standortplanungen oder lokale Potenzialanalysen müssten die Restriktionen jedoch weiter verfeinert werden.

2 DESERTEC

2.1 DESERTEC Foundation

Die DESERTEC Foundation ist eine gemeinnützige Organisation, die von der Deutschen Gesellschaft CLUB OF ROME e.V., Mitgliedern des TREC-Netzwerkes und Privatpersonen im Jahr 2009 gegründet wurde. Mit Sitz in Hamburg und Heidelberg hat die Stiftung das Ziel, das DESERTEC Konzept weltweit zu vermitteln, zu fördern und umzusetzen. Für dieses Ziel arbeiten ca. 30 Mitarbeiter, regionale Netzwerkkoordinatoren, sowie zahlreiche internationale ehrenamtliche Unterstützer in der Öffentlichkeitsarbeit und der Politikberatung (DESERTEC FOUNDATION 2012b: o.S.).

2.2 Konzept

Das DESERTEC Konzept beschreibt „eine globale Vision zur langfristigen Sicherung der menschlichen Lebensbedingungen [auf der Erde]“ (GROPP u. KNIES 2011: 18). Im Fokus steht dabei die Nutzung der Sonnenenergie aus den Wüsten der Erde, um den Energiebedarf einer wachsenden Weltbevölkerung zu decken. Wüsten sind deshalb von Vorteil, da die Sonne dort ganzjährig zuverlässig und mit hoher Intensität scheint. Zudem steht die Errichtung von solarthermischen Kraftwerken dort nicht in Konkurrenz mit landwirtschaftlichen Nutzflächen und somit der Versorgungssicherheit (GROPP u. KNIES 2011: 17). Die Nutzung der Sonnenenergie soll nach der DESERTEC Vision zwar den Kern der Energieversorgung bilden, sie schließt allerdings nicht die Nutzung von anderen regenerativen Energieträgern aus. Vielmehr soll eine Kombination von verschiedenen Energieträgern an den energiereichsten Standorten genutzt werden. So beinhaltet das Konzept, „Solarthermie in Wüstenregionen, Windkraft in Küstenregionen, Wasserkraft in Bergen, Photovoltaik in sonnigen Regionen, sowie Biomasse und Geothermie je nach geografischen Gegebenheiten“ (DESERTEC FOUNDATION 2012a: o.S.) einzusetzen. Diese verschiedenen Technologien sollen schließlich in einem transnationalen Netz, einem sogenannten Supergrid, verknüpft werden und so eine Verbindung zwischen Produktions- und Konsumzentren schaffen.

Neben den konkreten Vorstellungen zur nachhaltigen Energieversorgung beinhaltet das DESERTEC Konzept noch andere Lösungsansätze zu verschiedenen Problemen der Gegenwart. So soll die Abkehr von fossilen Energieträgern wie Öl, Gas oder Kohle zu einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen führen und dadurch zum einen den Klimawandel verlangsamen und zum anderen Konflikte um rohstoffreiche Gebiete beenden. Ebenfalls gilt die sichere Versorgung der Bevölkerung in ariden Regionen durch Trinkwasser aus Meerwasserentsalzungsanlagen als wichtiger Bestandteil des Konzeptes. Und schließlich sollen durch Bildung, Ausbildung und Investitionen in erneuerbare Energien positive Effekte im Hinblick auf Armutsbekämpfung und Entwicklungsgerechtigkeit generiert werden (GROPP u. KNIES 2011: 19). Das DESERTEC Konzept ist somit als ganzheitlicher Ansatz zu verstehen.

2.3 Dii GmbH

Ein wesentlicher Meilenstein der DESERTEC Foundation zur Umsetzung des Konzeptes war die Gründung der Dii GmbH, gemeinsam mit Partnern aus der Industrie- und Finanzwelt. Insgesamt haben 13 Unterzeichner die Dii GmbH im Jahr 2009 in München gegründet. Heute besteht die Gesellschaft aus 55 Unternehmen und Einrichtungen, die im Laufe der Jahre der Dii als Gesellschafter oder assoziierte Partner beigetreten sind. Dazu zählen Unternehmen wie Deutsche Bank, Munich RE, RWE, E.ON, Shell, SMA, GL Garrad Hassan, Fraunhofer oder TÜV Süd (DII GMBH 2012: o.S.). Entgegen der in der Öffentlichkeit oftmals wahrgenommenen Darstellung ist weder die DESERTEC Foundation noch die Dii GmbH direkt am Bau von Kraftwerken beteiligt. Stattdessen arbeitet die Foundation – wie bereits erwähnt – hauptsächlich in der Öffentlichkeitsarbeit und Politikberatung, während die Industrieinitiative daran interessiert ist, Rahmenbedingungen für den Bau von Kraftwerken, Photovoltaikanlagen und Windparks in der EU-MENA Region zu schaffen. Außerdem erarbeitet sie Strategien zur Verbindung dieser Region und feilt an entsprechenden Investitionsempfehlungen.

3 Regenerative Energiequellen

Regenerative, alternative oder erneuerbare Energien bezeichnen Energiequellen, „die unter menschlichen Zeithorizonten unerschöpflich sind“ (QUASCHNING 2011: 34). Jedoch ist der Ausdruck „erneuerbar“ nach den physikalischen Gesetzen der Thermodynamik nicht richtig, da Energie weder aus dem Nichts erzeugt noch vernichtet werden kann. Sie kann lediglich von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden (WINDISCH 2008: 32). Doch trotzdem hat sich der Begriff aus Mangel an prägnanten Alternativen in den allgemeinen Sprachgebrauch eingebürgert.

Grundsätzlich lassen sich die erneuerbaren Energien in Sonnenenergie, Planetenenergie und geothermische Energie unterscheiden, wobei die Sonnenenergie das mit Abstand größte Potenzial aufweist. So erreicht die Oberfläche der Erde pro Jahr eine Energiemenge der Sonne, „die 8000-mal größer ist als der gesamte Primärenergiebedarf der Erde“ (QUASCHNING 2010: 93). Alle regenerativen Energiequellen zusammen übersteigen die auf der Erde verfügbaren fossilen und nuklearen Energiereserven ebenfalls bei Weitem (Abb. 1).

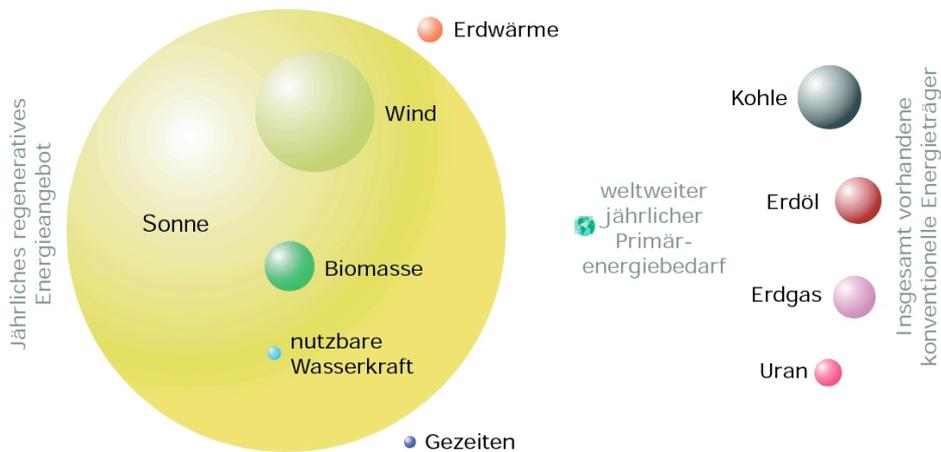


Abb. 1: Vergleich des jährlichen Energieangebots und des weltweiten Primärenergiebedarfs mit den insgesamt auf der Erde vorhandenen konventionellen Energieträgern (QUASCHNING 2011: 36)

Innerhalb der Sonnenenergie wird wiederum zwischen direkter und indirekter Nutzung unterschieden. Letztere bezieht sich auf die mechanische Energie von Wind und Wasser sowie auf die chemische Energie der Biomasse (WESSLAK u. SCHABBACH 2009: 53). Diese Energieformen entstehen durch natürliche Energieumwandlungen und können durch eine Vielzahl von Technologien in Elektrizität, Wärme oder Brennstoff umgewandelt werden (Abb.2).

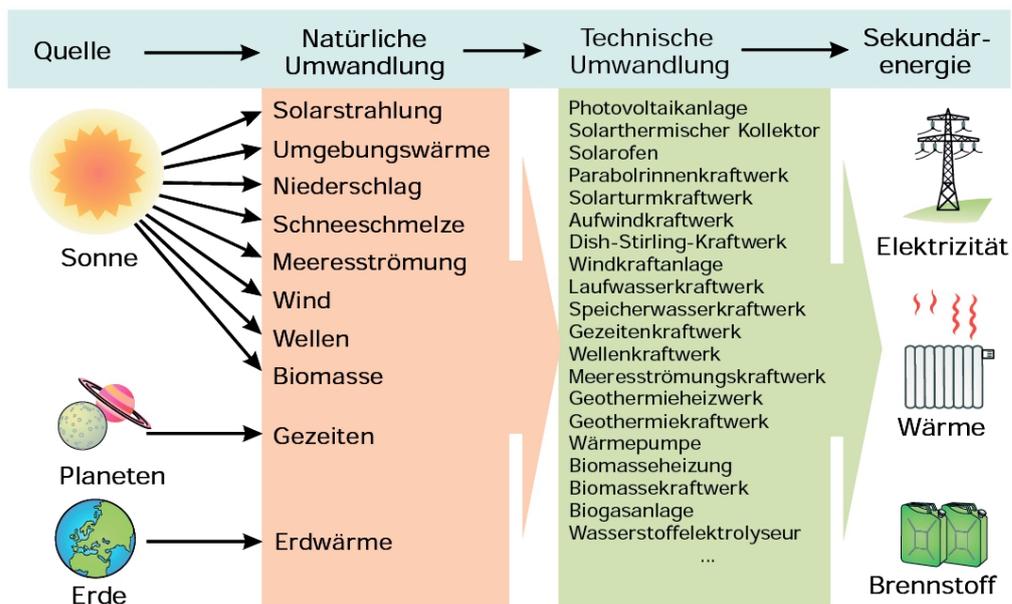


Abb. 2: Quellen und Möglichkeiten zur Nutzung regenerativer Energien (QUASCHNING 2011: 34)

Unter den Begriff der direkten Nutzung fallen hingegen Technologien, die das Strahlungsangebot der Sonne direkt umwandeln. Diese werden nun näher erläutert.

3.1 Nutzung der direkten Sonnenenergie

3.1.1 Solarstrahlung

Um solare Energiesysteme bestmöglich zu planen, ist eine Kenntnis der Solarstrahlung von entscheidender Bedeutung. Die Sonne besteht aus extrem heißem Gas und ist der zentrale Himmelskörper unseres Sonnensystems. Die elektromagnetische Strahlungsleistung wird dabei hauptsächlich durch Fusionsprozesse im Kern der Sonne generiert (WESSLAK u. SCHABBACH 2009: 56) und gelangt durch Photonen verschiedener Wellenlängen auf die Erde. Treffen diese Photonen auf die Erdatmosphäre, kommt es zu diversen Prozessen, wie Absorptions- und Reflexionsprozessen. Diese Vorgänge bewirken, dass das prinzipiell direkte Sonnenlicht aus dem Weltraum in einen direkten und einen diffusen Anteil separiert wird (Abb. 3).

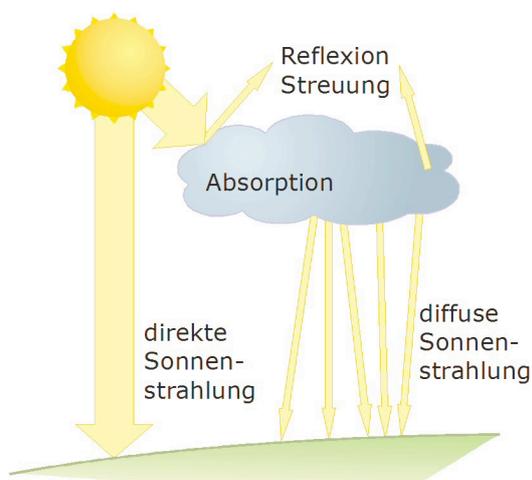


Abb. 3: Solarstrahlung (QUASCHNING 2011: 61)

Die Summe der direkten und diffusen Strahlung wird gemeinhin auch als Globalstrahlung bezeichnet. Je nach Technologie kann entweder nur die direkte Sonnenstrahlung ("Direct Normal Irradiance" = DNI) oder aber die gesamte Globalstrahlung ("Global Horizontal Irradiance" = GHI) zur Umwandlung der Energie genutzt werden.

3.1.1 Photovoltaik

Die erste Möglichkeit der direkten Nutzung von solarer Strahlungsenergie ist die Photovoltaik. Der Name Photovoltaik leitet sich zum einen aus dem griechischen Wort *phōs*, *photós* ab, was Licht bedeutet, zum anderen von dem italienischen Physiker Graf Volta, nach dem die Einheit der elektrischen Spannung benannt wurde (KONRAD 2008: 3). Somit wird unter Photovoltaik die direkte Umwandlung des Sonnenlichts in Elektrizität verstanden.

Nach der Entdeckung des Photoeffekts durch den Franzosen Becquerel im Jahre 1839, dauerte es über 100 Jahre bis die erste Siliziumzelle entwickelt wurde, auf deren Basis die kommerzielle Weiterentwicklung der Photovoltaik begann (QUASCHNING 2011: 164). Doch erst durch diverse Förderprogramme, wie das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), erlebt die Photovoltaik seit 2003 einen gewaltigen Aufschwung. So wuchs die installierte Leistung in den letzten Jahren relativ konstant um etwa 40 Prozent jährlich und im Vergleich

von 2010 zu 2011 sogar um fast 75 Prozent auf ca. 69 Gigawatt (GW) (EPIA 2011: 45). Der Markt wird zurzeit noch durch die bereits angesprochenen Siliziumsolarmodule dominiert, mit einem Marktanteil von ca. 80 Prozent. Die restlichen 20 Prozent entfallen auf Dünnschichtsolarzellen (IPCC 2011: 351). Im Vergleich zu Siliziumzellen haben Dünnschichtmodule zwar einen geringeren Wirkungsgrad, sie benötigen jedoch wesentlich weniger Material und werden durch zu erwartende Weiterentwicklungen in Zukunft zusätzliche Marktanteile gewinnen (WESSLAK u. SCHABBACH 2009: 123).

Die Leistung von Solarzellen und -modulen wird grundsätzlich in der Einheit Wp (Watt-peak, Spitzenleistung) angegeben. Dies hängt damit zusammen, dass aus Gründen der Vergleichbarkeit einheitliche Standardtests unter optimalen Bedingungen eingeführt wurden. Unter natürlichen Bedingungen wird diese Leistung allerdings nur selten erreicht (QUASCHNING 2011: 190). Auf die genauen Wirkungsgrade von Photovoltaikmodulen wird in Kapitel 5.1 näher eingegangen.

Generell ist zu erwarten, dass Photovoltaik in den nächsten fünf bis zehn Jahren in vielen Teilen der Erde Strom konkurrenzfähig produzieren und das Preisniveau von fossilen Energieträgern bis 2030 erreichen wird (TESKE 2012: 63). Das große Potenzial zur Kostenreduzierung ist ein großer Vorteil der Photovoltaik. Ein weiterer liegt in der Flexibilität der Nutzung, auf die nun näher eingegangen wird.

3.1.1.1 Inselanlagen

Photovoltaikanlagen können sowohl als Inselanlagen, als auch als netzgekoppelte Anlagen geplant werden. Sie werden deshalb auch als *off-grid* und *grid-connected* Photovoltaik Systeme bezeichnet. Kleinstanwendungen im Bereich der Inselanlagen gibt es bereits seit einigen Jahrzehnten. So arbeiten Solarzellen zum Beispiel in Taschenrechnern, Armbanduhr, Parkscheinautomaten oder an Straßenlaternen, da ein PV-System hier zumeist kostengünstiger ist als Wegwerfbatterien oder das Verlegen eines Netzkabels (QUASCHNING 2010:113). Das größte Potenzial für solare Inselsysteme liegt jedoch in der Versorgung von netzfernen Gebieten, da noch immer weltweit rund 1,4 Milliarden Menschen keinen Zugang zu Elektrizität haben (IPCC 2012: 338). Der Vorteil gegenüber häufig verwendeten Dieselgeneratoren liegt neben der Umweltverträglichkeit in der Versorgungssicherheit und den geringeren Kosten. Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, muss sich die Planung der Gesamtfläche und die Ausrichtung der Module an dem Monat mit dem geringsten Strahlungsangebot orientieren (WESSLAK u. SCHABBACH 2009: 168). Die Energie wird dann in einer Batterie gespeichert und sichert so nachts oder bei Schlechtwetterperioden die Versorgung. Neben der Batterie wird ebenfalls ein Laderegler benötigt, welcher eine Überwachungsfunktion hinsichtlich Überladung und Tiefenentladung übernimmt (Abb. 4).

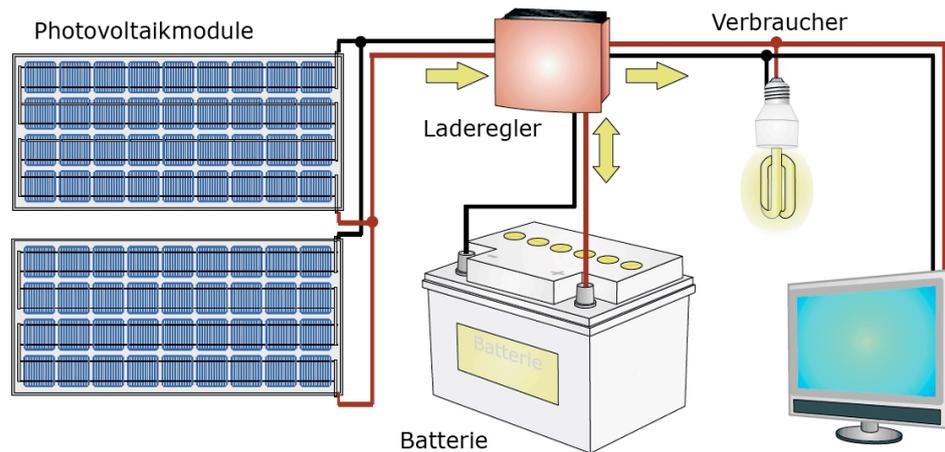


Abb. 4: Aufbau eines solaren Inselstromsystems (Quaschnig 2010: 114)

Im Gegensatz zu netzgekoppelten Anlagen kann bei Inselanlagen der Wechselrichter entfallen, da sie meist als Gleichstromnetze aufgebaut sind. Dennoch übersteigen die relativ hohen Investitionskosten eines solaren Inselstromsystems das Kapital von potenziellen Verbrauchern in Entwicklungsländern um ein Vielfaches. Förderprogramme der Weltbank, wie Lighting Africa, sollen allerdings in Zukunft noch stärker dafür sorgen, dass diese Menschen beim Zugang zu Elektrizität besser unterstützt werden (THE WORLD BANK 2012: o.S.).

3.1.1.2 Netzgekoppelte Anlagen

Ein Wechselrichter wird bei netzgekoppelten Anlagen dazu benötigt, den Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln und dann in das öffentliche Netz einzuspeisen. Damit nur wenig Energie verloren geht, ist bei Wechselrichtern auf einen hohen Wirkungsgrad zu achten. Dieser liegt bei modernen Geräten bei bis zu 98 Prozent (QUASCHNING 2011: 12). Prinzipiell lassen sich netzgekoppelten Anlagen als „dezentrale“ gebäudeintegrierte Anlagen oder als „zentrale“ Freiflächenanlagen realisieren. Der erzeugte Strom aus gebäudeintegrierten Anlagen kann entweder direkt vom Verbraucher genutzt oder in das öffentliche Netz eingespeist werden. Aufgrund der Gebäudestruktur ist die Größe der Anlage jedoch begrenzt. Typische Anlagengrößen liegen bei 10 Kilowatt (kW) auf privaten Hausdächern bis zu mehreren Megawatt (MW) auf Industriebauten oder landwirtschaftlichen Gebäuden (IPCC 2012: 354). Der Vorteil dieses Systems ist, dass der Strom direkt am Verbrauchsort produziert wird und somit Netzverluste reduziert werden. Zudem kann der Verbraucher auf das öffentliche Stromnetz zurückgreifen, sollte der selbst erzeugte Strom nicht reichen. Da off-grid Systeme einen zusätzlichen Speicher benötigen, ist eine netzgekoppelte Anlage deshalb günstiger. Ein weiterer großer Vorteil ist, dass bei der Installation auf Dachflächen keine zusätzlichen Landflächen verbraucht werden.

Denn gegenüber Dachflächenanlagen gehen Freiflächenanlagen meist mit einem Landschaftsverbrauch einher, sofern sie nicht auf versiegelten Flächen wie Deponien errichtet werden (WESSLAK u. SCHABBACH 2009: 166). Der Strom, den eine zentralisierte Freiflächenanlage liefert, ist normalerweise nicht mit einem speziellen Verbraucher verbunden und

auch nicht auf die Versorgungssicherheit ausgelegt, sondern lediglich auf den maximalen Ertrag. Deshalb kann es bei großen Anlagen sinnvoll sein, eine Nachführung nach der Sonne zu installieren. Dadurch lässt sich der durchschnittliche Jahresertrag um rund 30 Prozent erhöhen (QUASCHNING 2010:113). Große Photovoltaikanlagen haben zudem durch positive Skaleneffekte einen weiteren ökonomischen Vorteil und lassen sich in Zusammenhang mit Wartungs- und Überwachungssystemen zuverlässiger betreiben (IPCC 2012: 354). Typische Anlagen sind größer als ein MW und können sogar mehrere 100 MW Leistung erreichen. Die größte Photovoltaikanlage der Welt steht zur Zeit in Arizona (USA) mit einer installierten Leistung von 250 MWp und wird bis 2014 noch auf 290 MWp wachsen (SOLARPLAZA 2012: o.S.).

3.1.2 Solarthermische Kraftwerke

Solarthermische Kraftwerke wandeln Sonnenenergie im Gegensatz zur Photovoltaik nicht direkt in Strom um, sondern gewinnen durch die Konzentration von Sonnenstrahlen zunächst Wärmeenergie. Diese Wärme kann entweder als Prozesswärme abgegeben oder in Wasserdampf umgewandelt werden und so eine Dampfturbine samt Generator antreiben, wodurch die Wärme schließlich in elektrische Energie umgewandelt wird. Dabei kann allein parallel einfallende Strahlung konzentriert werden, weshalb sich nur die direkte und keine diffuse Solarstrahlung für konzentrierende Systeme eignet (Abb. 5). Aufgrund der Konzentration von solarer Strahlungsenergie wird diese Technologie auch „*concentrating solar power*“ (CSP) genannt.

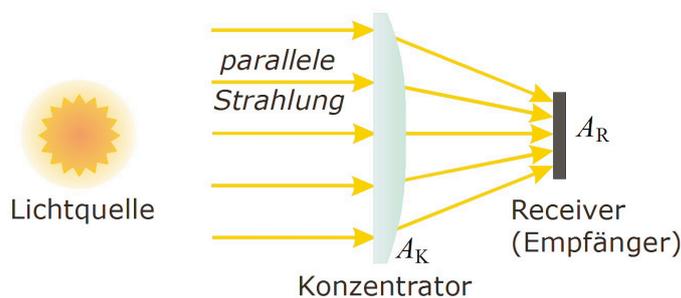


Abb. 5: Die Konzentration von solarer Strahlung (Quaschnig 2011: 134)

Der Konzentrationsprozess von solarer Strahlung wurde schon 1500 v. Chr. in Ägypten bei der Glas- und Spiegelherstellung entdeckt. Auch Priester in der Antike nutzten konzentrierte Solarstrahlung, um heilige Feuer zu entzünden (WESSLAK u. SCHABBACH 2009: 174). Und bereits 1912 wurde in der Nähe von Kairo durch den US-Amerikaner Frank Shumann das erste CSP-Kraftwerk mit einer Leistung von 88 kW errichtet, welches heutigen Parabolrinnenkraftwerken sehr ähnlich sieht (WESSLAK u. SCHABBACH 2009: 175). Doch aufgrund von Materialproblemen und dem Beginn des ersten Weltkrieges scheiterten dieses und andere Projekte. Erst 1984 begann in den USA der kommerzielle Betrieb von solarthermischen Kraftwerken (WATTER 2011: 243).

CSP-Anlagen können als Systeme im Bereich von wenigen kW Leistung oder als Kraftwerke mit Leistungen von einigen hundert MW errichtet werden. Dadurch lassen sie sich gut an eine Vielzahl von Bedingungen und Anwendungen anpassen. Außerdem können ther-

mische Speicher integriert werden, um die Spitzen-, Mittel- oder Grundlastversorgung zu gewährleisten (Abb. 6).

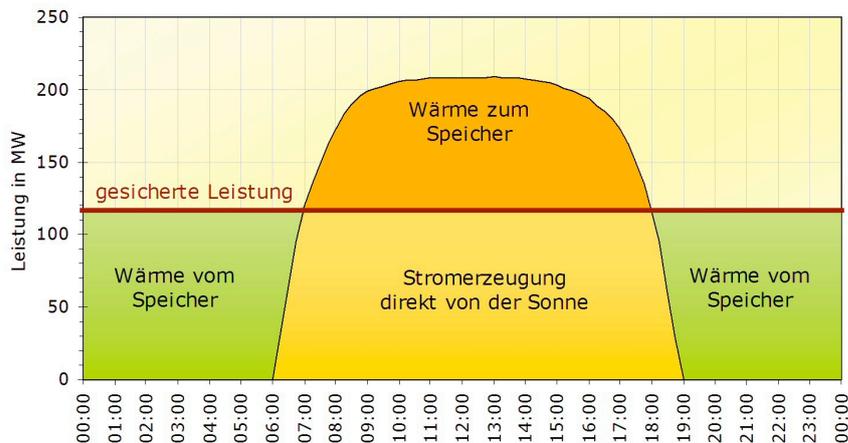


Abb. 6: Prinzip eines thermischen Speichers (QUASCHNING 2011:154)

Dies ist ein großer Vorteil gegenüber fluktuierenden regenerativen Energien wie Photovoltaik oder Windkraft. Deren überschüssige Energie soll nach dem Konzept der Bundesregierung vor allem in Pumpspeicherkraftwerken zwischengespeichert werden. Dabei wird die Energie zum Betrieb von elektrischen Pumpen benutzt, welche Wasser aus einem unteren Becken in ein höher gelegenes Becken befördern. Wird wieder Strom benötigt, lässt man Wasser vom Oberbecken durch eine Turbine zum unteren Becken fließen und erzeugt so Strom. Allerdings geht bei dieser Form der Speicherung rund 20 Prozent der ursprünglichen Energie verloren (QUASCHNING 2011: 303). Diese Umwandlungsverluste können bei solarthermischen Kraftwerken vermieden werden. Um neben der Stromproduktion tagsüber die Wärmespeicher zu füllen, müssen die Solarfelder jedoch größer dimensioniert werden als der tatsächliche Leistungsbedarf. Denn erst dann kann tagsüber zusätzliche Wärme gewonnen werden, die nachts zur Wasserdampferzeugung verwendet wird und so eine kontinuierliche Stromproduktion sichert (Abb. 6). Als Speichermedium eignet sich vor allem flüssiges Natriumsalz. Dieses kann die überschüssige Wärme in großen Tanks zwischenspeichern, ist günstig und verfügt über gute Wärmeübertragungseigenschaften. Zudem kann es in der Absorberfläche direkt erhitzt werden, wodurch der Wärmetausch mit einem weiteren Speichermedium entfällt und Effizienzverluste vermieden werden (PITZ-PAAL 2008: 28).

Weitere Vorteile von solarthermischen Kraftwerken liegen in der Verwendung von modularen und skalierbaren Komponenten, sowie in der Verwendung von herkömmlichen Materialien (IPCC 2012: 355). Ein Nachteil gegenüber nicht konzentrierenden Kollektoren wie der Photovoltaik ist die bereits angesprochene ausschließliche Nutzungsmöglichkeit der direkten Solarstrahlung, weshalb diese Systeme nur in Gebieten mit einem hohen Direktstrahlungsanteil wirtschaftlich sinnvoll sind. Des Weiteren muss eine Nachführung des Systems mit dem Sonnenstand erfolgen, damit die Konzentration bei sich änderndem Sonnenstand auf der Absorberfläche fixiert bleibt (WESSLAK u. SCHABBACH 2009: 194).

Es gibt viele verschiedene Arten von CSP-Kraftwerken, einschließlich der Kombinationen mit anderen erneuerbaren oder fossilen Technologien sowie mit Meerwasserentsalzungsanlagen. Doch es lassen sich vier wesentliche Technologien nach folgenden Merkmalen unterscheiden: Zum einen nach der Art wie sie die Sonnenstrahlen bündeln und zum anderen mit welcher Technologie die Sonnenenergie aufgenommen wird (IEA 2010a: 11). Zu den vier Hauptgruppen zählen Parabolrinnen-, Solarturm-, Fresnel- und Dish-Sterling-Kraftwerke.

3.1.2.1 Parabolrinnenkraftwerke

Parabolrinnenkraftwerke konzentrieren das Sonnenlicht durch gewölbte Spiegel „auf ein in der Brennpunkt verlaufendes Absorberrohr“ (WATTER 2011: 243 und Abb. 7). In der Regel hat ein solches Kraftwerk eine Nord-Süd Ausrichtung, womit eine einachsige Drehung der Spiegel genügt, um dem Lauf der Sonne zu folgen. Ein spezielles Thermoöl, welches üblicherweise das Absorberrohr durchströmt, erreicht durch die konzentrierten Solarstrahlen eine Temperatur von knapp 400°C (WATTER 2011: 243). Diese Wärme wird dann über Wärmetauscher zur Dampferzeugung genutzt und treibt anschließend in einem konventionellen Dampfkraftwerk eine Dampfturbine und einen Generator an, welcher elektrischen Strom erzeugt. Alternativ zum Thermoöl kann neuerdings auch direkt überhitzter Wasserdampf in dem Absorberrohr erzeugt werden. Dadurch entfallen Thermoöl und Wärmetauscher und die Kosten sinken. Zudem können bei der solaren Direktverdampfung Temperaturen von 500°C erreicht werden, was den Wirkungsgrad von Dampfturbinen um fünf Prozent auf ca. 40 Prozent erhöht (QUASCHNING 2010: 169). Diese Methode der Stromerzeugung über Dampfturbinen ist eine robuste und erprobte Technologie, die seit Jahrzehnten unter anderem in Kohlekraftwerken zum Einsatz kommt.

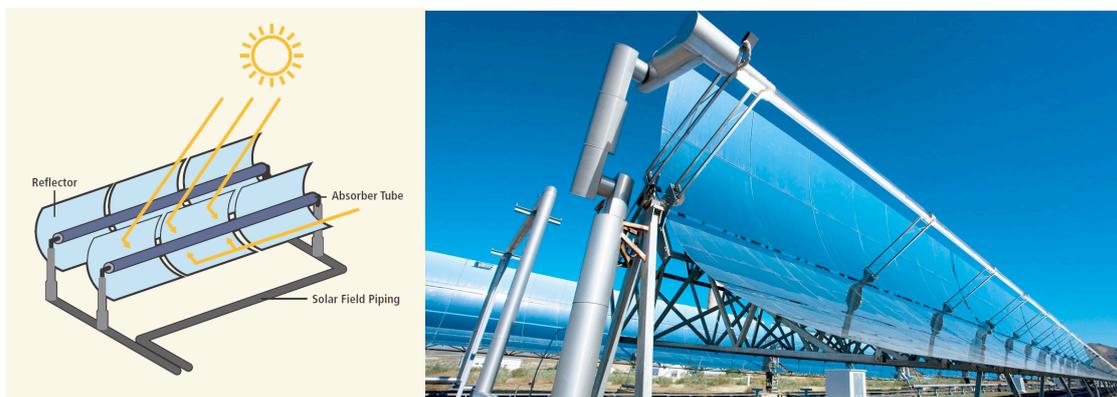


Abb. 7: Links: Funktionsweise einer Parabolrinne (IPCC 2012: 356), Rechts: Kraftwerk in Almería, Spanien (DLR 2012: o.S.)

3.1.2.2 Fresnelkraftwerke

Fresnelkraftwerke bilden eine Weiterentwicklung von Parabolrinnenkraftwerken. Sie konzentrieren ebenfalls die direkten Sonnenstrahlen auf ein Absorberrohr, welches jedoch im Gegensatz zu den meisten Parabolrinnenkraftwerken nicht bewegt wird. Stattdessen werden ungewölbte Spiegelstreifen einzeln auf ein festes Absorberrohr ausgerichtet (Abb. 8). Diese einfach herzustellenden Spiegelstreifen versprechen ein großes Kostensenkungspotenzial (WATTER 2011: 244). Außerdem hat ein fixiertes Absorberrohr den

Vorteil eines einfacheren und somit günstigeren Aufbaus und ist zudem in der Dimensionierung flexibel. Des Weiteren können die flachen Spiegel wesentlich näher am Boden gebaut werden und sparen dadurch ebenfalls weitere strukturelle Kosten. Insgesamt bietet diese Technologie also sehr große Kostenvorteile gegenüber Parabolrinnenkraftwerken (IEA 2010a: 12). Als Nachteile dieser Technologie gelten jedoch zum einen die vergleichsweise geringen Wirkungsgrade und zum anderen die Erzeugung von niedrigeren Temperaturen, wodurch die Integration von thermischen Speichern schwerer umzusetzen ist (IEA 2010a: 12).



Abb. 8: Links: Funktionsweise eines Fresnelkraftwerks (IPCC 2012: 356), Rechts: Fresnel-Solarfeld Puerto Errado bei Murcia, Spanien (DLR 2012: o.S.)

3.1.2.3 Solarturmkraftwerke

Eine weitere sehr vielversprechende Technologie ist das Solarturmkraftwerk. Bei diesem werden tausende drehbare Spiegel, sogenannte Heliostate, einzeln der Sonne nachgeführt und so auf einen zentralen Absorber, auch Receiver genannt, in der Turmspitze gerichtet (Abb. 9). Durch die zentrierten Solarstrahlen erreicht der Receiver Temperaturen bis zu 1000°C (TESKE 2012: 237). Mittels Wasserdampf, Heißluft oder flüssigem Salz gelangt die Wärme dann zu einer Gas- oder Dampfturbine, welche einen Generator antreibt und dadurch Strom erzeugt. Durch die besonders hohen Temperaturen steigt die Effizienz, mit der Wärme in Strom umgewandelt wird, und die Kosten der thermischen Speicherung sinken (IEA 2010a: 12).

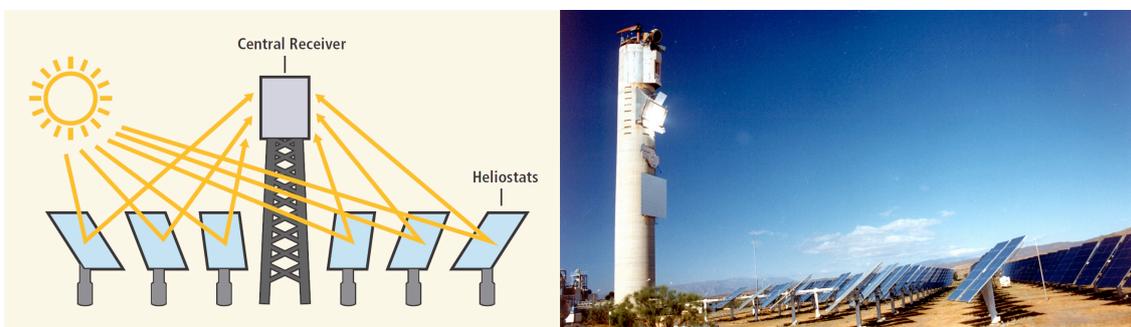


Abb. 9: Links: Prinzip eines Solarturmkraftwerk (IPCC 2012: 356), Rechts: Turmkraftwerk im spanischen Almería (DLR 2012: o.S.)

3.1.2.3 Dish-Sterling-Anlagen

Im Gegensatz zu den drei bisherigen Kraftwerksarten, die nur in großen Leistungsbereichen von einigen MW wirtschaftlich sinnvoll betrieben werden können, eignen sich Dish-Sterling-Anlagen auch für die dezentrale Stromproduktion (QUASCHNING 2011: 173). Um Leistungen von bis zu 50kW zu erreichen werden die Anlagen zweiachsig der Sonne nachgeführt. Parabolspiegel konzentrieren die solare Strahlung auf einen im Brennpunkt angeordneten Stirling-Motor, „der die thermische Energie direkt in mechanische Energie umwandelt“ (WATTER 2011: 247 und Abb. 10). Zwar erreichen Dish-Sterling-Anlagen die höchsten Wirkungsgrade bei der Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie, doch im Gegensatz zu Turm-, Fresnel oder Parabolrinnenkraftwerken ist der Preis pro Kilowattstunde noch relativ hoch (QUASCHNING 2010: 156). Trotzdem liegt besonders in Entwicklungsländern mit steigendem Elektrizitätsbedarf, einem hohen Anteil direkter Strahlungsenergie, schlecht ausgebauten Stromnetzen und hohen Importkosten fossiler Brennstoffe ein großes Marktpotenzial für diese Systeme (PITZ-PAAL 2008: 29).



Abb. 10: Links: Funktionsweise einer Dish-Sterling-Anlage (IPCC 2012: 356), Rechts: Realisierte Anlage (DLR 2012: o.S.)

3.2 Weitere regenerative Energiequellen

Neben der direkten Sonnenenergie gehören wie bereits angesprochen auch die indirekte Sonnenenergie, Planetenenergie und die geothermische Energie zu den regenerativen Energien (Abb. 2). Genauere Analysen zu weiteren Energieträgern würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, es soll jedoch kurz auf einige regenerative Energien eingegangen werden, die zum einen bereits heute in vielen Teilen der Welt Strom konkurrenzfähig produzieren und zum anderen noch ein großes Potenzial aufweisen.

Einer der am schnellsten wachsenden Märkte im Bereich der erneuerbaren Energien ist die Windenergie. So wird erwartet, dass die weltweit installierte Leistung von 237 GW im Jahr 2011 bis Ende 2016 auf knapp 500 GW ansteigt und sich somit in fünf Jahren mehr als verdoppelt (GWEC 2011: 29). Besonders in Nordeuropa, den USA, im Süden Latein Amerikas, in China, Ostafrika, Marokko, Japan oder Neuseeland finden sich ideale Standorte mit hohen Windgeschwindigkeiten, die zur kommerziellen Stromerzeugung prädestiniert sind (Abb. 11).

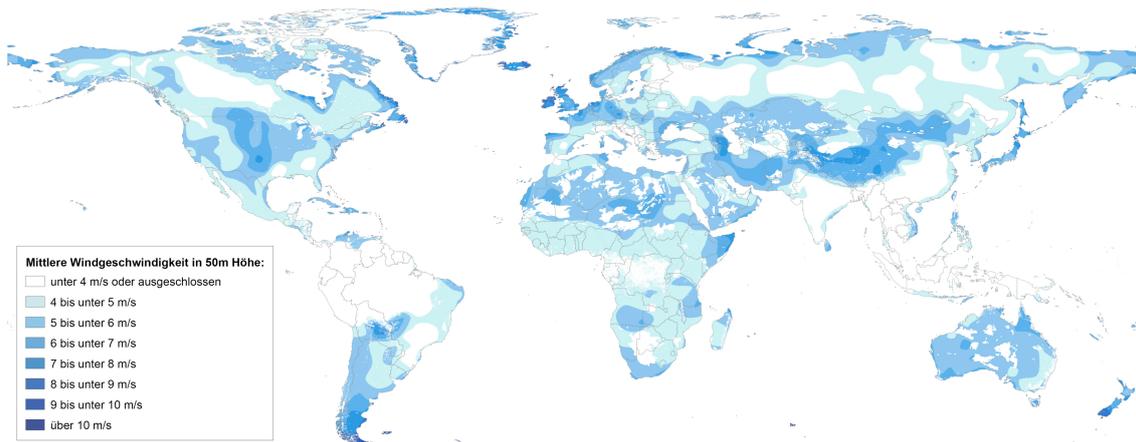


Abb. 11: Windenergiepotenzial Onshore (Eigene Darstellung)

Auch Biomasse wird hierzulande bereits durch Biogasanlagen oder Biomassekraftwerke erfolgreich zu Strom umgewandelt und hat weltweit ein großes Potenzial (Abb. 12). Wie groß genau das Potenzial von Biomasse ist, ist jedoch höchst umstritten. Analysen für das Jahr 2050 reichen von 50 bis 400 Exajoule (EJ), was 13.900 bis 111.200 Terawattstunden pro Jahr (TWh/a) entspricht (KALTSCHMITT u. THRÄN 2009: 15). Dies liegt vor allem an unterschiedlichen Analyse- und Ausschlusskriterien. Die Einschätzung und Berechnung des Biomassepotenzials ist deshalb schwierig, da die Stromerzeugung durch Biomasse in vielen Ländern in Konflikt mit anderen Nutzungsansprüchen steht. So könnte etwa die Nahrungsmittelversorgung, der Schutz des Regenwaldes und der biologischen Vielfalt oder der Erhalt und die Wiederaufforstung des Waldes durch einen starken Ausbau von Energiepflanzen gefährdet werden. Deshalb plädiert unter anderem auch die DESERTEC Foundation nur für eine Verwendung von landwirtschaftlichen Reststoffen, Holzresten und Abfällen zur Strom- und Wärmeproduktion aus Biomasse.

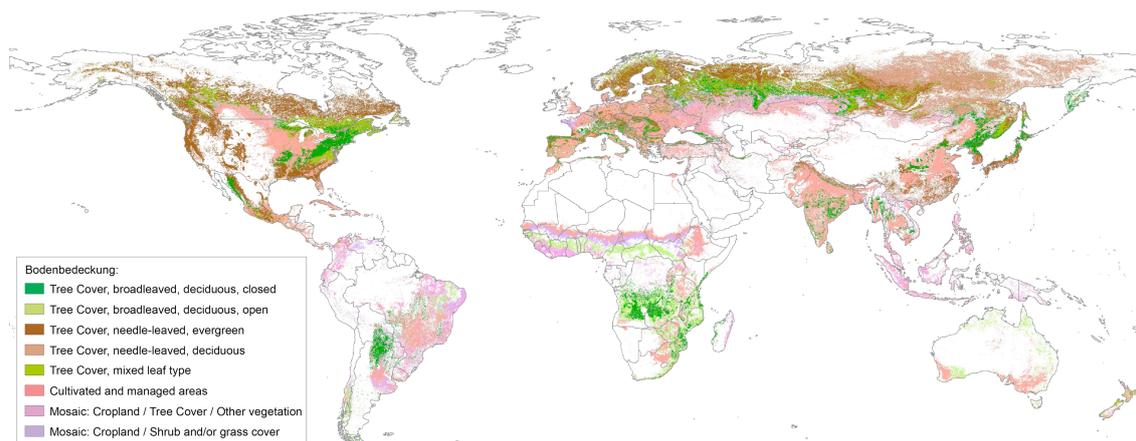


Abb. 12: Theoretisch nutzbare Flächen zur Stromerzeugung aus Biomasse (Eigene Darstellung)

Neben Windkraft und Biomasse gilt auch die Geothermie als vielversprechender regenerativer Energieträger. Die großen Vorteile der Geothermie liegen in der ständigen Verfügbarkeit und der guten Umweltverträglichkeit. Vor allem zur Wärmeproduktion lässt sich Geothermie in entsprechend geeigneten Gegenden hervorragend nutzen. Bei der globalen

Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nimmt Geothermie zur Zeit mit 1,72 Prozent zwar nur einen geringen Teil ein (BMU 2012: 99), doch lässt sich Strom aus geothermischen Kraftwerken durch das Hot-Dry-Rock Verfahren prinzipiell überall auf der Welt erzeugen. Besonders in Gebieten, in denen Platten aufeinanderstoßen, kommt es häufig zu thermischen Anomalien. Dies bedeutet, dass dort hohe Temperaturen schon in geringen Tiefen auftreten, „wodurch sich die Erdwärme besonders effektiv nutzen lässt“ (QUASCHNING 2010: 270). Weshalb die meisten geothermischen Kraftwerke auch in diesen Gegenden zu finden sind (Abb. 13). Insgesamt sind weltweit 551 geothermische Kraftwerke am Netz, davon 81 mit einer Leistung über 50 MW. Zudem sind weitere 230 Kraftwerke in Planung und davon bereits 80 mit einer installierten Leistung von über 50 MW. Das größte geothermische Kraftwerk mit einer installierten Leistung von 225 MW wird zurzeit in Neuseeland gebaut (IGA 2012: o.S.).

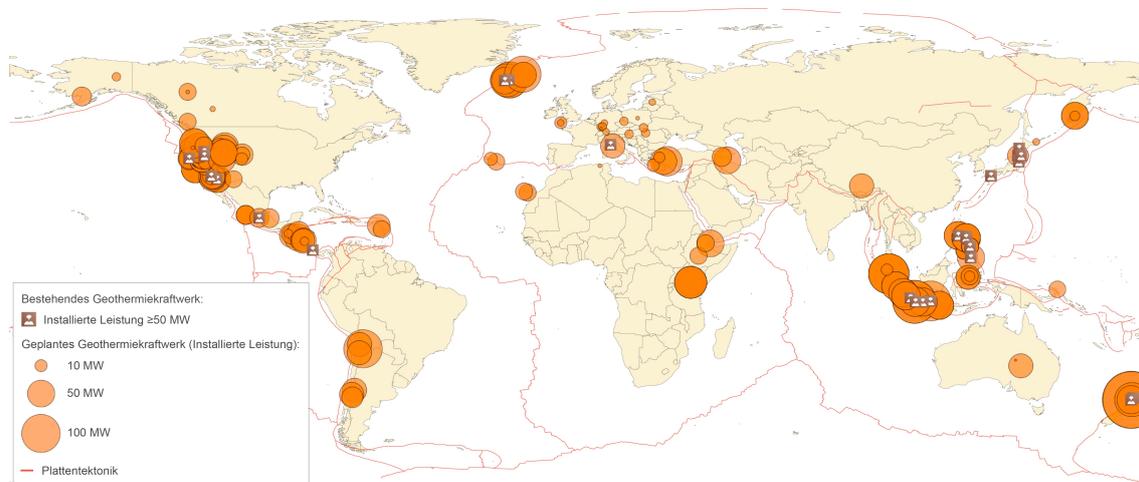


Abb. 13: Weltweit bestehende und geplante Geothermie-Projekte (Eigene Darstellung)

Der mit Abstand bedeutendste regenerative Energieträger zur Stromerzeugung ist zurzeit noch die Wasserkraft, mit einer weltweit installierten Leistung von 970.000 MW Ende 2011 und einem Anteil von 17 Prozent am weltweiten Stromverbrauch im Jahr 2010 (AEE 2012: o.S.). Gerade in Zentralafrika, Südamerika, Skandinavien oder Kanada nimmt Wasserkraft einen Großteil der Stromproduktion ein (Abb. 14).

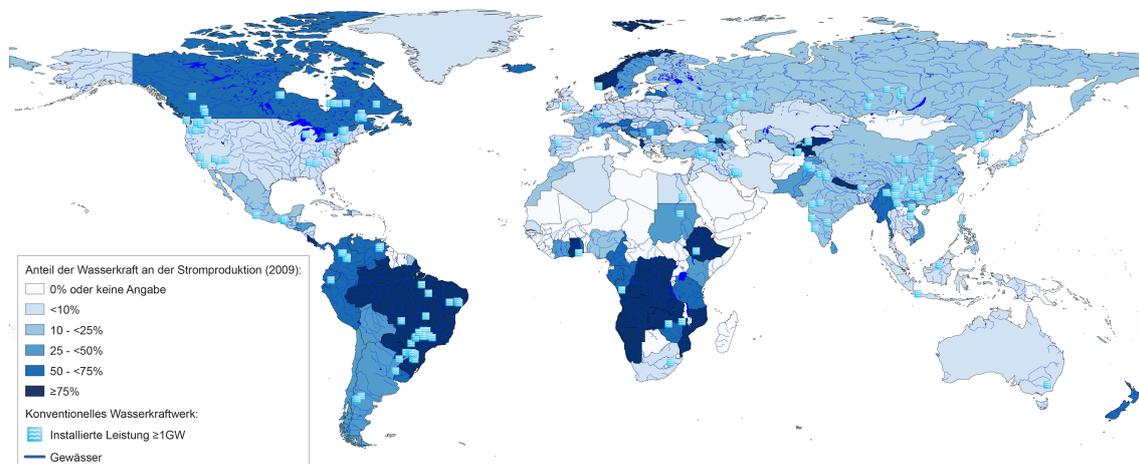


Abb. 14: Stromerzeugung durch Wasserkraft (Eigene Darstellung)

Es ist eine technisch ausgereifte Technologie mit einem hohen Wirkungsgrad und der Fähigkeit Energie zu speichern. Allerdings bedeutet der Bau von großen Wasserkraftwerken auch einen starken Eingriff in die Natur und unter Umständen die Enteignung der Anrainer sowie die Umsiedlung von Dörfern oder Städten. Trotzdem ist es möglich ökologisch vertretbare Anlagen zu errichten, die einen großen Anteil zu einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung leisten können (QUASCHNING 2010: 270).

Durch verschiedene Studien, wie dem „100 percent electricity“ Zeitplan von PricewaterhouseCoopers (PwC 2011: o.S.), wurde bereits aufgezeigt, dass eine vollständige regenerative Stromversorgung in einigen Regionen oder auch schon global bis 2050 umsetzbar ist. Dazu ist es notwendig, dass potenziell geeignete Flächen durch die für sie optimalen erneuerbaren Technologien mit den höchsten Erträgen genutzt werden. Einen Überblick über mögliche Standorte von CSP, Photovoltaik, Windkraft und Biomasse, sowie bereits real umgesetzte oder geplante Wasserkraft- und Geothermieprojekte zur Stromerzeugung an den unterschiedlichsten Orten der Erde bietet Abbildung 15.

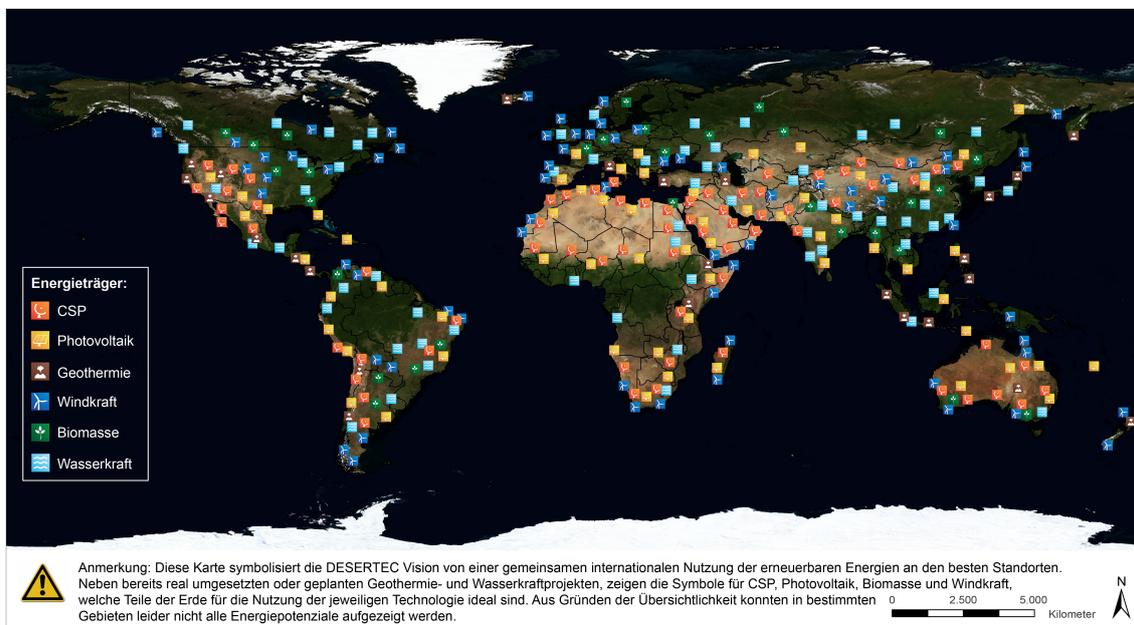


Abb. 15: Potenzielle und reale Standorte regenerativer Energien zur Stromerzeugung (Eigene Darstellung).

4 Flächenpotenziale

4.1 Geographische Informationssysteme

Grundsätzlich versteht man unter einem geographischen Informationssystemen oder Geoinformationssystemen (GIS) „ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software und Daten besteht und mit dem sich raumbezogene Problemstellungen in unterschiedlichsten Anwendungsgebieten modellieren und bearbeiten lassen. Die dafür benötigten raumbezogenen Daten/Informationen können digital erfasst und redigiert, verwaltet und reorganisiert, analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden. GIS bezeichnet sowohl eine Technologie, Produkte als auch Vorhaben zur Bereitstellung und Behandlung von Geoinformationen“ (Bill 2010: 8). In diesem Fall wird ein GIS dazu benötigt, Strahlungsdaten mit Flächeninformationen in Verbindung zu bringen und so potenziell geeignete Flächen für Photovoltaikanlagen und solarthermische Kraftwerke zu berechnen. Mithilfe von ArcGIS sollen diese Berechnung durchgeführt werden. Zwar gibt es auch eine Vielzahl von geeigneten Open Source GIS, wie z.B. Quantum GIS, die ebenfalls diese Berechnungen durchführen könnten. ArcGIS hat gegenüber diesen jedoch den Vorteil einer schnelleren Verarbeitung von großen Datensätzen.

4.2 Datengrundlage

Die Grundlage der Untersuchung bilden ausschließlich kostenlose und frei verwendbare Daten. Diese werden in ArcGIS eingelesen, dort analysiert, bearbeitet und mit anderen Datensätzen gegengerechnet, sodass schließlich die Flächenpotenziale errechnet werden können. Im Folgenden werden die benötigten Daten kurz vorgestellt, um deren spezifische Eigenarten darzulegen.

4.2.1 NASA SEE 6.0

Wie bereits im Kapitel 3.1 erläutert, ist die direkte und globale Strahlung für das Potenzial von CSP bzw. PV von Bedeutung. Einer der aktuellsten globalen und frei zugänglichen Strahlungsdatensätze wurde durch das NASA Surface Meteorological and Solar Energy Programme (SSE) im Jahr 2008 veröffentlicht. Für einen Zeitraum von 22 Jahren (Juli 1983 bis Juni 2005) wurden Strahlungswerte erfasst und als monatliche und jährliche Durchschnittswerte für eine 1x1 Grad Region veröffentlicht (NASA SSE 2008: o.S.). Die Schätzungen des SSE wurden zudem mit bodennahen Messungen des Baseline Surface Radiation Networks (BSRN) verglichen, da allgemein angenommen wird, dass bodennahe Messungen qualitativ hochwertiger sind als vom Satelliten abgeleitete Werte. Für die Globalstrahlung, die als Parameter für das Potenzial von Photovoltaik gilt, wurde eine Messabweichung von -0.01 Prozent ermittelt. Bei der Direktstrahlung, die für das Potenzial von CSP entscheidend ist, lag die Messabweichung hingegen bei -4.06 Prozent (NASA SSE 2008: o.S.). Diese Abweichungen sind für eine grobe globale Analyse ausreichend, doch bei konkreten Standortplanungen sind genauere lokale Strahlungsmessungen für die Ertragsberechnung notwendig.

Im GIS können die NASA Informationen als Punktdaten eingelesen werden. Diese werden dann in einem zweiten Schritt interpoliert. Bei einer Interpolation wird versucht, den Wert eines Attributes an einer nicht gemessenen Stelle durch bekannte Punkte aus der nahen Umgebung abzuschätzen. Somit kann eine kontinuierliche Oberfläche erzeugt werden (UNIVERSITÄT ROSTOCK 2002: o.S.). Im Vergleich mit der Inverse-Distance-Weighting (IDW) und der Spline Methode, liefert die Kriging Interpolation in diesem Fall die natürlichsten und kartographisch besten Ergebnisse (Abb 16). Zwar kommt es durch Interpolationen ebenfalls zu leichten Abweichungen, für eine grobe globale Analyse sollen diese aber ausreichen. Nach der Interpolation werden die berechneten Rasterflächen schließlich in Polygone umgewandelt, um spätere geographische Flächenberechnungen zu ermöglichen.

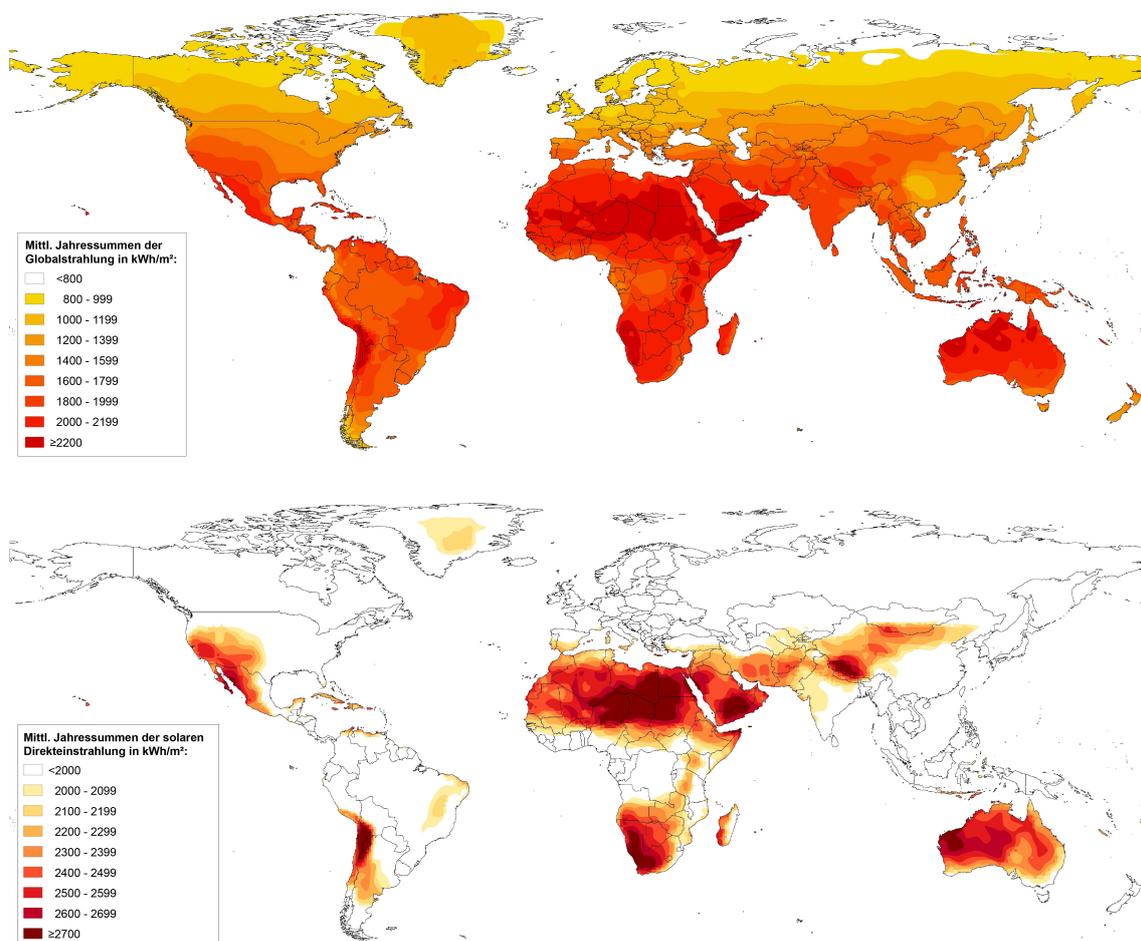


Abb. 16: Weltweite Direkt- und Globalstrahlung (Eigene Darstellung)

4.2.2 Global Land Cover 2000

Um potenzielle Flächen zu bestimmen, sind zunächst Informationen zur weltweiten Bodenbedeckung notwendig. Hierfür findet sich eine Vielzahl von Datensätzen in unterschiedlichen Genauigkeiten und mit leicht unterschiedlicher Klassifizierung. Der zurzeit aktuellste und detaillierteste Datensatz mit einer Auflösung von 300 Metern stammt aus dem GlobCover Projekt aus dem Jahr 2009 von der European Space Agency (ESA). Aufgrund der hohen Genauigkeit ist die Datenmenge allerdings zu umfangreich für Berech-

nungen mit ArcGIS. Völlig ausreichend ist hingegen der Global Land Cover 2000 Datensatz (GLC2000) des European Commission Joint Research Centre (JRC). Dieser Datensatz wurde in Zusammenarbeit mit 30 Forschungsorganisationen auf Basis von Fernerkundungsdaten des Sensor VEGETATION an Bord des SPOT-4 Satelliten erstellt (FABBI 2003: o.S.). Er hat eine räumliche Auflösung von 1x1 km am Äquator und ist in 22 Klassen unterteilt (Abb 17). Diese wurden nach dem Land Cover Classification Scheme (LCCS) der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) eingestuft. Dieses standardisierte System wurde entwickelt, um die Erdoberfläche und ihre Landnutzung in einem groben Schema zu klassifizieren und die Vergleichbarkeit von regionalen Datensätzen gewährleisten zu können.

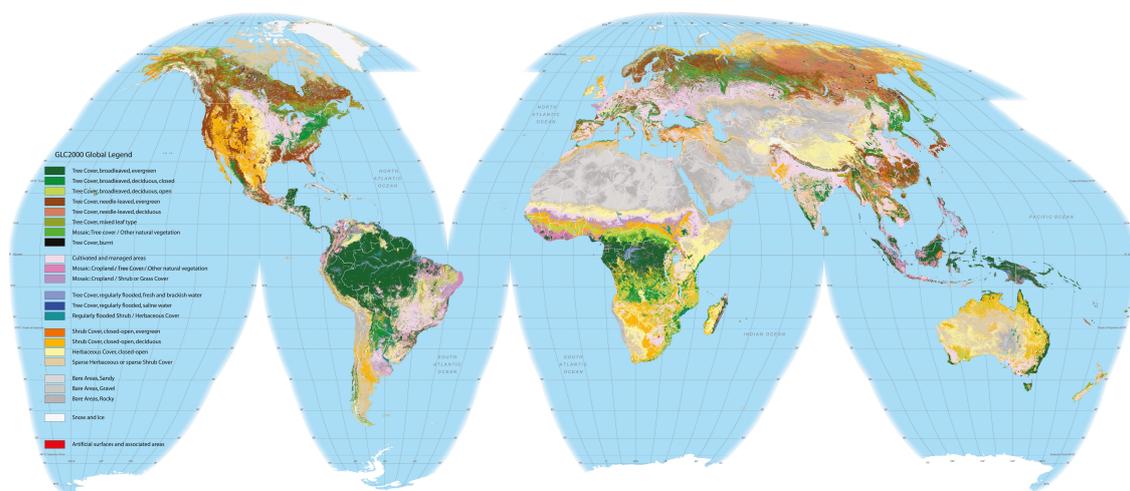


Abb. 17: Global Land Cover 2000 (Eigene Darstellung nach: JRC 2003: o.S.)

4.2.3 Digitales Geländemodell SRTM

Neben den Informationen zur Bodenbedeckung werden Höhendaten zur Berechnung der Neigungen benötigt. Denn nach der MED-CSP Studie des DLR können Parabolrinnenkraftwerke nur bis zu einer Geländesteigung von 2,1 Prozent gebaut werden (DLR 2005: 61). Mithilfe von GIS und digitalen Oberflächenmodellen (DOM) können entsprechende Neigungen berechnet werden. Der derzeit detaillierteste, annähernd-globale Datensatz hierzu wurde im Jahr 2000 durch die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) der NASA aufgezeichnet. Alle Landflächen zwischen dem 60. Grad nördlicher und 60. Grad südlicher Breite wurden erfasst und entsprechen damit nahezu 80 Prozent der gesamten Landfläche der Erde (CZEGKA et al. 2004: 1). Dieser Ausschnitt ist ausreichend, da der Datensatz nur für die Potenzialanalyse von CSP-Kraftwerken relevant ist und Gebiete mit potenziell geeigneten Strahlungswerten nur innerhalb dieses Ausschnitts liegen. Da die vom United States Geological Survey (USGS) vertriebenen Rohdaten allerdings Leerstellen haben, wird auf die Höhendaten vom Consortium for Spatial Information der Consultative Group for international Agriculture Research (CIGAR-CSI) zurückgegriffen.

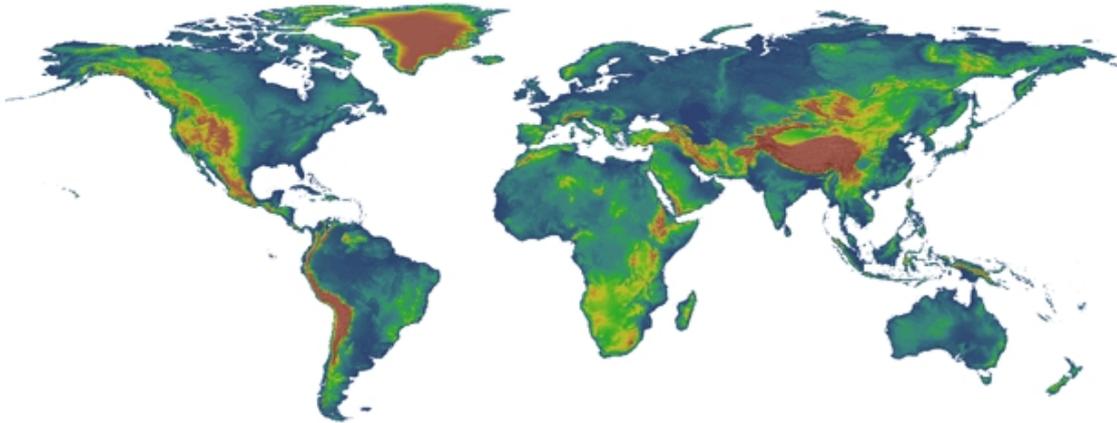


Abb. 18: SRTM 90m Digital Elevation Data (JARVIS et al. 2008: o.S.)

Diese haben die Leerstellen mittels Interpolation gefüllt und so eine nahtlose, kontinuierliche Oberfläche erstellt (Abb. 18). Die ursprünglichen SRTM-Daten haben eine vertikale Genauigkeit von sechs Metern und einen horizontalen Pixelabstand von 30 Metern. Für die Öffentlichkeit ist jedoch nur ein Datensatz mit einer Genauigkeit von 90 Metern zugänglich (CZEGKA et al. 2004: 4). Doch selbst dieser ist für die Berechnung mit ArcGIS zu umfangreich, weshalb auf ein grob aufgelöstes Oberflächenmodell mit einer Rasterweite von 1000 Metern zurückgegriffen wird. Dadurch kommt es zwar zu Genauigkeitsverlusten, doch bei einer globalen Betrachtung sind diese vertretbar. Um von den Höhendaten zu den Neigungen zu gelangen, wird in ArcGIS die Slope Funktion ausgeführt. Diese Funktion berechnet die maximale Änderungsrate des Z-Wertes für jede Rasterzelle. Die Neigungswerte werden als Grad ausgegeben und können zwischen 0 und 90 liegen. Für die korrekte Neigungswinkelberechnung ist besonders der z-Faktor wichtig. Dieser ist an die Daten anzupassen, sofern die z-Einheit von den xy-Maßeinheiten abweicht. In diesem Fall wurde ein Wert von 0,00001 gewählt, um die Höhe mit der Einheit Meter an die Längen- und Breitengrade anzupassen. Da 45 Grad einer Geländesteigung von 100 Prozent entspricht, können die Werte schließlich umgerechnet werden.

4.2.4 World Database of Protected Areas

Ein weiteres Ausschlusskriterium bilden die weltweiten Schutzgebiete. Informationen hierzu finden sich in der World Database on Protected Areas (WDPA). Dieses Projekt ist ein gemeinsames Werk der International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN) und dem United Nations Environment Programme (UNEP) und wird betrieben von dem UNEP World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC). Die Datenbank enthält sowohl geschützte Meeres- als auch Landflächen und nimmt nur jene Gebiete auf, die der IUCN-Definition eines Schutzgebietes entsprechen. Danach ist ein Schutzgebiet „ein klar definierter geografischer Raum, der aufgrund rechtlicher oder anderer wirksamer Mittel anerkannt und gemanagt wird und dem Erreichen eines langfristigen Schutzes und Erhalts der Natur sowie der darauf beruhenden Ökosystemleistungen und kulturellen Werte dient“ (EUROPARC DEUTSCHLAND 2010: 10). Des Weiteren werden die Schutzgebiete nach den IUCN Kategorien unterteilt, von Kategorie Ia („Strenges Natur-

schutz-/ Wildnisgebiet“) bis Kategorie VI („Schutzgebiet mit nachhaltiger Nutzung der natürlichen Ressourcen“).

4.2.5 Global Soil Maps

Zuletzt gilt es noch die Bodentypen zu berücksichtigen, da bestimmte Bodeneigenschaften negative Auswirkungen auf die Kosten und die Langlebigkeit von solaren Kraftwerken haben können. Nach der MED-CSP Studie gelten sowohl Salt Flats („Salztonebenen“) als auch Shifting Sand („Flugsand“) bzw. Sand Dunes („Wanderdünen“) als ungeeignete Flächen (DLR 2005: 61). Salztonebenen entfallen aufgrund ihrer stark korrosiven Eigenschaften und Flugsand wird aufgrund eines instabilen und sich mit der Zeit verschiebenden Untergrundes ausgeschlossen. Flugsand ist vor allem in Nordafrika, Vorderasien, Australien und Südamerika zu finden. Da Flugsand vom Wind transportiert wird und sich ausbreitet, wird neben der reinen Fläche, die schon vom Flugsand bedeckt wurde, zusätzlich ein Sicherheitsabstand berücksichtigt. Dieser Sicherheitsabstand wird auf 10km festgelegt, da die Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 200 Meter pro Jahr betragen können. Damit wird eine geplante Lebensdauer von 50 Jahren für CSP-Anlagen garantiert. (TRIEB et al. 2009a: 44).

Wie bei der Bodenbedeckung gibt es auch bei den Bodentypen eine Vielzahl von Datensätzen verschiedenster Organisationen. Zu den bekanntesten gehören die Digital Soil Map of the World (DSMW) des FAO und die Global Soil Regions Map des US Department of Agriculture (USDA-NRCS). Diese Datensätze enthalten beide Informationen zu Shifting Sand. Allerdings zeigen die Daten gravierende Unterschiede. In der Global Soil Regions Map werden wesentlich mehr Flächen als Flugsand dargestellt, als dies bei der DSMW der Fall ist (Abb. 19). Insgesamt beträgt der Unterschied knapp 2,5 Mio. km².

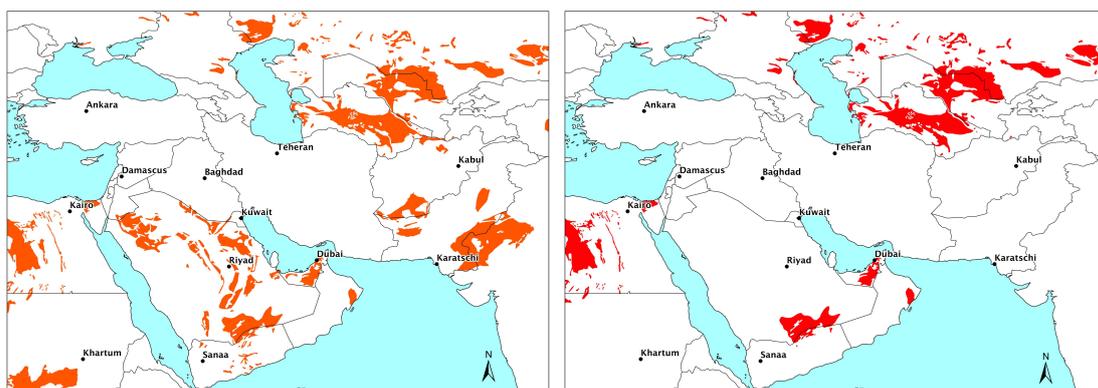


Abb. 19 "Shifting Sand" in unterschiedlichen Datensätzen: Links: Global Soil Regions Map (USDA-NRCS), Rechts: Digital Soil Map of the World (FAO-UNESCO) (Eigene Darstellung)

Der Unterschied liegt vermutlich in den verschiedenen Taxonomien. Zwar basiert die Global Soil Regions Map wie die DSMW ebenfalls auf einem Klassifikationsschema der FAO, doch wurde sie zudem mit einer Bodenklimakarte kombiniert und schließlich in zwölf Bodentypen gegliedert (USDA 2005: o.S.). Die DSMW hingegen beschreibt die Bodentypen wesentlich genauer. Insgesamt werden in 26 Gruppen 106 Bodentypen und zusätzliche Eigenschaften unterschieden (TRIEB et al. 2009a: 44), was die Abweichungen der Datensätze erklärt. Um einer realistischen Potenzialanalyse jedoch möglichst nahezukommen

und sicherzustellen, dass alle Bodenarten vom Typ Shifting Sand bei der Analyse berücksichtigt werden, wird der Datensatz vom USDA zur Berechnung der Potenzialflächen verwendet. Da dieser allerdings keine Angaben zu Salzflächen beinhaltet, werden jene Informationen wiederum aus der DSMW extrahiert.

4.3 Ausschlusskriterien

Die Ausschlusskriterien entsprechen also im Wesentlichen denen der DLR Studie (TRIEB et al. 2009a: 41) und wurden zusätzlich mit der DESERTEC Foundation abgesprochen. Für die Planung von Photovoltaikanlagen werden somit aus dem GLC2000 Datensatz alle Baumflächen, Überflutungsgebiete, Gewässer und Schnee- und Eisflächen als Ausschlusskriterium extrahiert. Hinzu kommen die bereits erwähnten Flugsandböden samt Sicherheitszone, Salztonebenen und Schutzgebiete. Selbiges gilt für solarthermische Kraftwerke, jedoch werden die Ausschlusskriterien dafür zusätzlich durch alle landwirtschaftlich genutzten Flächen und urbanen Gebiete erweitert (Tabelle 1). Außerdem muss bei CSP-Kraftwerken die Geländeneigung Berücksichtigung finden. So können Parabolrinnenkraftwerke nach der MED-CSP Studie des DLR nur bis zu einer Geländesteigung von 2,1 Prozent gebaut werden (DLR 2005: 61), während bei einem Solarturmkraftwerk nur eine kleine ebene Fläche für die Errichtung des Turms und des Kraftwerkblocks benötigt wird. Die Heliostate lassen sich hingegen auch in rauem Terrain errichten. Eine Einschränkung muss lediglich im Hinblick auf die Erreichbarkeit der Heliostate durch Wartungsfahrzeuge gemacht werden, die zur Instandhaltung und Reinigung dieser notwendig sind. Daher liegt der maximaler Richtwert nach Auskunft von Nur Energie Ltd. bei einer Geländesteigung von 25 Prozent. Für beide Annahmen müssen also die jeweiligen potenziellen Flächen berechnet werden. Mit Annahme 1 werden fortan potenzielle CSP-Flächen, die eine Geländesteigung bis 2,1 Prozent berücksichtigen, bezeichnet. Mit Annahme 2 werden hingegen die Berechnungen mit einer Geländesteigung von 2,2 bis 25 Prozent deklariert.

Tab. 1: Definierte Ausschlusskriterien für die Potenzialberechnung

Datenquelle	Ausschlusskriterium	CSP	PV
GLC 2000	Tree Cover, broadleaved, evergreen	x	x
	Tree Cover, broadleaved, deciduous, closed	x	x
	Tree Cover, broadleaved, deciduous, open	x	x
	Tree Cover, needle-leaved, evergreen	x	x
	Tree Cover, needle-leaved, deciduous	x	x
	Tree Cover, mixed leaf type	x	x
	Shrub Cover, closed-open, evergreen		
	Shrub Cover, closed-open, deciduous		
	Herbaceous Cover, closed-open		
	Sparse Herbaceous or sparse Shrub Cover		
	Regularly flooded Shrub and/or Herbaceous Cover	x	x
	Cultivated and managed areas	x	
	Mosaic: Cropland / Tree Cover / Other vegetation	x	
	Mosaic: Cropland / Shrub or Grass Cover	x	
	Bare Areas		
	Water Bodies (natural & artificial)	x	x
	Snow and Ice (natural & artificial)	x	x
	Artificial surfaces and associated areas	x	
	Global Soil Regions Map	Shifting Sand	x
10km Sicherheitszone für Shifting Sand		x	x
WDPA	Protected Areas	x	x
SRTM	Neigungen > 2,1% (Annahme 1)	x	
	Neigungen < 2,2% und > 25% (Annahme 2)	x	
DSMW	Salt flats	x	x

Quelle: Eigene Darstellung

Als grundsätzliche Potenzialflächen für solarthermische Kraftwerke bleiben also kahle und krautartig bewachsene Flächen sowie Gebiete mit Strauchbestand übrig. Diese Flächen sind ebenfalls für den Bau von Photovoltaikanlagen geeignet. Doch zusätzlich gelten auch urbane Gebiete und verschiedene landwirtschaftlich genutzte Flächen als geeignete Flächen. Dies hängt zum einen mit der bereits angesprochenen Flexibilität der Photovoltaikanwendungen in urbanen Gebieten zusammen, die zum Beispiel eine Montage auf Hausdächern oder an Fassaden ermöglicht. Zum anderen können Photovoltaikanlagen im Gegensatz zu CSP-Kraftwerken auch in kleinen Dimensionen errichtet werden. Sie zerstören dadurch kaum wertvolles Ackerland und können den Zugang zu elektrischer Energie in abgelegenen Gebieten sicherstellen.

4.4 Ermittelte Flächen

Im Hinblick auf die vielen Potenzialbegriffe, die in der Diskussion um erneuerbare Energien häufig verwechselt werden, ist es zunächst notwendig diese klar abzugrenzen. Zwar gibt es auch in der Literatur einige leicht unterschiedliche Begriffe, doch diese vier sind gemeinhin anerkannt: Das theoretische, technische, wirtschaftliche und erwartete Potenzial. Unter dem Begriff des theoretischen Potenzials versteht sich „die nach den physikalischen Gesetzmäßigkeiten [innerhalb einer gegebenen Region] grundsätzlich angebotene Energie“ (WOUTERS 2007: 229). Die Aussagekraft dieses Potenzialbegriffs auf den Beitrag

der erneuerbaren Energien zur Energieversorgung ist jedoch begrenzt. Das technische Potenzial hingegen beschreibt den Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung der gegebenen technischen Möglichkeiten nutzbar ist (PIOT 2006: 2). Dabei werden neben den verfügbaren Technologien und deren Wirkungsgrade, auch die Verfügbarkeit von Standorten im Hinblick auf konkurrierende Nutzungen sowie strukturelle, ökologische und sonstige Beschränkungen berücksichtigt (PASCHEN et al. 2003: 15). Das technische Potenzial beschreibt somit zumeist nur eine Momentaufnahme und ändert sich mit der Zeit. Werden die Gesamtkosten eines bestimmten Systems zur Nutzung von erneuerbaren Energieträgern im Vergleich zu konkurrierenden Systemen berechnet, können Aussagen zum wirtschaftlichen Potenzial getroffen werden (WOUTERS 2007: 230). Das wirtschaftliche Potenzial wird somit maßgeblich von konventionellen Systemen und den Energieträgerpreisen beeinflusst und ist dadurch nur schwer zu berechnen. Denn zukünftige Kostenentwicklungen, sowohl von erneuerbaren als auch von konventionellen Energiequellen, lassen sich durch eine Vielzahl von variablen und subjektiven Faktoren nur äußerst unsicher beurteilen (WOUTERS 2007: 230). Deshalb wird anstelle des wirtschaftlichen Potenzials häufig das erwartete Potenzial berechnet. Dieses ist zwar ebenfalls subjektiv geprägt, doch ist es zumeist geringer als das wirtschaftliche Potenzial, da es eine Vielzahl von Hindernissen, wie die begrenzten Kapazitäten für die Herstellung von Anlagen, berücksichtigt. Es wird infolgedessen auch als realisierbares Potenzial bezeichnet und beschreibt den zu erwartenden tatsächlichen Beitrag zur Energieversorgung (PASCHEN et al. 2003: 16).

Die nachfolgenden Analysen der solaren Energieträger beziehen sich dementsprechend auf das technische Potenzial, welches ein gewisses Maß an Objektivität erlaubt. Dafür sind noch zwei wesentliche Annahmen festzusetzen, die die Ausschlussflächen betreffen. Denn nach der MED-CSP Studie können solarthermische Kraftwerke erst ab einer durchschnittlichen Direktstrahlung von 2000 kWh/m^2 pro Jahr mittelfristig wirtschaftlich betrieben werden (DLR 2005: 61). Langfristig soll diese Grenze durch den technischen Fortschritt zwar auf 1800 kWh/m^2 pro Jahr absinken (DLR 2005: 61), doch um dem momentanen Stand der Technik zu entsprechen, werden Gebiete mit DNI-Werten unter 2000 kWh/m^2 pro Jahr ausgeschlossen. Auch für die Analyse des Photovoltaikpotenzials muss eine solche Annahme getroffen werden. So ist die Nutzung von Solarenergie zur Stromerzeugung auf Dachflächen erst ab einer Globalstrahlung von 800 kWh/m^2 pro Jahr geeignet (STADT AACHEN 2010: o.S.). Dieser Grenzwert kann bei Freiflächenanlagen durch Kostenvorteile oder langfristig durch den technischen Fortschritt und höhere Wirkungsgrade ebenfalls sinken. Trotzdem wird – ähnlich der Annahme zur Direktstrahlung – der aktuelle Stand der Photovoltaiktechnologie berücksichtigt. Aus diesem Grund werden Gebiete mit einer Globalstrahlung unter 800 kWh/m^2 pro Jahr ausgeschlossen.

Durch die getroffenen Annahmen und Ausschlusskriterien können mit Hilfe eines GIS schließlich die Flächenpotenziale berechnet werden. Insgesamt sind weltweit mehr als 40 Mio. km^2 für die Nutzung durch solarthermische Kraftwerke geeignet (Tab. 2). Dies entspricht bei einer globalen Landfläche von etwa 148,94 Mio. km^2 (CIA 2012: o.S.) knapp 27

Prozent, die technisch erschlossen werden könnten. Besonders in Afrika, Australien und dem Nahen Osten ist das Potenzial von solarthermischen Kraftwerken enorm (Abb. 20) und gewinnt durch Solarturmkraftwerke große potenzielle Flächen dazu (Abb. 21). Denn von dem gesamten Flächenpotenzial entfallen allein rund 15 Mio. km² auf die Erschließung mit flexibler Solarturmtechnologie.

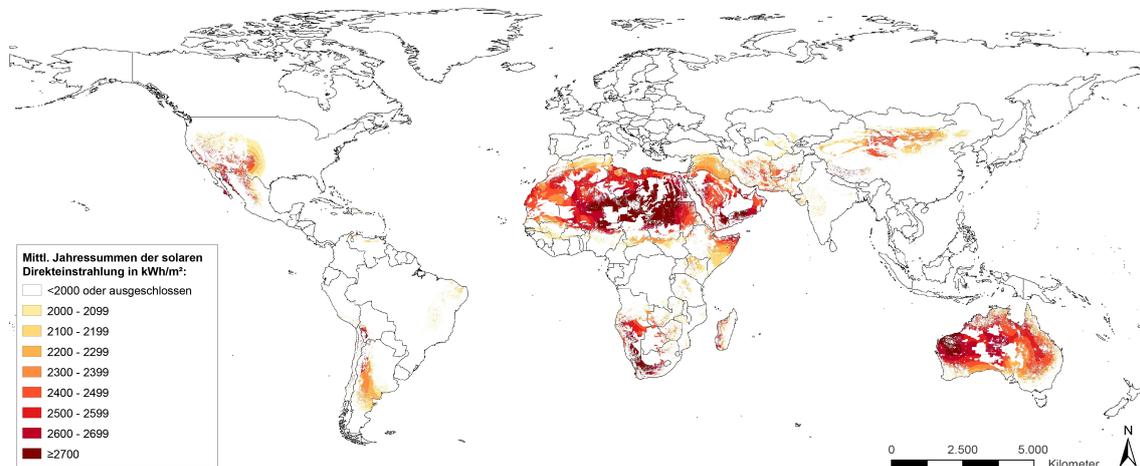


Abb. 20: Annahme 1: Potenzialflächen solarthermischer Kraftwerke (Eigene Darstellung)

Besonders in Nord- und Südamerika, aber auch in Vorderasien und China lassen sich noch große Potenziale durch diese Technologie erschließen.

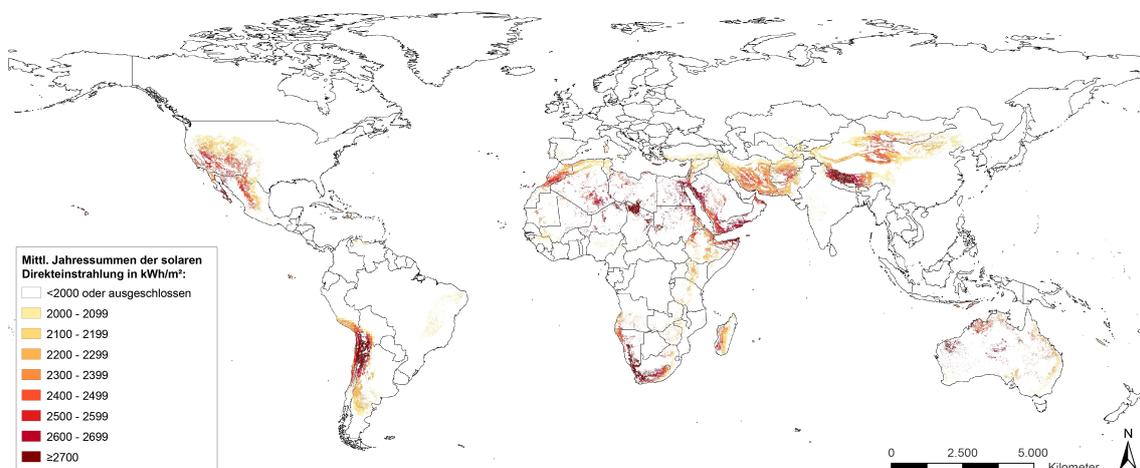


Abb. 21: Annahme 2: Zusätzliche CSP-Potenzialflächen durch den Einsatz von Solarturmkraftwerken (Eigene Darstellung)

Für Photovoltaikanlagen ergibt sich sogar ein noch größeres Flächenpotenzial (Abb. 22). Die ca. 75 Mio. km² (Tab. 2) entsprechen knapp 50 Prozent der globalen Landfläche. So ein starker Ausbau ist bei weitem nicht nötig, doch zeigt es zum einen wie viele Flächen technisch für den Bau von solaren Energieträgern geeignet wären und zum anderen wie variabel einsetzbar die Technologie ist.

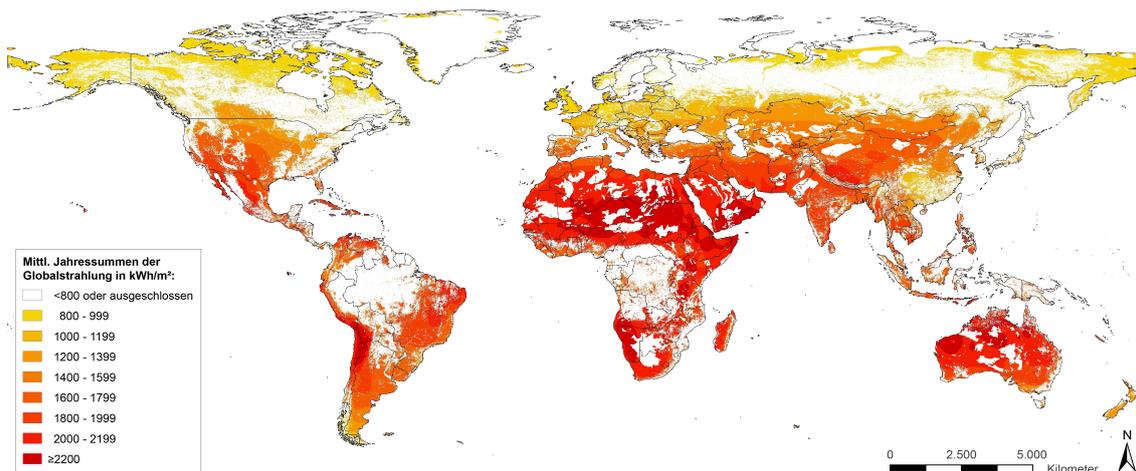


Abb. 22: Globales Photovoltaikpotenzial (Eigene Darstellung)

Ebenfalls ist in Tabelle 2 zu sehen, dass sich die größten Flächenpotenziale für Photovoltaikanlagen in Regionen mit einer sehr hohen durchschnittlichen Globalstrahlung von 2000 - 2199 kWh/m² pro Jahr finden. Dies ist von Vorteil, da der elektrische Energieertrag dort wesentlich höher ist als bei niedrigeren Strahlungswerten und somit die Stromerzeugungskosten geringer sind. Zudem wird deutlich, dass das größte Flächenpotenzial für alle Technologien der solarthermischen Kraftwerke (Annahme 1) in einem hohen Direktstrahlungsbereich von 2400 – 2499 kWh/m² pro Jahr liegt. Auch die größten Flächen, die durch Solarturmkraftwerke zusätzlich hinzugewonnen werden können, liegen ebenfalls in einem sehr geeigneten DNI-Bereich von 2300 - 2399 kWh/m² pro Jahr.

Tab. 2: Globales Flächenpotenzial solarer Kraftwerke nach verschiedenen Klassen in km²

DNI (in kWh/m ² /a)	CSP Annahme 1	CSP Annahme 2	GHI (in kWh/m ² /a)	Photovoltaik
2000 - 2099	1.653.136	1.319.750	800 - 999	6.011.171
2100 - 2199	2.052.790	1.754.265	1000 - 1199	4.730.435
2200 - 2299	2.740.495	2.197.951	1200 - 1399	6.406.743
2300 - 2399	3.980.617	2.908.463	1400 - 1599	7.371.706
2400 - 2499	5.524.845	2.468.870	1600 - 1799	11.592.852
2500 - 2599	4.340.621	1.200.716	1800 - 1999	14.820.649
2600 - 2699	2.351.856	1.104.848	2000 - 2199	15.900.033
>2700	2.988.533	1.542.642	>2200	8.750.716
Summe	25.632.893	14.497.505	Summe	75.584.308

Quelle: Eigene Darstellung

Mithilfe der errechneten Flächen lassen sich nun die potenziellen Erträge der solaren Energieträger bestimmen.

5 Berechnung des potenziellen Energieertrages

5.1 Photovoltaik

Bei der Berechnung des potenziellen Photovoltaikenergieertrags wird nicht zwischen Insel- und netzgekoppelten Anlagen unterschieden. Stattdessen ergibt sich der Energieertrag (E_{PV}) pro Modulfläche näherungsweise durch folgende Formel (KRIMMLING 2009: 98).

$$E_{PV} = s_{GHI} * \bar{\eta}_{a,Mod} * \bar{\eta}_{a,WR} * A_{Mod}$$

Das Strahlungsenergieangebot (s_{GHI}) entspricht dabei dem Mittelwert der jeweiligen GHI Klasse. Als Jahresnutzungsgrad der Module ($\bar{\eta}_{a,Mod}$) wurde 17 Prozent angenommen. Dieser Wert schwankt je nach Technologie, entspricht jedoch den derzeit am häufigsten verwendeten mono- und polykristallinen Siliziumzellen, welche in Serienfertigung Wirkungsgrade von 15,4 – 19,7 Prozent erreichen (QUASCHNING 2011: 190). Der Jahresnutzungsgrad der Wechselrichter ($\bar{\eta}_{a,WR}$) wurde mit 97 Prozent ebenfalls nach heutigem Stand der Technik relativ konservativ gewählt (QUASCHNING 2011: 231). Diese Faktoren werden dann mit der installierten Modulfläche (A_{Mod}) multipliziert. Zusätzlich muss auch der Landnutzungsfaktor (l_{nf}) aufgrund von Abschattungen berücksichtigt werden. Der Landnutzungsfaktor beschreibt das Verhältnis zwischen Modulfläche und der Gesamtfläche des Betriebsgeländes und liegt für Photovoltaikanlagen bei 50 Prozent (FROMME 2005: 178). Zudem kann durch rechtliche, wirtschaftliche und administrative Begrenzungen niemals die gesamte potenzielle Fläche zur Stromerzeugung mittels Photovoltaik genutzt werden (KREWITT et al. 2005: 15). Nach der Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) wird bis 2020 auf Gebäude- und Freiflächen von etwa 351 km² Strom durch Photovoltaikanlagen erzeugt (AEE 2010: 19). Dies gleicht knapp 0,1 Prozent der gesamten deutschen Landesfläche. Somit kann man davon ausgehen, dass mittel bis langfristig auch andere Länder 0,1 Prozent ihrer Landesfläche zur Stromerzeugung mittels Photovoltaik nutzen werden. Zumal Deutschland aufgrund der Strahlungswerte keine optimalen Bedingungen für Photovoltaik besitzt. In anderen Ländern mit einer hohen Globalstrahlung wäre der Anreiz zum Bau solcher Anlagen wesentlich größer. Die Annahme von 0,1 Prozent wird schließlich auch in einer Studie des DLR als „realisierbares“ technisches Potenzial bestätigt (KREWITT et al. 2005: 15). Somit ergibt sich für Photovoltaik ein globales realisierbares Ertragspotenzial von 21.665 TWh/a und entspricht damit in etwa dem Ergebnis des DLR von 22.500 TWh/a (KREWITT et al. 2005: 15).

Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den potenziellen CSP-Erträgen (Kapitel 5.2) wird jedoch auf das „maximale“ technische Potenzial zurückgegriffen, wodurch sich die Annahme zum Anteil der Photovoltaik an der globalen Landfläche ändert. Dieser Faktor liegt dementsprechend nicht mehr bei 0,1, sondern bei einem Prozent (KREWITT et al. 2005: 15). Das globale Ertragspotenzial steigt dadurch auf 216.652 TWh/a (Tab. 3).

Wie stark der Ertrag von der Globalstrahlung abhängt, erkennt man auch an den Erträgen der einzelnen Klassen. So ist der Ertrag der Klasse ≥ 2200 (kWh/m²/a) größer als der Er-

trag der Klasse von 1600-1799 (kWh/m²/a), obwohl das Flächenpotenzial um fast 3 Mio. km² geringer ist.

Tab. 3: Globales Energiepotenzial von Photovoltaikanlagen nach verschiedenen Klassen

GHI (in kWh/m ² /a)	Fläche in km ²	Ertrag in TWh/a
800 - 999	6.011.171	8.921
1000 - 1199	4.730.435	8.581
1200 - 1399	6.406.743	13.734
1400 - 1599	7.371.706	18.234
1600 - 1799	11.592.852	32.498
1800 - 1999	14.820.649	46.435
2000 - 2199	15.900.033	55.060
≥2200	8.750.716	33.189
Summe	75.584.308	216.652

Quelle: Eigene Darstellung

5.2 Solarthermische Kraftwerke

Der Energieertrag für solarthermische Kraftwerke (E_{CSP}) ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$E_{CSP} = s_{DNI} * l_{ne} * A_{CSP}$$

Die solare Direktstrahlung (s_{DNI}) wird wiederum als Mittelwert der jeweiligen DNI Klasse angegeben. Der Landnutzungseffizienz (l_{ne}) setzt sich aus einem Wert für den Wirkungsgrad und dem Landnutzungsfaktor zusammen. Zwar unterscheiden sich Parabolrinnen- und Solarturmkraftwerke im Landnutzungsfaktor und Wirkungsgrad leicht, doch in der Effizienz der Landnutzung liegen sie in etwa im gleichen Bereich (TRIEB et al. 2009b: 8). Ein typisches Parabolrinnenkraftwerk samt thermischem Energiespeicher soll deshalb als Referenzgröße für beide Annahmen dienen. Der Wirkungsgrad dieses Kraftwerks kann zwischen 11 und 16 Prozent liegen (TRIEB et al. 2009b: 8). Aufgrund von Verlusten bei der Speicherung wird ein Wert von 12 Prozent angenommen. Das bedeutet, dass 12 Prozent der solaren Direktstrahlung durch das System in Strom umgewandelt und in das Netz eingespeist werden kann. Um die Vergleichbarkeit mit der DLR Studie zu gewährleisten, wird als Landnutzungsfaktor ebenfalls 37 Prozent gewählt (Trieb et al. 2009b: 8). Die gesamte Landnutzungseffizienz entspricht somit 4,5 Prozent. Multipliziert mit der potenziellen Fläche (A_{CSP}) ergibt es das globale technische Energieertragspotenzial solarthermischer Kraftwerke pro Jahr.

Tab. 4: Globales Energiepotenzial von solarthermischen Kraftwerken in TWh/a nach verschiedenen Klassen

DNI Klasse (kWh/m²/a)	CSP Annahme 1	CSP Annahme 2	Gesamt
2000 - 2099	152.502	121.747	274.249
2100 - 2199	198.607	169.725	368.332
2200 - 2299	277.475	222.543	500.017
2300 - 2399	420.950	307.570	728.545
2400 - 2499	609.114	272.193	881.319
2500 - 2599	498.086	137.782	635.877
2600 - 2699	280.459	131.753	412.212
>2700	369.831	190.902	560.728
Summe	2.807.025	1.554.215	4.361.280

Quelle: Eigene Darstellung

Der potenzielle Energieertrag für Annahme 1 liegt somit bei 2.807.025 TWh/a (Tab. 4) und entspricht damit in etwa dem Ergebnis des DLR von 2.945.926 TWh/a (TRIEB et al. 2009b: 8). Mindestens genauso interessant ist auch das Ergebnis der Annahme 2. So weisen Flächen, die zusätzlich durch den Einsatz von Solarturmkraftwerken erschlossen werden können, mit 1.554.215 TWh/a ebenfalls ein gewaltiges Potenzial auf. Das gesamte weltweite technische Ertragspotenzial von solarthermischen Kraftwerken liegt dementsprechend bei 4.361.280 TWh/a (Tab. 4).

Der Grund weshalb Photovoltaik trotz größerem Flächenpotenzial und leicht besserem Wirkungsgrad einen geringeren Energieertrag als CSP aufweist, liegt zum einen an der Klasseneinteilung der Globalstrahlung und den damit verbundenen geringeren Strahlungswerten und zum anderen an der Annahme zur maximal nutzbaren Fläche der Photovoltaik. So wurden nach den Ausschlusskriterien unter anderem urbane Regionen, Ackerflächen und Mischgebiete als potenziell geeignete Flächen in die Berechnung des PV-Potenzials mit einbezogen. Bei diesen Flächen steht die Photovoltaik jedoch in Konkurrenz mit anderen Nutzungsansprüchen, da in ländlichen Regionen beispielsweise die Landwirtschaft mögliche Gebiete begrenzt und auch Dachflächen nur einen kleinen Teil des gesamten urbanen Raums einnehmen. Letztendlich werden diese möglichen Flächen also nur in geringem Ausmaß tatsächlich zur Verfügung stehen. Durch die Annahme von einem Prozent als maximal nutzbare Fläche soll diesem Argument genüge getan werden. Des Weiteren berücksichtigt dieser Wert den Landnutzungsfaktor von 50 Prozent. Die Potenzialflächen von CSP hingegen gründen sich ausschließlich auf Wüsten und spärlich bewachsenen Gebieten in denen es kaum konkurrierende Nutzungsansprüche gibt, weshalb der Faktor zur nutzbaren Fläche entfällt.

Im folgenden Kapitel soll nun genauer untersucht werden, inwieweit sich das Potenzial nach Regionen unterscheidet.

6 Weltweite Möglichkeiten einer nachhaltigen solaren Elektrizitätsversorgung

Um die verschiedenen Potenziale solarer Energieträger in unterschiedlichen Regionen der Erde vergleichen zu können, werden zehn Weltregionen gebildet (Abb. 23). Diese entsprechen den Weltregionen im Greenpeace Energy Outlook (TESKE 2012: 58), welche sich wiederum mit leichten Abänderungen an der Klassifikation der IEA orientieren. Dadurch ist die Vergleichbarkeit dieser Ergebnisse mit anderen Studien gesichert. Ferner bietet die IEA die umfassendsten globalen Energiestatistiken, wodurch der Energiebedarf mit dem Potenzial in Verbindung gebracht werden kann. Diese Analyse wird zwar nur auf Makroebene durchgeführt und kann daher keine detaillierten Auskünfte zur Situation in einzelnen Ländern geben, jedoch können grundlegende Aussagen über Möglichkeiten einer solaren Energieversorgung getroffen werden.

6.1 Klassifizierung von zehn Weltregionen

Um Strukturell ähnliche Gebiete zusammenzufassen, orientiert sich das Greenpeace Modell an den unterschiedlichen Energieversorgungssystemen der einzelnen Länder.

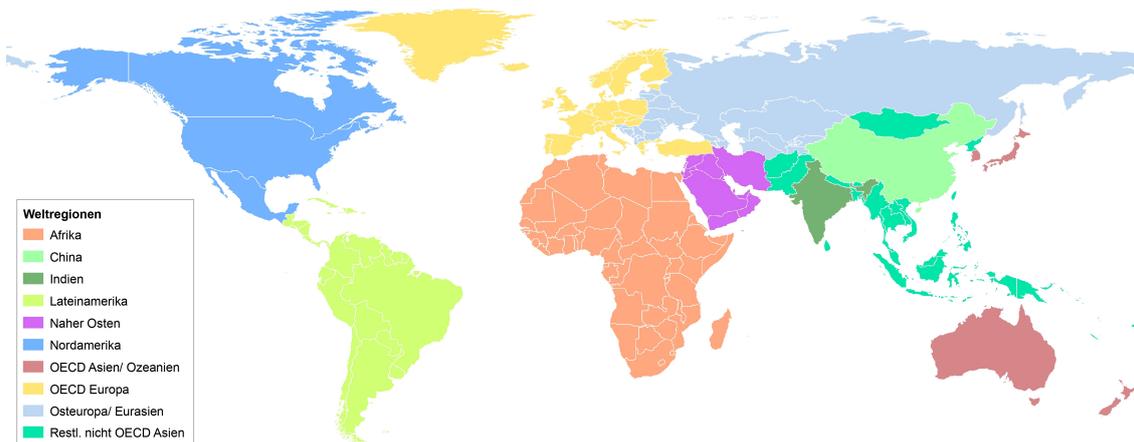


Abb. 23: Weltregionen (Eigene Darstellung nach: TESKE 2012: 58)

So wird Amerika in Lateinamerika und OECD Nordamerika aufgeteilt. Auch Europa wird nach den Gesetzmäßigkeiten der OECD zusammengeführt, während die Klasse Afrika dem Kontinent entspricht. Doch es kommt auch zu teilweise ungewöhnlichen Klassifizierungen. So bilden Japan und Südkorea mit Australien und Neuseeland die Klasse OECD Asien/ Ozeanien, obwohl sie geographisch weit auseinander liegen und völlig unterschiedliche klimatische Bedingungen aufweisen. Dadurch ist das jeweilige Potenzial von solarer Strahlungsenergie innerhalb der Klasse sehr unterschiedlich. Ebenfalls ist die Weltregion Restliches nicht OECD Asien durch die einzelne Betrachtung Indiens und Chinas nicht zusammenhängend. Die nachfolgend aufgeführten Werte müssen also mit Vorsicht behandelt werden.

6.2 Potenzielle Erträge von Solarenergie in verschiedenen Weltregionen

Wie bereits in Kapitel 5 verdeutlicht – sind die Ertragspotenziale von Photovoltaik und besonders von solarthermischen Kraftwerken enorm. Nach Weltregionen aufgeteilt ist unverkennbar, dass Afrika das mit Abstand größte Potential besitzt, sowohl für CSP- als auch für Photovoltaikanlagen. So liegt der potenzielle Energieertrag für die CSP Annahme 1 in Afrika bei 1.406.457 TWh/a, was in etwa der Hälfte des globalen Energieertrags dieser Annahme entspricht (Tab. 5). Ebenfalls hohe Energieerträge dieser Berechnung finden sich in OECD Asien und Ozeanien (509.472 TWh/a), dem Nahen Osten (294.933 TWh/a) und Nordamerika (219.381 TWh/a). Die niedrigsten Potenziale sind im restlichen nicht OECD Asien (6.739 TWh/a), in Osteuropa und Eurasien (13.170 TWh/a) sowie in Indien (24.865 TWh/a) zu finden. Auch bei der Annahme 2 ergibt sich das größte Ertragspotenzial in Afrika (385.742 TWh/a). Dadurch summiert sich dort das gesamte Ertragspotenzial für CSP-Kraftwerke auf 1.792.200 TWh/a, was etwa 40 Prozent des globalen Leistungsvermögens ausmacht.

Tab. 5: Potenzielle Erträge aus Solarenergie für verschiedene Regionen der Erde in TWh/a

	CSP Annahme 1	CSP Annahme 2	CSP Gesamt	PV
Afrika	1.406.457	385.742	1.792.200	64.721
China	134.150	261.939	396.089	17.561
Indien	24.865	8.707	33.572	6.732
Lateinamerika	113.957	203.426	317.383	27.886
Naher Osten	294.933	235.680	530.613	14.566
Nordamerika	219.381	253.049	472.430	23.568
OECD Asien/ Ozeanien	509.472	62.801	572.272	20.503
OECD Europa	82.832	99.306	182.138	6.624
Osteuropa/ Eurasien	13.170	14.368	27.538	19.201
Restl. nicht OECD Asien	6.739	26.677	33.416	14.821
Welt	2.807.025	1.554.256	4.361.280	216.652

Quelle: Eigene Darstellung

Auffällig ist, dass das Erschließen von Gebieten mit einer höheren Geländesteigung durch den Einsatz von Solarturmkraftwerken (Annahme 2) einigen Regionen einen gewaltigen Zuwachs an potenziellen Erträgen ermöglicht. So ist jenes Potenzial in China und Lateinamerika nahezu doppelt so groß wie das der Annahme 1 und im restlichen nicht OECD Asien entspricht es sogar dem vierfachen Wert.

Das Ertragspotenzial der Photovoltaik ist im Vergleich eher gering. Das Leistungsvermögen von 216.652 TWh/a macht gerade einmal knapp 5 Prozent des gesamten Potenzials solarthermischer Kraftwerke aus (Tab. 5). Die mit Abstand geringsten Ertragspotenziale sind in OECD Europa (6.624 TWh/a) und Indien (6.732 TWh/a) zu verzeichnen, während Afrika wie bereits erwähnt mit 64.721 TWh pro Jahr das größte Potenzial aufweist, gefolgt von Lateinamerika (27.886 TWh/a) und Nordamerika (23.568 TWh/a).

6.3 Der globale Stromverbrauch 2009 und Elektrizitätsbedarf 2050

Um einen Eindruck über die Dimension der Erträge zu bekommen, wird nun zum einen der Stromverbrauch aus dem Jahr 2009 und zum anderen der prognostizierte Elektrizitätsbedarf im Jahr 2050 hinzugezogen. Der weltweite Stromverbrauch lag im Jahr 2009 bei 16.760 TWh (Tab. 6). Den größten Anteil daran hat Nordamerika mit 4.375 TWh, gefolgt von China mit 3.106 TWh und OECD Europa mit 2.968 TWh. Weitere Regionen mit einem Stromverbrauch über 1.000 TWh sind OECD Asien, Ozeanien sowie Osteuropa und Eurasien. Die Regionen mit dem niedrigsten Stromverbrauch bilden Afrika (518 TWh), der Nahe Osten (599 TWh) und Indien (702 TWh) (IEA 2011: o.S.).

Tab. 6: Stromverbrauch in 2009 und prognostizierter Elektrizitätsbedarf im Jahr 2050 im Vergleich (in TWh)

	Stromverbrauch (2009)	Elektrizitätsbedarf (2050)	Differenz
Afrika	518	2.040	+1.522
China	3.106	10.040	+6.934
Indien	702	4.050	+3.348
Lateinamerika	807	2.030	+1.223
Naher Osten	599	1.958	+1.359
Nordamerika	4.375	4.082	-293
OECD Asien/ Ozeanien	1.637	1.750	+113
OECD Europa	2.968	3.470	+502
Osteuropa/ Eurasien	1.153	2.122	+969
Restl. nicht OECD Asien	895	3.205	+2.310
Welt	16.760	34.747	13.937

Quelle: Eigene Darstellung nach IEA 2011: o.S. und Teske 2012: 88-178

Neben dem aktuellen Stromverbrauch wird der Elektrizitätsbedarf im Jahr 2050 berücksichtigt, weil er Auskunft darüber gibt, wie viel Strom in Zukunft benötigt wird, um den Bedarf der Menschen zu decken. Der Elektrizitätsbedarf wurde in der Greenpeace Studie nach folgenden drei Kriterien berechnet: Der Bevölkerungsentwicklung, der ökonomischen Entwicklung und der Energieintensität. Durch einen Anstieg der Bevölkerung eines Landes steigt folglich auch die Anzahl der Menschen, die Energie konsumieren. Bei der ökonomischen Entwicklung, als Faktor wird hier das Bruttoinlandsprodukt (BIP) verwendet, wird davon ausgegangen, dass ein höheres BIP ebenfalls einen höheren Energiebedarf nach sich zieht. Und schließlich gibt die Energieintensität den Energieaufwand an, der erforderlich ist, um eine BIP Einheit zu erzeugen (TESKE 2012: 75).

Doch ein Anstieg der wirtschaftlichen Aktivität und eine wachsende Bevölkerung führen nicht zwangsläufig zu einer entsprechenden Erhöhung der Energienachfrage, denn es besteht immer noch die Möglichkeit Maßnahmen der Effizienzsteigerung zu entwickeln. Durch aktive politische Maßnahmen und technische Weiterentwicklungen geht die Greenpeace Studie davon aus, dass eine Verringerung der Energieintensität von 70 Prozent bis 2050 möglich ist (TESKE 2012: 75).

Der weltweite Elektrizitätsbedarf in 2050 wird – trotz Effizienzsteigerungen – dem Szenario nach auf 34.747 TWh ansteigen (Tab. 6). Auffällig ist, dass der Bedarf voraussichtlich in keiner der betrachteten Regionen mehr unter 1.000 TWh liegen wird. Den mit Abstand größten Elektrizitätsbedarf von 10.040 TWh/a wird bis dahin China aufweisen und damit

um über 200 Prozent wachsen. Ähnliche Zuwachsraten sind von Afrika, dem Nahen Osten und dem restlichen nicht OECD Asien zu erwarten. Die größte Zuwachsrate wird voraussichtlich Indien verzeichnen. Dort wird die Nachfrage um mehr als 400 Prozent auf 4.050 TWh explodieren. Der Elektrizitätsbedarf steigt also vor allem in Regionen (Schwellen- und Entwicklungsländern) mit schnell wachsender Bevölkerung und einem großen Nachholbedarf in Sachen flächendeckender Elektrizitätsversorgung. Als verstärkender Faktor kommt außerdem die ökonomische Entwicklung hinzu, von der ein rasantes Wachstum erwartet wird (BUNDESVERBAND DEUTSCHER BANKEN E.V. 2012: o.S.). Anders wird die Entwicklung in Regionen hoher Industrialisierung, wie Nordamerika und OECD Asien/ Ozeanien erwartet, die bereits einen hohen Lebensstandard erreicht haben und deren ökonomische Entwicklung sich in Zukunft voraussichtlich wesentlich langsamer vollziehen wird. Deren Strombedarf wird sich vor allem durch die bereits angesprochenen Effizienzsteigerungen und geringen Bevölkerungszuwachsraten auf etwa dem gleichen Level wie heute halten.

6.4 Elektrizitätsbedarf und potenzielle Erträge im Vergleich

Abschließend soll also dargelegt werden, welche Aussagekraft die vorangegangenen Ertragswerte haben und in welchen Teilen der Welt es theoretisch möglich ist, eine Elektrizitätsversorgung ausschließlich über solare Kraftwerke zu generieren. Es zeigt sich, dass alleine das weltweite „realisierbare“ Potenzial der Photovoltaik von 21.665 TWh/a theoretisch ausreichen würde, um den globalen Stromverbrauch aus dem Jahr 2009 von 16.760 TWh komplett zu decken (Tab. 5 und 6). Ein derartiger Ausbau einer einzigen Technologie wäre zwar wirtschaftlich höchst unsinnig, zumal das Potenzial in den Regionen nicht gleich verteilt ist, sondern stark variiert, doch es zeigt die gewaltige Leistungsfähigkeit einer einzigen regenerativen Energiequelle.

Im Wesentlichen ist es jedoch sinnvoller, das technische Ertragspotenzial mit dem Elektrizitätsbedarf 2050 zu vergleichen, da das Potenzial schließlich nicht von jetzt auf gleich, sondern nur langfristig umgesetzt werden kann. Im Vergleich mit dem maximalen technischen Ertragspotenzial der Photovoltaik zeigt sich, dass das Leistungsvermögen von PV in allen Regionen über dem erwarteten Bedarf in 2050 liegt (Abb. 24).

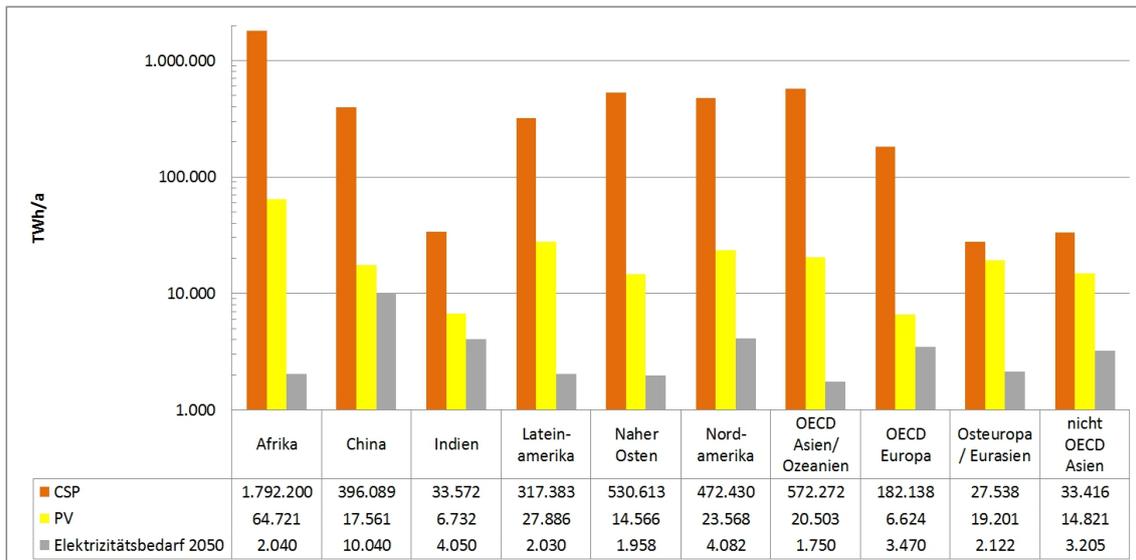


Abb. 24: Potenzial solarer Energieträger und Elektrizitätsbedarf 2050 nach verschiedenen Weltregionen (Eigene Darstellung)

Das Potenzial solarthermischer Kraftwerke ist sogar noch wesentlich größer. Es entspricht nach Annahme 1 ca. dem 80-fachen, nach Annahme 2 ca. dem 45-fachen und somit insgesamt dem 125-fachen des Elektrizitätsbedarfs 2050. Besonders deutlich stellt sich das Verhältnis zwischen möglicher Leistung und erwartetem Bedarf in Afrika dar. Dort steht ein gewaltiges CSP-Potenzial von 1.792.200 TWh/a einem vergleichsweise sehr niedrigen Bedarf von 2.040 TWh gegenüber. Dies ist das 870-fache des zukünftigen Verbrauchs. Und auch in China, dem Land mit dem voraussichtlich höchsten Elektrizitätsbedarf von 10.040 TWh in 2050, reicht das Potenzial von knapp 400.000 TWh bei Weitem aus, um den Stromverbrauch zu decken. Es weist also jede Region ein wesentlich höheres technisches Potential auf, als es Bedarf haben wird.

Tab. 7: Potenzielle Erträge aus Solarenergie für verschiedene Regionen der Erde in TWh/a im Vergleich mit dem Stromverbrauch 2009 und dem Elektrizitätsbedarf 2050 in TWh

	CSP Annahme 1	CSP Annahme 2	CSP Gesamt	PV	Strom- verbrauch 2009	Elektrizi- tätsbedarf 2050
Afrika	1.406.457	385.742	1.792.200	64.721	518	2.040
China	134.150	261.939	396.089	17.561	3.106	10.040
Indien	24.865	8.707	33.572	6.732	702	4.050
Lateinamerika	113.957	203.426	317.383	27.886	807	2.030
Naher Osten	294.933	235.680	530.613	14.566	599	1.958
Nordamerika	219.381	253.049	472.430	23.568	4.375	4.082
OECD Asien/ Ozeanien	509.472	62.801	572.272	20.503	1.637	1.750
OECD Europa	82.832	99.306	182.138	6.624	2.968	3.470
Osteuropa/ Eurasien	13.170	14.368	27.538	19.201	1.153	2.122
Restl. nicht OECD Asien	6.739	26.677	33.416	14.821	895	3.205
Welt	2.807.025	1.554.256	4.361.280	216.652	16.760	34.747

Quelle: Eigene Darstellung

7 Fazit

Auch wenn diese Analyse durch die Unsicherheiten der Eingangsdaten nur eine grobe Abschätzung darstellt, wird deutlich, dass das Potenzial von CSP-Kraftwerken enorm ist und auch die Photovoltaik einen deutlichen Beitrag zur Stromversorgung der Zukunft leisten kann. Obwohl nicht alle untersuchten Regionen gleichermaßen viel Strahlungsenergie empfangen, haben sowohl die Photovoltaik als auch CSP-Technologie das technische Potenzial, um den Strombedarf 2050 in allen Weltregionen komplett zu decken. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass durch Solarturmkraftwerke große Flächenpotenziale zusätzlich erschlossen werden können. Regionen wie China, Lateinamerika oder das restliche nicht OECD Asien würden von dieser Technologie besonders profitieren, da ihnen ein gewaltiger Zuwachs an potenziellen Energieerträgen ermöglicht wird. Doch der Vorteil liegt nicht nur in darin, dass sich das Gesamtpotenzial erhöht. Vielmehr können durch die Solarturmtechnologie neue Standorte erschlossen werden, die bisher weitgehend wegen Unebenheiten ausgeschlossen wurden. Dadurch kann Strom näher am Verbraucher produziert und Kosten für Übertragungsleitungen können eingespart werden. Wie groß die gesamten Beiträge der solaren Energieträger zum Energiemix der Zukunft letztendlich sein werden und welche zukünftigen Entwicklungen von CSP- und PV- Anlagen zu erwarten sind, hängt von mehreren Faktoren ab, wie dem technischen Fortschritt, der Kostenentwicklung oder den politischen Verhältnissen.

7.1 Ausblick

Viele der solaren Technologien stehen heute in einem frühen Stadium der Marktentwicklung, weshalb die Kosten der Elektrizitätserzeugung noch höher sind als konkurrierende konventionelle Systeme. Es wird jedoch erwartet, dass durch technischen Fortschritt, Verbesserungen in der Fertigung und Serienproduktion große Kostensenkungen erzielt werden können. Sowohl den Investitionskosten als auch den Betriebs- und Wartungskosten für Photovoltaik wird zugetraut von 2009 bis 2050 um 35 Prozent auf 1.060 \$/kWp bzw. 15 \$/kW zu sinken. Bei CSP werden sogar noch größere Reduzierungen erwartet. Demnach nehmen die Investitionskosten um über 50 Prozent (2050: 4800 \$/kWp) und die Betriebs- und Wartungskosten um 46 Prozent (2050: 193 \$/kWp) ab (Teske 2012: 63). Das langfristige Ziel ist es schließlich, die Stromerzeugungskosten sowohl für PV (IEA 2010b: 18) als auch für CSP (IEA 2010a: 29) bis 2050 auf 5 US-Cent/ kWh zu senken.

Mit den abnehmenden Erzeugungskosten werden wiederum verstärkt Anreize zu weiteren Investitionen geschaffen. Allerdings sind Lernkurveneffekte und die anschließenden Kostensenkungen von solaren Technologien nicht vom bloßen Zeitablauf abhängig, sondern vom Produktionsvolumen, der Forschung und Entwicklung und anderen Faktoren, wie dem Zugang zu Kapital. Privates Kapital wird in alle solaren Technologien fließen, aber staatliche Unterstützung und stabile politische Verhältnisse können das Risiko von privaten Investitionen verringern und zu einer schnelleren Umsetzung beitragen (IPCC 2012: 338).

Denn unabhängig von der Tatsache, dass einige Technologien bereits in lokalen Märkten wettbewerbsfähig sind, wird der Einsatz von solaren Energieträgern von einigen Hindernissen beschränkt. Dazu gehören die Standortwahl, Genehmigung und Finanzierung von großen Freiflächenanlagen in Ländern mit günstigen Strahlungswerten. Außerdem der mangelnde Zugang zu Übertragungsleitungen für große Projekte, die weit entfernt von den großen Verbrauchszentren liegen. Und auch den kleineren Projekten stehen komplexe Vorschriften, Genehmigungsverfahren und Gebühren gegenüber (IPCC 2012: 366).

Dementsprechend kommen verschiedene Studien zu unterschiedlichen Ergebnissen was die Entwicklung von CSP (Abb. 24) und PV bis 2050 betrifft. Für CSP reichen die Szenarien von 630 GW installierter Leistung, einem Energieertrag von 2.200 TWh und einem Anteil an der globalen Stromproduktion von fünf Prozent bis zu einer Leistung von 1.500 GW und einem Ertrag von 7.800 TWh (IEA 2010a: 19).

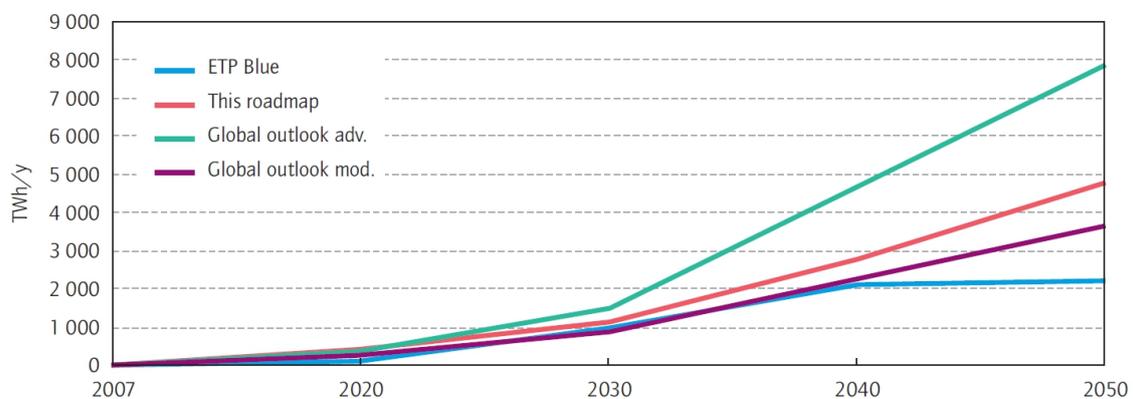


Abb. 25: Wachstum des CSP-Marktes nach vier Szenarien (IEA 2010a: 19)

Von solarthermischen Kraftwerken, die vor 2020 gebaut werden, wird erwartet, dass sie vor allem zur Deckung der Zwischen- und Spitzenlast genutzt werden. Außerdem wird in dieser Zeit voraussichtlich mit dem Bau der ersten Hochspannungsgleichstromübertragungsleitungen (HGÜ-Leitungen) begonnen, die die sonnenreichen Gebiete mit den großen Nachfragezentren verbinden. Des Weiteren wird nach dem Technology Roadmap Szenario der IEA von 2020 bis 2030 sowohl an Leistungssteigerungen und Kostenreduktionen geforscht, als auch am Einsatz von CSP-Kraftwerken zur Grundlastversorgung gearbeitet. Außerdem könnten nach 2030 erstmals solare Brennstoffe zum Energiemix beitragen (IEA 2010a: 19). Unter den Begriff der solaren Brennstoffe fällt vor allem Wasserstoff. Es kann klimaneutral hergestellt werden und bietet dadurch eine umweltfreundliche Alternative. Wasserstoff kann zudem in Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren verwendet werden und „bietet die Möglichkeit, Sonnenenergie in einem transportablen Energieträger zu speichern, um sie zeitlich oder räumlich versetzt zu nutzen“ (SATTLER et al. 2006: 1). Nach 2030 wird der Anteil von CSP an der Stromproduktion zudem weiter wachsen und voraussichtlich bis 2050 auf elf Prozent angestiegen sein (IEA 2010a: 19).

Für Photovoltaik werden je nach Szenario ähnliche Werte prognostiziert. So rechnet das Blue-Map Szenario, welches durch die IEA in der Energy Technology Perspective 2008 (ETP) veröffentlicht wurde, zwar nur mit einem Anteil von sechs Prozent an der globalen

Stromerzeugung in 2050 (IEA 2010b: 13). Doch eine neuere Studie der IEA sagt bis 2050 bereits einen Anteil von elf Prozent voraus (IEA 2010b: 14).

Die Aussichten dieser Studie werden durch die jüngsten PV-Wachstumsraten und damit verbundenen Kostenreduzierungen gestärkt. Vor allem Anreizsysteme, wie das EEG in Deutschland oder das Conto Energia in Italien, sorgen schon seit Jahren für große Wachstumsraten. Und auch 2011 kam es zu einem Anstieg des Marktvolumens um knapp 40 Prozent bzw. 27,4 GW gegenüber 2010 (NPD SOLARBUZZ 2012: o.S.). Durch diese Art der Förderung könnte die Netzparität, also die Wettbewerbsfähigkeit des selbst erzeugten Stroms mit dem Strom der beim Netzbetreiber eingekauft wird, in Ländern mit hoher solarer Einstrahlung und hohen Stromgestehungskosten bis 2020 erreicht werden (IEA 2010b: 14). Sollten zudem langfristige, günstige und ausgewogene politische Rahmenbedingungen für die Markteinführung und Technologieentwicklung von PV geschaffen werden, könnte sich die Photovoltaik nach den Annahmen der IEA wie folgt entwickeln. Bis zum Jahr 2020 wird mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 17% gerechnet, wodurch 2020 die kumulierte installierte Leistung 200 GW betragen wird. Wobei diese Prognose noch relativ konservativ ausfällt. Denn der Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan) der EU sieht allein in Europa bis 2020 einen Ausbau auf 400 GW vor (IEA 2010b: 14).

Von 2020 bis 2030 werden dann nach der IEA-Prognose die Wachstumsraten leicht auf 11% sinken und die globale PV-Leistung insgesamt auf 900 GW steigen. Pro Jahr würde zu dieser Zeit das Marktwachstum neu installierter Leistung bei über 100 GW liegen. Unter Berücksichtigung des Repowering von alten PV-Anlagen wird 2040 voraussichtlich mit einer kumulierten installierten Leistung von 2.000 GW gerechnet (IEA 2010b: 13). Und schlussendlich wird PV bis 2050 eine installierte Leistung von 3.000 GW, einen Stromertrag von 4.500 TWh und ein Anteil von elf Prozent an der globalen Stromerzeugung erreichen (IEA 2010b: 14).

7.2 Handlungsvorschläge

Durch die gewonnenen Ergebnisse ist es nun der DESERTEC FOUNDATION möglich, noch offensiver auf Regierungen und Entscheidungsträger zuzugehen, um ihnen die Bedeutung und die Möglichkeiten der Solartechnologie und besonders der Solarturmkraftwerke darzulegen. Außerdem lässt sich das gewonnene Kartenmaterial in der Öffentlichkeitsarbeit oder der Aufklärung in Schulen einsetzen. Bereits in Arbeit ist die Umsetzung eines Google Earth Plugins, das einem interessierten Nutzer das DESERTEC Konzept und die Potenziale der verschiedenen Energieträger vereinfacht darstellt.

Für Solarunternehmen sollten die Erkenntnisse Ansporn sein, die Realisierbarkeit von Solarturmkraftwerken und deren Kostenauswirkungen in rauem Terrain stärker zu erforschen. Zudem könnten die gewonnenen Ergebnisse in der Forschung Grundlage sein für vertiefende Analysen auf Mikro- oder Mesoebene. In Fokusregionen wie Ostasien, Lateinamerika oder Ozeanien besteht dahingehend noch Handlungsbedarf. Außerdem wird es wichtig sein, gerade in besonders begünstigten Regionen in denen die Solarenergie noch

keine große Bedeutung einnimmt, die Regierungen, potenzielle Investoren und die Bevölkerung von den Vorteilen zu überzeugen und entsprechende Rahmenbedingungen schnell umzusetzen.

Denn wie aufgezeigt liegt die größte Hürde nicht in der Technologie, sondern vor allem in der Politik und der Akzeptanz der Bevölkerung. Solange keine konkreten Rahmenbedingungen geschaffen werden, damit Stromabnahmen garantiert sind und das Risiko von privaten Investoren verringert wird, wird sich die Umsetzung verlangsamen und Klimaschutzziele können nicht erreicht werden. Aber durch die Nutzung der individuellen Vorteile der verschiedenen Technologien, durch die Vernetzung untereinander und durch die schrittweise Integration in existierende Versorgungssysteme können solare und regenerative Energieträger im Allgemeinen nicht nur einen entscheidenden Beitrag zur Stromversorgung leisten, sondern auch dabei helfen den CO₂-Ausstoß zu senken und den Klimawandel zu bremsen.

Literatur

AEE (AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN) (2010): Potenzialatlas der Erneuerbaren Energien 2020. <http://www.unendlich-viel-energie.de/fileadmin/content/Potenzialatlas%20%20Auflage%20Online.pdf> (Abgerufen am 12.01.2013).

AEE (AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN) (2012): Die Wasserkraftbranche im Jahr 2011. <http://www.unendlich-viel-energie.de/de/wasserkraft/detailansicht/article/10/die-wasserkraftbranche-im-jahr-2011.html> (Abgerufen am 29.01.2013).

BMU (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT) (2012): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung. http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_ee_zahlen_bf.pdf (Abgerufen am 26.01.2013).

BMVBS (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG) (2012): Genehmigungen für Offshore-Windenergieparks werden erleichtert. <http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2012/005-scheurle-bilanzkonferenz-bsh.html> (Abgerufen am 17.01.2013).

BILL, R. (2010): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. (Wichmann) Berlin.

BRÜCHER, W. (2009): Energiegeographie. Wechselwirkungen zwischen Ressourcen, Raum und Politik. (Gebr. Borntraeger) Berlin, Stuttgart.

BUNDESVERBAND DEUTSCHER BANKEN E.V. (2012): Die Weltwirtschaft 2050. Schwellenländer übernehmen Führungsrolle. <http://www.die-bank.de/finanzmarkt/die-weltwirtschaft-2050> (Abgerufen am 09.01.2013).

CIA (Central Intelligence Agency) (2012): The World Factbook. <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/xx.html> (Abgerufen am 09.01.2013).

CZEGKA, W., BEHREND, K. U. S. BRAUNE (2004): Die Qualität der SRTM-90m Daten und ihre Verwendbarkeit in GIS. http://www.geo.tu-freiberg.de/hydro/vorl_portal/gis_kurs/DGM_SRTM_2004.pdf (Abgerufen am 19.01.2013).

DESERTEC FOUNDATION (2012a): Die Fokusregion Ostasien. <http://www.desertec.org/de/globale-mission/ost-asien> (Abgerufen am 15.01.2013).

DESERTEC FOUNDATION (2012b): Über die DESERTEC Foundation. <http://www.desertec.org/de/organisation> (Abgerufen am 15.01.2013).

DESERTEC FOUNDATION (2012c): Vorteile von DESERTEC. <http://www.desertec.org/de/konzept/vorteile/> (Abgerufen am 15.01.2013).

DII GMBH (2012): Über uns. <http://www.dii-eumena.com/de/home/ueber-uns.html> (Abgerufen am 15.01.2013).

DLR (DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT) (2005): MED - CSP. Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region. http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/MED-CSP_Full_report_final.pdf (Abgerufen am 29.01.2013).

DLR (DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT) (2012): Thermische Solaranlagen. <http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10615> (Abgerufen am 29.01.2013).

EPIA (EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION) (2012): Global Market Outlook for Photovoltaics until 2016. http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/Global-Market-Outlook-2016.pdf (Abgerufen am 29.01.2013).

EUROPARC DEUTSCHLAND (2010). Richtlinien für die Anwendung der IUCN-Managementkategorien für Schutzgebiete. http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/gebietsschutz/IUCN_Kat_Schutzgeb_Richtl_web.pdf (Abgerufen am 29.01.2013).

FABBI, F. (2003): Bodenbedeckung der Erde: Außergewöhnliches Satellitenbild der Erdvegetation. <http://athene.innovations-report.de/html/berichte/geowissenschaften/bericht-23718.html> (Abgerufen am 29.01.2013).

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT (2011): Die Energiewende als Treiber für die Wirtschaft. <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2011/mai/regenerative-energien-wirtschaft.html> (Abgerufen am 29.01.2013).

FROMME, J. (2005): Räumliche Implikationen von Regenerativ - Energieszenarien für die langfristige Entwicklung des deutschen Stromversorgungssystems. <https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/20152/1/Frommeohneunt.pdf> (Abgerufen am 28.01.2013).

GROPP, T. U. G. KNIES (2011): DESERTEC-Konzept. In: Deutsche Gesellschaft Club of Rome e. V. in Kooperation mit der DESERTEC Foundation: Der DESERTEC Atlas. Weltatlas zu den erneuerbaren Energien. (CEP) Hamburg, S. 14–21.

GWEC (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL) (2012): Global Wind Report. Annual market update 2011. http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual_report_2011_lowres.pdf (Abgerufen am 12.01.2013).

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY) (2010a): Technology Roadmap. Concentrating Solar Power. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp_roadmap.pdf (Abgerufen am 29.01.2013).

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY) (2010b): Technology Roadmap. Solar photovoltaik energy. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/pv_roadmap.pdf (Abgerufen am 29.01.2013).

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY) (2011): Electricity/Heat. <http://www.iea.org/stats/prodresult.asp?PRODUCT=Electricity/Heat> (Abgerufen am 07.01.2013).

IGA (INTERNATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION) (2010): Geothermal Web Database. http://vmigg.iit.cnr.it/SpagoBI/servlet/AdapterHTTP?PAGE>LoginPage&NEW_SESSION=TRUE (Abgerufen am 09.01.2013).

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2012): Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_Full_Report.pdf (Abgerufen am 29.01.2013).

JARVIS, A., REUTER, H.I., NELSON, A. U. E. GUEVARA (2008): Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). <http://srtm.csi.cgiar.org> (Abgerufen am 09.01.2013).

JRC (EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE) (2003): The Global Land Cover Map for the Year 2000. <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php> (Abgerufen am 09.01.2013).

KALTSCHMITT, M. U. D. THRÄN (2009): Biomasse im Energiesystem. IN: KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H. U. H. HOFBAUER (Hg.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. (Springer) Heidelberg, Dordrecht, Landon, New York, S. 7-36.

KOHL, H. (2008): Regenerative Energieträger im Aufwind. Entwicklung der erneuerbaren Energien. IN: BÜHRKE, T. U. R. WENGENMAYR (Hg.): Erneuerbare Energie. Alternative Energiekonzepte für die Zukunft. (WILEY-VCH) Weinheim, Schwetzingen, Frankfurt, S. 4-11.

KONRAD, F. (2008): Planung von Photovoltaik-Anlagen. Grundlagen und Projektierung. (Vieweg + Teubner) Wiesbaden.

KREWITT, W., NAST, M. U. J. NITSCH (2005): Energiewirtschaftliche Perspektiven der Fotovoltaik. http://www.dlr.de/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/PV_Studie_Langfassung.pdf (Abgerufen am 09.01.2013).

NASA – SURFACE METEOROLOGY AND SOLAR ENERGY (SSE) (2008): A renewable energy resource web site. <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (Abgerufen am 14.01.2013).

NPD SOLARBUZZ (2012): World Solar Photovoltaic Market Grew to 27.4 Gigawatts in 2011, Up 40% Y/Y. <http://www.solarbuzz.com/news/recent-findings/world-solar-photovoltaic-market-grew-274-gigawatts-2011-40-yy-0> (Abgerufen am 14.01.2013).

PASCHEN, H., OERTEL, D. U. R. GRÜN WALD (2003): Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland. <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab084.pdf> (Abgerufen am 17.01.2013).

PIOT, M. (2006): 5. Exkurs: Potenzialbegriffe. http://www.warstein.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/Nachrichten/Piot_Potenzialdefinitionen_v3.pdf (Abgerufen am 17.01.2013).

PITZ-PAAL, R. (2008): Solarthermische Kraftwerke. Wie die Sonne ins Kraftwerk kommt. IN: BÜHRKE, T. U. R. WENGENMAYR (Hg.): Erneuerbare Energie. Alternative Energiekonzepte für die Zukunft. (WILEY-VCH) Weinheim, Schwetzingen, Frankfurt, S. 25 -31.

PWC – PRICEWATERHOUSECOOPERS (2011): 100% renewable electricity. A roadmap to 2050 for Europe and North Africa. http://www.pwc.co.uk/en_UK/uk/assets/pdf/100-percent-renewable-electricity.pdf (Abgerufen am 10.01.2013).

QUASCHNING, V. (2010): Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe – Techniken – Anlagenplanung – Wirtschaftlichkeit. (Hanser) München.

QUASCHNING, V. (2011): Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung – Simulation. (Hanser) München.

ROGERS, H. (2007): Current Thinking.

http://www.nytimes.com/2007/06/03/magazine/03wwln-essay-t.html?_r=0 (Abgerufen am 29.01.2013).

SATTLER, C., BÜHRING, A. U. J. LINßEN (2006): Solare Brennstoffe – Erzeugung, Nutzungsverfahren und Umwandlungseffizienzen.

http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2006/th2006_03_02.pdf (Abgerufen am 29.01.2013).

SOLARPLAZA (2012): World's Largest Solar PV Project, Agua Caliente, Achieves 250 MW.

<http://www.solarplaza.com/news/worlds-largest-solar-pv-project-agua-caliente-achi> (Abgerufen am 29.01.2013).

STADT AACHEN (2010): Solarkataster der Stadt Aachen – Berechnungsgrundlagen.

http://www.aachen.de/DE/stadt_buerger/energie_klimaschutz/solarkataster/berechnungsgrundlagen/index.html (Abgerufen am 29.01.2013).

SÜDDEUTSCHE ZEITUNG (2012): Klimakonferenz verlängert Kyoto-Protokoll bis 2020.

<http://www.sueddeutsche.de/wissen/welt-klimagipfel-in-doha-klimakonferenz-verlaengert-kyoto-protokoll-bis-1.1545374> (Abgerufen am 15.01.2013).

TAGESSCHAU (2013): Energiewende als Exportschlager? IRENA-Konferenz in Abu Dhabi.

<http://www.tagesschau.de/ausland/altmaier-abudhabi100.html> (Abgerufen am 17.01.2013).

TESKE, S. (2012): Ernergy [r]evolution: a sustainable world energy outlook.

<http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2012/Energy%20Revolution%202012/ER2012.pdf> (Abgerufen am 29.01.2013).

THE WHITE HOUSE (2011): Weekly Address: "Instead of Subsidizing Yesterday's Energy

Sources, We Need to Invest in Tomorrow's". <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2011/04/23/weekly-address-instead-subsidizing-yesterdays-energy-sources-we-need-inv> (Abgerufen am 17.01.2013).

THE WORLD BANK (2012): World Bank to Boost Access to Electricity and Clean Fuels, Renewable Energy and Energy Efficiency.

<http://www.worldbank.org/en/news/2012/06/21/world-bank-boost-access-electricity-clean-fuels-renewable-energy-efficiency> (Abgerufen am 15.01.2013).

TRIEB, F., O'SULLIVAN, M., PREGGER, T., SCHILLINGS, C. U. W. KREWITT (2009a): Characterisation of Solar Electricity Import Corridors from MENA to Europe. Potential, Infrastructure and Cost.

http://www.dlr.de/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Solar_import_DLR_2009_07.pdf (Abgerufen am 29.01.2013).

TRIEB, F., SCHILLINGS, C., O'SULLIVAN, M., PREGGER, T. U. C. HOYER-KLICK (2009b): Global Potential of Concentrating Solar Power.
http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Solar_Paces_Paper_Trieb_Final_Colour_corrected.pdf (Abgerufen am 29.01.2013).

UNIVERSITÄT ROSTOCK (2002): Interpolation. <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/einzel.asp?ID=991> (Abgerufen am 29.01.2013).

USDA – US DEPARTMENT OF AGRICULTURE (2005): Global Soil Regions Map.
<http://soils.usda.gov/use/worldsoils/mapindex/order.html> (Abgerufen am 29.01.2013).

WATTER, H. (2011): Regenerative Energiesysteme. Grundlagen, Systemtechnik und Anwendungsbeispiele aus der Praxis. (Vieweg + Teubner) Wiesbaden.

WESSLAK, V. U. T. SCHABBACH (2009): Regenerative Energietechnik. (Springer) Heidelberg, Dordrecht, London, New York.

WINDISCH, H. (2008): Thermodynamik: Ein Lehrbuch für Ingenieure. (Oldenbourg) München.

WOUTERS, F. (2007): Potenziale passiver und aktiver Solarenergienutzung in den Stadt-
raumtypen. IN: EVERDING, D. (Hg.): Solarer Städtebau. Vom Pilotprojekt zum planerischen
Leitbild. (W. Kohlhammer) Stuttgart, S. 229 - 245.