Universität Augsburg, Institut für Geographie

PLANUNG EINER STROMLEITUNGSTRASSE VON HASSI R'MEL (ALGERIEN) NACH BRÜSSEL

Katrin Walter, Stephan Bosch

Zusammenfassung: Ein Überangebot an solarer Einstrahlung im Norden Afrikas sowie ein hoher Energieverbrauch in den Wirtschaftszentren Mitteleuropas geben Anlass dazu, die regenerative Energieversorgung interkontinental zu vernetzen. Grundlegend hierfür ist der Ausbau leistungsstarker Stromleitungstrassen. Allein dadurch lässt sich die Energie wirtschaftlich von den Orten der Produktion zu den weit entfernten Verbrauchszentren transportieren. Bislang liegen jedoch wenige Erkenntnisse darüber vor, wie ein optimaler Trassenverlauf zu ermitteln ist. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird deshalb eine Methodik vorgestellt, die es ermöglicht, den Stromtransport zwischen Nordafrika und Europa räumlich zu optimieren. Hierzu werden die entscheidenden räumlichen Einflussfaktoren bei der Planung von Stromleitungstrassen erfasst und mittels GIS dargestellt. Beispielhaft wird am Ende der Studie der optimale Verlauf einer Stromtrasse zwischen dem algerischen Hybridkraftwerksstandort Hassi R'Mel und dem Verbrauchszentrum Brüssel berechnet und visualisiert.

Schlüsselwörter: Stromleitungstrasse, Energietransport, Kosten-Distanz-Analyse, Kartographie, Visualisierung

PLANNING OF A POWER LINE CORRIDOR FROM HASSI R'MEL (ALGERIA) TO BRUSSELS

Abstract: An oversupply of solar radiation in Northern Africa as well as high energy consumption in the economic centers of Central Europe give reason to an international cross-linking of regenerative power supply. A fundamental precondition for this purpose is the development of high-capacity power lines. By this means only the energy can be economically transferred from the sites of its production to the far-off centers of energy consumption. To date, however, there is little knowledge about how to identify the ideal course of the power line corridor. This study therefore presents a method enabling spatial optimization of the power transfer between North Africa and Europe. Thus the key spatial factors for the planning of power line corridors will be identified and depicted using GIS. At the end of the study, its application will be demonstrated by the calculation of an optimal course for a power line corridor between the Algerian integrated solar combined-cycle (ISCC) plant facility Hasi R'Mel and the power consumption center of Brussels.

Keywords: Power line corridor, power transfer, cost-distance-analysis, cartography, visualization

Autoren

Dipl.-Geogr. Katrin Walter
Dr. Stephan Bosch
Universität Augsburg
Institut für Geographie
Alter Postweg 118
D-86159 Augsburg
E: katrin.walter@geo.uni-augsburg.de
stephan.bosch@geo.uni-augsburg.de

1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Die Demokratisierungsprozesse innerhalb der Staaten Nordafrikas könnten das Fundament einer sicheren Energieversorgung auf Basis der Sonnenenergie bilden und die Zusammenarbeit mit den europäischen Nachbarn erleichtern. Dies ist zumindest die Hoffnung der Protagonisten des ambitionierten Desertec-Konzepts, denen oftmals unterstellt wird, es handle sich bei dieser Vision des regenerativen Wüstenstroms um ein neokolonialistisches Format. Dieser Verdacht wurde durch die Tatsache genährt, dass nur einer der 13 Gründergesellschafter der Desertec Industrial Initiative (Dii) – und zwar das Unternehmen Cevital aus Algerien – aus einem potenziellen Erzeugerland stammte. Den Rest stellten überwiegend deutsche Großunternehmen wie E.ON, RWE, Schott Solar und Siemens dar, deren Interesse am nordafrikanischen Kontinent primär aus einem industriepolitischen Kalkül entsprang (Schmitt 2012, S. 257 f.). Dieser skeptischen Perspektive kann jedoch entgegengehalten werden, dass laut Konzeption v. a. die Erzeugerländer vom Gros der Wertschöpfungskette profitieren sollen, schließlich gehe es um den Aufbau lokaler Industrien sowie um den Transfer technischen Wissens (Desertec Foundation 2009; DLR 2009a; Löfken 2011a). Darüber hinaus wird der überwiegende Anteil des produzierten Sonnenstroms in den MENA-Ländern verbleiben und lediglich ein Teil davon zur Deckung des europäischen Strombedarfs herangezogen. Staaten wie Marokko realisieren bereits unabhängig von Desertec einen eigenen Solarplan und denken dabei auch über den Export von Stromanteilen nach (Löfken 2011b, S. 27). Fraglich ist jedoch, wie und v. a. entlang welcher räumlichen Korridore dieser Stromanteil von den nordafrikanischen Produktionsstätten zu den entfernt liegenden Verbrauchszentren Mitteleuropas transportiert werden soll. In jedem Fall ist der Aufbau eines effizienten Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetzes (HGÜ) grundlegend, denn diese Technologie ermöglicht es, den Übertragungsverlust auf 2–4 % pro 1.000 km zu reduzieren (Schmitt 2012, S. 246). Verbrauchszentren in einer Entfernung zwischen 3.000–5.000 km könnten dadurch wirtschaftlich mit regenerativem Wüstenstrom versorgt werden. Aus diesem Grund ist der Fokus der Dii darauf gerichtet, kostengünstige Trassen für den Ausbau der HGÜ-Leitungen zu identifizieren. Doch auch die geographische Energieforschung muss sich durch diese Fragestellung angesprochen fühlen, da sie mit den Geoinformationssystemen über geeignete Instrumente zur effizienten räumlichen Planung von HGÜ-Leitungen verfügt (Walter & Bosch 2012).

Der Bau von leistungsstarken Stromtrassen zwischen Nordafrika und Europa ist abgesehen von zwei Studien des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2006 u. 2009b) wissenschaftliches sowie technisches Neuland und bedarf daher GIS-gestützter Vorarbeiten. Nicht zuletzt sind diverse räumliche Faktoren in die Planung mit einzubeziehen. Die Stromübertragung mittels HGÜ-Leitungen verursacht gravierende Eingriffe in Kultur- und Naturlandschaft und ist für sensible Gebiete daher auszuschließen. Durch GIS können die bestehenden landschaftlichen Ausprägungen miteinander in Verbindung gebracht und so geeignete Trassenverläufe ermittelt werden. Hierzu gilt es in einem ersten Schritt, die Stromverbrauchszentren Europas, also die Endpunkte der Stromleitungstrassen, zu identifizieren. Des Weiteren müssen sämtliche Restriktionsflächen für Stromleitungstrassen auf das Untersuchungsgebiet projiziert werden, sodass die prinzipiell nutzbaren räumlichen Korridore sichtbar hervortreten. Schließlich wird unter Einbeziehung spezifisch festgelegter Kostenfaktoren beispielhaft der optimale Verlauf einer Stromtrasse zwischen dem Kraftwerksstandort Hassi R'Mel sowie dem Verbrauchszentrum Brüssel berechnet und visualisiert. Der Mehrwert des vorliegenden Beitrags gründet einerseits in der höheren Auflösung der verwendeten Geodaten und damit in einer detaillierten Beschreibung geeigneter sowie ungeeigneter Gebiete. Andererseits werden der technische Fortschritt sowie der Standortfaktor Akzeptanz in die GIS-Analyse miteinbezogen.

2 STROMPRODUKTION UND -VERBRAUCH

2.1 WETTBEWERB DER PRODUKTIONSTECHNOLOGIEN

Auf Initiative des Club of Rome wurde in den Jahren 2003-2007 das Desertec-Konzept entwickelt und im Jahr 2009 vom Rückversicherer Munich RE sowie in Absprache mit zwölf namhaften Unternehmen aufgegriffen. Das vorrangige Ziel dabei ist es, regenerativen Strom in den sonnenreichen Gebieten der Erde zu generieren und damit sowohl die Erzeugerländer als auch entfernt liegende Verbrauchszentren zu versorgen. Entsprechend der vielfältigen nationalen Potenziale innerhalb der EUMENA-Region sollen langfristig alle Formen von erneuerbaren Energien miteinbezogen und über ein interkontinentales Stromnetz verbunden werden (Dannenberg et al. 2012, S. 40). Bislang ist der Fokus jedoch auf die Nutzung von Sonnenenergie gerichtet. Dies ist nicht zuletzt dem großen Potenzial geschuldet, denn die Wüstengebiete der Erde empfangen innerhalb von sechs Stunden mehr Energie auf Basis der solaren Einstrahlung als die gesamte Menschheit innerhalb eines Jahres benötigt. Angesichts von 3.000 Sonnenstunden im Jahr ergibt sich je Quadratmeter eine Ausbeute von 2.500 kWh (Wandler 2011, S. 94). Dieses Potenzial wird bislang v. a. mittels konzentrierender solarthermischer Technologien (CSP), wie bspw. Parabolrinnen-, Fresnel- und Solarturmkraftwerke, erschlossen. Vorteilhaft an CSP-Technologien ist, dass durch Koppelung mit Wärmespeichern (z. B. geschmolzenes Salz, Beton) eine grundlastfähige Energieversorgung möglich ist (Bosch 2010, S. 28 ff.; Heuer 2011; Quaschning 2011; Trieb 2012). Es ist jedoch zu konstatieren, dass der Wettbewerbsdruck seitens der Photovoltaik stetig anwächst (Rentzing 2011, S. 50; Schwarzburger 2012a u. 2012b). Dies ist im Wesentlichen auf die weitaus höhere Marktreife der Photovoltaik zurückzuführen, denn aufgrund einer weltweit installierten Leistung von 70 Gigawatt (GW) gegen Ende des Jahres 2011 gelang es der Branche, Skaleneffekte zu erzielen und dadurch Stromgestehungskosten von weniger als 10 ct/kWh auf sonnenreichen Standorten (2.500 kWh/m²/a) zu realisieren. Demgegenüber belief sich die globale Gesamtleistung der konzentrierenden Solarthermie auf nur 2 GW, zu wenig, um über Massenproduktion und Standardisierung konkurrenzfähig zu bleiben. Die Gestehungskosten von CSP-Technologien liegen immer noch zwischen 18 und 24 ct/kWh. Damit haben konzentrierende solarthermische Systeme ihre ursprüngliche Anziehungskraft und Hoheit (Lessner 2010) in den Wüstengürteln der Erde verloren (Heup 2012).

Unabhängig davon, ob das Energiepotenzial Nordafrikas nun mittels Solarthermie oder Photovoltaik erschlossen wird, und auch unabhängig davon, ob der Ausbau dieser Technologien in staatlicher Eigenregie oder im Rahmen einer länderübergreifenden Zusammenarbeit erfolgt, besteht das Ziel, zumindest einen Teil des erzeugten Stroms nach Europa zu transportieren. Hierzu bedarf es des Einsatzes von HGÜ-Leitungen, die sowohl durch das Meer als auch an Land zu verlegen sind. Mittels dieser Leitungen lässt sich die Energie in Form von Gleichstrom mit Spannungen von bis zu 150 kV und einer Kapazität von 500 MW bei relativ geringen Verlusten über große Distanzen transportieren. Es ist davon auszugehen, dass bis zum Jahr 2020 Gleichstromleitungen mit einer Spannung von 500 kV sowie einer Kapazität von 2.000 MW der Normalfall sein werden. Bereits heute existieren leistungsstarke Stromtrassen, wie bspw. die im Jahre 2008 fertiggestellte HGÜ-Leitung NorNed – ein Seekabel zwischen Norwegen und den Niederlanden, das mit einer Länge von 580 km das weltweit längste ist. Im Jahr 2011 wurden die Bauarbeiten zu BritNed, einer HGÜ-Leitung zwischen Großbritannien und den Niederlanden, abgeschlossen (ABB AB 2008; Zimmermann & Weinhold 2011, S. 23).

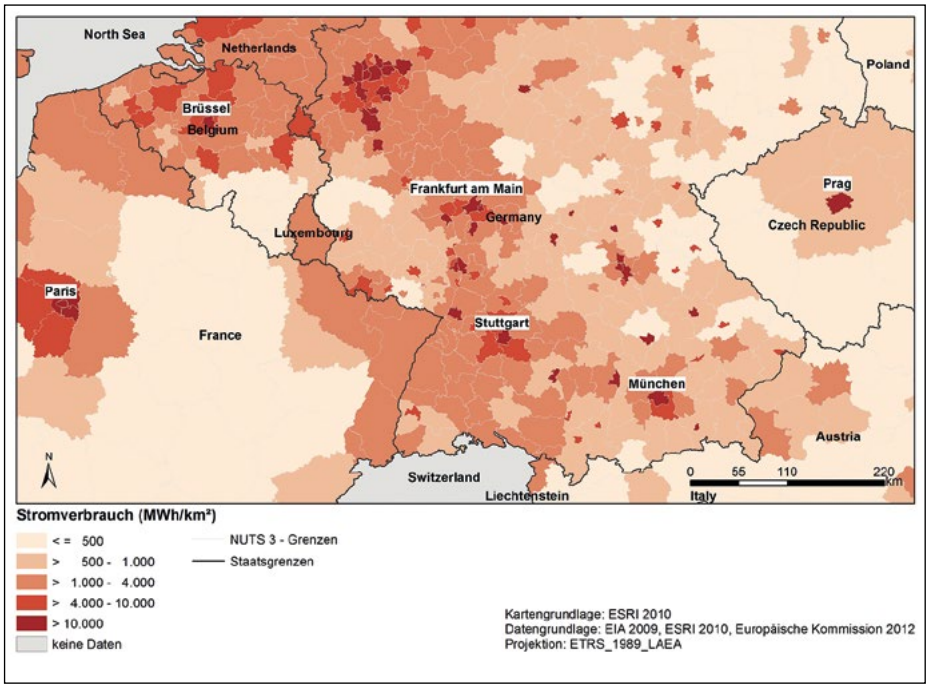

Abbildung 1: Stromverbrauchszentren auf NUTS-3-Ebene (eigene Darstellung)

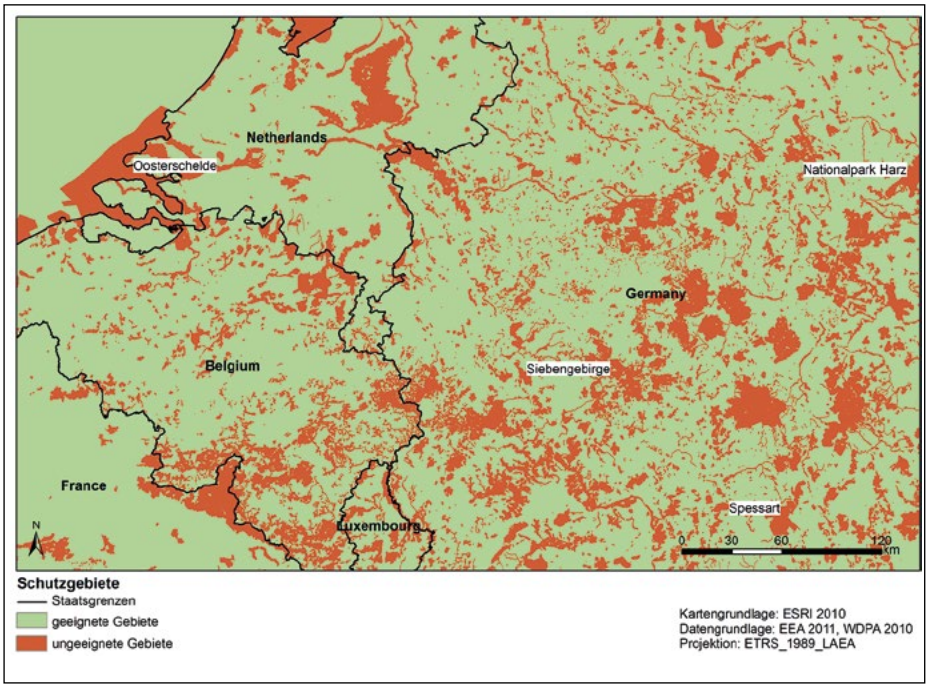

Abbildung 2: Ausschluss von Schutzgebieten (eigene Darstellung)

2.2 ERMITTLUNG DER VERBRAUCHSZENTREN

Die Zentren des Energieverbrauchs, d. h. jene Teilräume, die einen signifikant hohen Stromverbrauch aufweisen, bilden die Endpunkte der Stromleitungstrassen. Die Studie richtet den Fokus dabei auf die Zentren der Europäischen Union, innerhalb derer gleiche, räumlich hierarchisch aufgebaute Einheiten, die sog. „Nomenclature of Statistical Territorial Units" (NUTS) bestehen (EU 2003). Die NUTS-0-Ebene repräsentiert einen Mitgliedstaat der EU, der sich wiederum in drei weitere Ebenen unterteilen lässt. Dabei steht NUTS 1 (3–7 Mio. Einwohner) für größere Regionen (z. B. Bundesländer in Deutschland oder Zone d'études et d'aménagement du territoire – ZEAT – in Frankreich), NUTS 2 (0,8-3 Mio. Einwohner) für mittelgroße Regionen (z. B. Regierungsbezirke in Deutschland oder Régions in Frankreich) und NUTS 3 (0,15–0,8 Mio.Einwohner) für kleinere Regionen (z. B. Landkreise bzw. kreisfreie Städte in Deutschland oder Departements in Frankreich) (Europa 2008).

Um die Stromverbrauchszentren zu ermitteln, ist es notwendig, den Gesamtstromverbrauch auf einer möglichst kleinen räumlichen Ebene zu erfassen. Über eine Gewichtung lassen sich aus den verfügbaren NUTS-0-Werten Verbrauchswerte für die NUTS-3-Ebene ableiten. Hierfür wird in einem ersten Schritt der Stromverbrauch eines EU-Landes (NUTS-0-Ebene) auf den Industrie-, Dienstleistungs- und Haushaltssektor verteilt. Die genaue Quantifizierung des Stromverbrauchs auf NUTS-3-Ebene erfolgt im Bereich des Industrie- und Dienstleistungssektors über die jeweilige Bruttowertschöpfung. Im Bereich der Haushalte dient die Bevölkerungszahl als Berechnungsgrundlage (Leuthold et al. 2008, S. 18 f.). Hierbei wird angenommen, dass das Verhältnis der Bruttowertschöpfung in einer NUTS-3-Einheit zur Gesamtbruttowert-

schöpfung (NUTS-0-Einheit) dem Verhältnis des Stromverbrauchs in einer NUTS-3-Einheit zum Gesamtstromverbrauch (NUTS 0) entspricht. Aus diesem Grund wird zunächst der Anteil der Bruttowertschöpfung des Industriesektors einer NUTS-3-Einheit an der gesamtstaatlichen industriellen Bruttowertschöpfung bestimmt. Danach wird dieser Wert mit dem industriellen Stromverbrauch des jeweiligen Mitgliedstaats multipliziert. Als Ergebnis erhält man den Stromverbrauch des Industriesektors in einer NUTS-3-Einheit. Diese Vorgehensweise gilt gleichermaßen für den Dienstleistungssektor. Um den Stromverbrauch der Haushalte bestimmen zu können, wird der Anteil der Bevölkerung einer NUTS-3-Einheit an der Gesamtbevölkerung ermittelt und mit dem Gesamtstromverbrauch des Haushaltssektors multipliziert. In einem letzten Schritt werden die Werte für die drei Sektoren aufaddiert, sodass für alle NUTS-3-Einheiten eine zuverlässige Schätzung der Stromverbräuche vorliegen. Werden die Ergebnisse noch auf Quadratkilometer normiert, ist es möglich, die Werte zu klassifizieren und die NUTS-Einheiten aller Länder zu vergleichen (siehe Abbildung 1).

3 ENTWICKLUNG DER AUSSCHLUSSGEBIETSMASKEN

Von essenziellem Wert für die GIS-Analyse ist es, die zentralen Ausschlussfaktoren für die Planung von Stromtrassen zu erfassen, zu definieren sowie in guter Qualität zu visualisieren. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden diesbezüglich folgende Standortfaktoren herangezogen: Schutzgebiete an Land und im Wasser, Landnutzungen, bathymetrische Daten (Meerestiefendaten) sowie aus Reliefdaten ermittelte Hangneigungen. Zur Ermittlung des optimalen Trassenverlaufs wird für die restriktionsfreien Gebiete schließlich ein Kostenlayer erstellt, der sich aus einer Gewichtung der einzelnen Standortfaktoren sowie zusätzlichen sozioökonomischen Faktoren ergibt.

3.1 SCHUTZGEBIETE

Die aus dem Trassenbau resultierenden landschaftlichen Eingriffe sind in vielen Naturschutzgebieten unzulässig. Es ist daher angebracht, ökologisch sensible Areale für die Leitungsverlegung auszuschließen. Im Blickpunkt der GIS-Analyse stehen dabei die Natura 2000-Daten, ein Datensatz zu Schutzgebieten der EU unter den Maßgaben der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH) und der Vogelschutzrichtlinie (EEA 2011). Des Weiteren werden Daten der World Database on Protected Areas genutzt. Neben terrestrischen beinhalten diese auch marine Schutzgebiete. Die Herausforderung der GIS-Analyse besteht darin, für die jeweilige Schutzgebietsart bzw. -kategorie abzuwägen, inwieweit der Bau einer Leitungstrasse raumverträglich ist. Hierbei sind die Daten der IUCN, die insgesamt sieben internationale Schutzkategorien enthalten (1a, 1b, 2, 3, 4, 5 und 6), von entscheidender Bedeutung (vgl. IUCN 2012). Die Kategorien 5 und 6 bspw. werden hinsichtlich der Möglichkeit der Verlegung von Leitungstrassen als geeignet eingestuft. Kategorie 5 steht dabei für den Raumtyp *„Geschützte Landschaft / Geschütztes Marines Gebiet"*, Kategorie 6 für den Raumtyp *„Ressourcenschutzgebiet mit Management"* (WWF Deutschland 2008). Länderspezifisch treten meist auch Natur- und Regionalparks als für Leitungstrassen geeignete Schutzgebiete hervor. Auszuschließen sind in jedem Falle Nationalparks, Naturreservate sowie *„Protected Areas"*, wie bspw. der Nationalpark Harz, der Nationalpark Oosterschelde, das Naturschutzgebiet Siebengebirge oder der Naturpark Spessart mit seinen einzelnen Naturschutzgebieten. Um die Akzeptanz des Trassenbaus zu erhöhen, werden für die Ausschlussgebietsmaske (siehe Abbildung 2) zusätzlich Abstandsflächen von einigen hundert bis wenigen tausend Metern festgelegt. Dadurch wird verhindert, dass Leitungen direkt an den Schutzgebietsgrenzen verlegt und so in der öffentlichen Wahrnehmung als ökologisch bedenklicher Eingriff gelten. Einheitliche Regelungen zu Abstandsflächen gibt es jedoch nicht, da bislang kaum Erfahrungen hinsichtlich des Standortfaktors Akzeptanz vorliegen.

3.2 LANDNUTZUNGEN

Um die Oberflächenstrukturen des Untersuchungsraums erfassen zu können, werden Landnutzungsdaten in die GIS-Analyse miteinbezogen. Als Datengrundlage dient hierbei der Corine-Landcover-Datensatz der European Environment Agency (EEA), der insgesamt 44 Landnutzungsklassen beinhaltet. Diese lassen sich auf fünf wesentliche Kategorien – *„bebaute Flächen"*, *„landwirtschaftliche Flächen"*, *„Wälder und naturnahe Flächen"*, *„Feuchtflächen"* und „Wasserflächen" – reduzieren (DLR 2012). Ein elementares Ziel der vorliegenden Studie bestand darin, jene Gebiete zu identifizieren, die für die Verlegung von HGÜ-Leitungen ungeeignet sind. Da es innerhalb der EU keine einheitlichen Regelungen gibt, werden die ausgeklügelten raumordnerischen Bestimmungen der Bundesrepublik Deutschland auf die EU übertragen. So werden Gebiete der Kategorie *„durchgängig städtische Prägung"* (DLR 2012), wie bspw. Basel oder Lyon, ausgeschlossen. Darüber hinaus werden die maximal möglichen Ausdehnungsareale der Alpengletscher sowie Wasserflächen (z. B. Genfer See, Bodensee) dem Standortsuchraum entzogen. Die Restriktionsflächen werden auch hier um Abstandsflächen von einigen hundert bis wenigen tausend Metern erweitert. Als Ergebnis liegt die zweite Ausschlussgebietsmaske vor (siehe Abbildung 3).

3.3 BATHYMETRIE

Für den Transport des Regenerativstroms von Nordafrika nach Europa ist es notwendig, einen erheblichen Teil der Trassen durch das Mittelmeer zu planen. Prinzipiell ist die Trassenverlegung durch das Meer zwar aufwendiger und mit höheren Kosten verbunden, als dies auf dem Landweg der Fall wäre. Politisch instabile Länder wie Ägypten, Israel, Libanon und Syrien können jedoch umgangen werden. Es ist darüber hinaus höchst fraglich, ob Marokko dazu bereit ist, als Transitland für Solarstrom aus Richtung Algerien zu fungieren. Die marokkanische Solarenergie-Agentur Masen (Moroccan Agency for Solar Energy) wurde nicht zuletzt mit dem Ziel gegründet, sich von Energieimporten unabhängig zu machen und langfristig sogar selbst als Solarstromexporteur für den europäischen Strommarkt aufzutreten. Hierzu ist der Ausbau von 2.000 MW Kraftwerksleistung bis zum Jahr 2019 geplant. Ende 2012 wurde die Realisierung des 160-MW-Parabolrinnenkraftwerks Ouarzazate, das bis zum Jahr 2015 eine Gesamtkapazität von 500 MW erreichen soll, initialisiert. (Löfken 2011b, S. 27; Schmitt 2012, S. 258). Zudem erscheint die Planung von HGÜ-Leitungen über die südwesteuropäische Passage aufgrund der abwehrenden Haltung Frankreichs als problematisch. Der staatlich gelenkte Energiekonzern Électricité de France (EDF) ist primär daran interes-

siert, den selbst erzeugten Atomstrom nach Mitteleuropa zu transferieren. Frankreichs Regierung scheut den lukrativen Solar- und Windstrom aus dem energiereichen Süden, der überdies zu größeren Schwankungen im Stromnetz führen würde (Zimmermann & Weinhold 2011, S. 18).

Mittels den derzeit zur Verfügung stehenden Technologien ist es möglich, Stromleitungen in einer Meerestiefe von bis zu –2.000 m zu verlegen (siehe Abbildung 4). Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Technik in den nächsten Jahren weiter ausreifen wird und den Zugang zu tieferen Bereichen des Meers erlaubt. Im Rahmen der GIS-Analyse wird deshalb von einem Szenario ausgegangen, in dem nur jene Bereiche des Mittelmeers ausgeschlossen werden, die Tiefen von mehr als –3.000 m aufweisen (siehe Abbildung 5). Im Allgemeinen vergrößert sich das Standortpotenzial im Mittelmeer durch diese Variation erheblich. Die Auswirkungen unterschiedlicher Meerestiefen auf den in dieser Studie berechneten Verlauf sind jedoch marginal (siehe Abbildung 7), da der Korridor über Sardinien in jedem Fall durchgängig ist.

Die GIS-Analyse offenbart, dass bei der Szenarioberechnung (siehe Abbildung 5) nur wenige Gebiete des Mittelmeers auszuschließen sind. Problematisch ist vielmehr, dass diese wenigen Ausschlussgebiete fast nahtlos ineinander übergehen und damit erhebliche räumliche Barrieren darstellen. Speziell das östliche Mittelmeer ist kaum durchlässig. Auch der südliche Bereich des Ionischen Meers sowie Teile des Libyschen Meers werden als ungeeignete Standorte für die Verlegung von Seekabeln ausgewiesen. Des Weiteren ergeben sich kleine Ausschlussgebiete im Tyrrhenischen Meer und im südöstlichen Mittelmeer (siehe Abbildung 5). Im westlichen Mittelmeer ist die Kabelverlegung hingegen weitestgehend möglich. Attraktiv ist die Verlegung einer Leitung über die Straße von Gibraltar, nicht zuletzt besteht dort die kürzeste Verbindung (14 km) zwischen dem afrikanischen und europäischen Kontinent. An dieser Meerenge wurde bereits ein Seekabel platziert, dessen Kapazität jedoch in keiner Weise ausreicht, um die zu erwartenden Strommengen aufnehmen zu können. Da der Landweg weniger kostenintensiv ist, erscheint es darüber hinaus als angebracht, Stromtrassen von Tunesien oder Algerien über Sardinien und Korsika in Richtung Italien zu verlegen. Denkbar ist auch der Weg von Tunesien über Sizilien nach Norditalien.

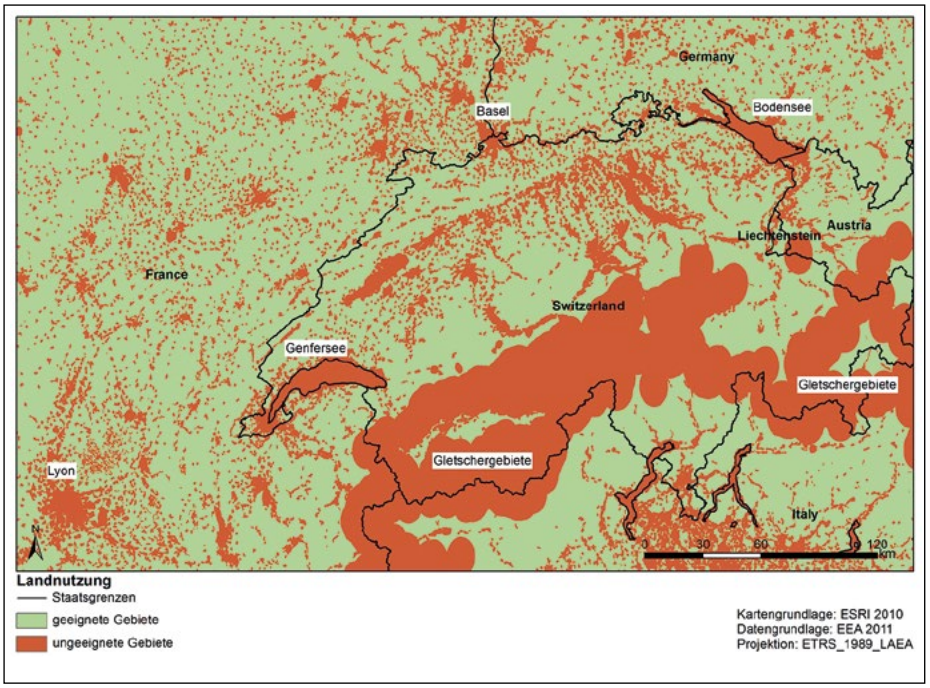

Abbildung 3: Ausschlussgebiete Landnutzung (eigene Darstellung)

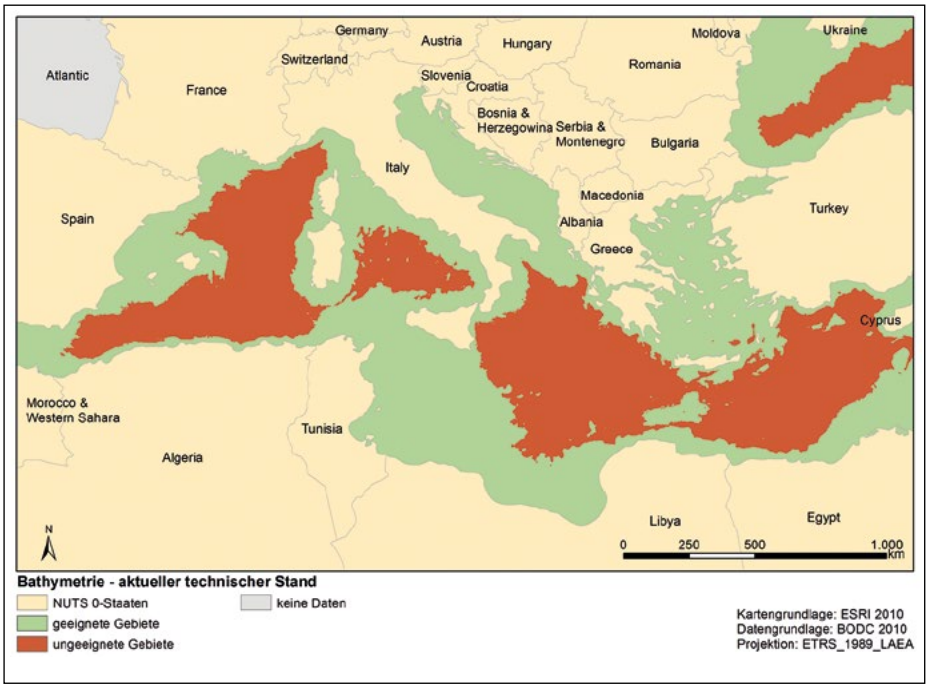

Abbildung 4: Ausschlussgebiete Bathymetrie nach aktuellem technischen Stand (eigene Darstellung)

3.4 HANGNEIGUNGEN

Da steile Verläufe von Stromtrassen zu vermeiden sind, ist es in einem weiteren Schritt notwendig, die Reliefenergie mit in die GIS-Analyse einzubeziehen. Hangneigungen von über 100 % (45°) gelten dabei als ungeeignet (siehe Abbildung 6), denn der Bau von HGÜ-Leitungen ist unter diesen Bedingungen mit zu hohen Kosten verbunden bzw. technisch nicht möglich. Zu favorisieren ist die Verlegung von Leitungstrassen entlang fluvial und glazial vorgeformter Täler. Um die entsprechenden Ausschlussgebiete zu ermitteln, wurden die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)-Daten herangezogen (NASA 2005). Im Rahmen der GIS-Analyse wird für jede Rasterzelle

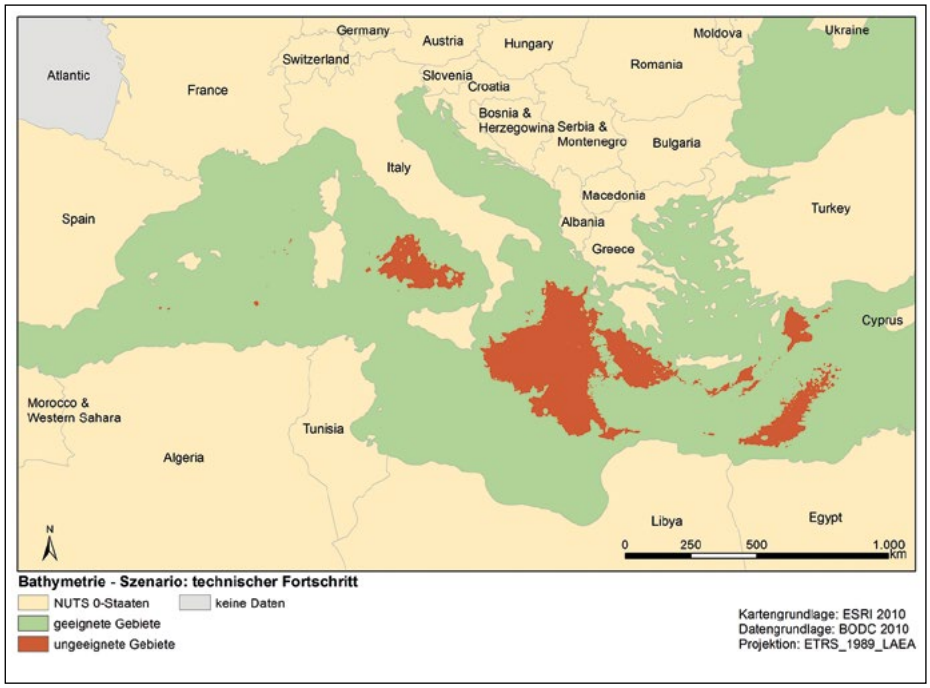

Abbildung 5: Ausschlussgebiete Bathymetrie (eigene Darstellung)

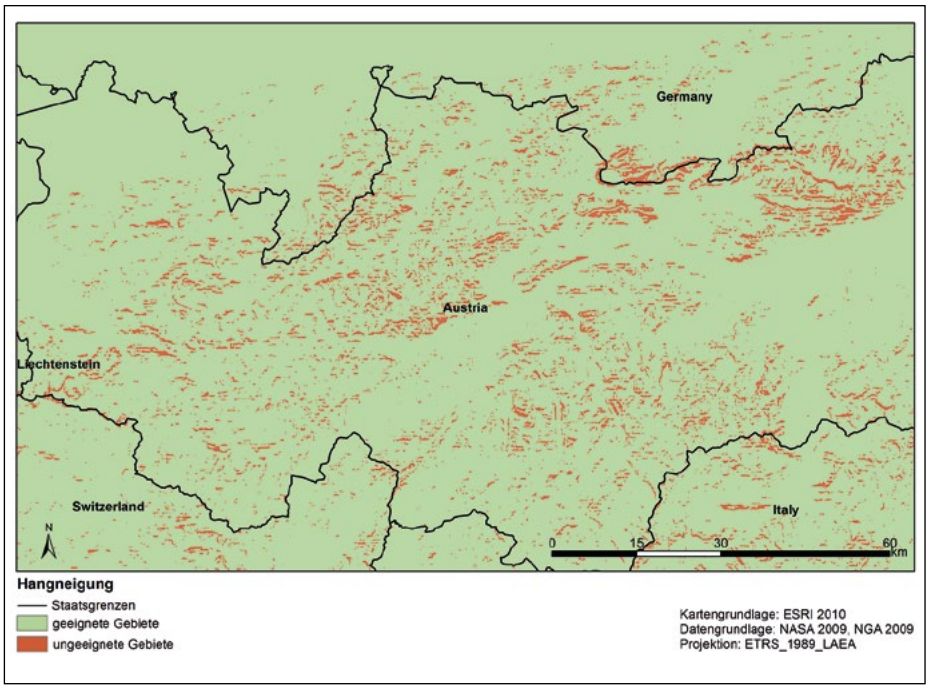

Abbildung 6: Ausschlussgebiete Hangneigung (eigene Darstellung)

zwischen dem 16. und 60. Grad nördlicher Breite die Neigung (Slope) ermittelt. Dies lässt sich über einen Konvertierungsfaktor, den sog. z-Faktor (ESRI 2007), oder mittels Transformation der Daten in ein kartesisches Koordinatensystem erreichen.

4 OPTIMALER TRASSENVERLAUF

Die GIS-Analyse hat gezeigt, dass der Bau von Stromtrassen durch ebenes Ödland am günstigsten ist und umso teurer wird, je größer die Hangneigungen und je höher die Anteile von Meeres-, Wald- sowie landwirtschaftlichen Nutzflächen sind, die von ihr passiert werden. Der optimale Trassenverlauf wird schließlich über die Gewichtung der restriktionsfreien Flächen sowie über länderspezifische sozioökonomische Kostenfaktoren (z. B. Lohnkosten) ermittelt. Diese finden ihren Ausdruck in einem speziellen Kostenlayer (siehe Abbildung 7). Jedes Pixel trägt somit die zentralen Informationen: Land- oder Seeweg, Stärke der Hangneigung, Art der Landnutzung und sozioökonomischer Hintergrund. Der Kostenlayer dient als Grundlage für die folgende Kosten-Distanz-Analyse.

Durch Anwendung der Gesamtausschlussgebietsmaske auf den Kostenlayer lassen sich nun kosteneffiziente Leitungstrassen ausgehend von einem ausgewählten Pixel ermitteln. Beispielhaft wird dies am Stromtransport zwischen Algerien und Belgien aufgezeigt (siehe Abbildung 7): Als Ausgangspunkt der Stromtrasse dient das Hybridkraftwerk im algerischen Hassi R'Mel. Als Endpunkt wurde das Stromverbrauchszentrum Brüssel ausgewählt. Da Belgien sehr stark von Ausschlussgebieten geprägt ist, besteht nur die Möglichkeit über die nördliche Landesgrenze eine Trasse nach Brüssel zu planen. Da die Stadt jedoch vollkommen von Ausschlussgebieten umgeben ist, diente die an den Großraum Brüssel angrenzende NUTS-3-Einheit Arrondissement Antwerpen als Berechnungsgrundlage. Die optimale Stromtrasse verläuft überraschenderweise nicht über das nordwestlich gelegene Spanien und Frankreich, sondern zunächst durch den östlichen Teil von Algerien sowie durch Tunesien. Die Überbrückung des Mittelmeers wird durch die Inseln Sardinien und Korsika erheblich erleichtert. Von dort aus führt die Stromtrasse bis in den Westen Österreichs. Nördlich der Alpen verläuft die Trasse durch die Schweiz. Über den Nordosten Frankreichs bilden Deutschland und Holland schließlich die letzten Transitländer, bevor die Trasse in die NUTS-3-Einheit Arrondissement Antwerpen nahe der nördlichen Landesgrenze Belgiens einmündet. Von dort aus könnte die Hauptstadt Brüssel über bereits bestehende Umspannwerke und Wechselstromtrassen mit Wüstenstrom versorgt werden. Die visualisierte Trasse stellt den optimalen Verlauf zwischen dem Startpunkt in Algerien und dem Zielpunkt in Belgien dar. Um Alternativrouten berechnen zu können, müssten Szenarien erarbeitet werden, die sich aus der kleinräumigen Variation von Standortfaktoren auf der Mikroebene, wie z. B. kommunalpolitische Entscheidungen, ergeben würden. Dies liegt jedoch außerhalb der Zielsetzungen der vorliegenden Studie. Der Fokus ist vielmehr auf Standortfaktoren der Meso- und Makroebene gerichtet, die kumuliert den kosteneffizien-

testen und somit optimalen Verlauf einer Stromtrasse offenbaren.

Für den Fall der Berechnung weiterer optimaler Stromtrassen zwischen nordafrikanischen Kraftwerks- und europäischen Abnahmezentren ist anzumerken, dass Informationen zu Kraftwerksstandorten nur im Einzelfall vorliegen. Daher ist es auch denkbar, die Trassenverläufe ausgehend von den europäischen Verbrauchszentren in Richtung der Produktionsstätten zu bestimmen. Hierdurch kann Auskunft darüber gegeben werden, wo die Errichtung eines solarthermischen bzw. photovoltaischen Kraftwerks prinzipiell sinnvoll wäre. Folglich kann die präsentierte GIS-Analyse auch als Methodik zur Identifizierung von geeigneten Startpunkten für HGÜ-Leitungen verstanden werden. Im Rahmen der vorliegenden Studie ist es mittels des Einsatzes von GIS in jedem Fall gelungen, einen wesentlichen Einblick in die räumlichen Dimensionen des interkontinentalen Stromtransports zu gewähren und den großen Untersuchungsraum anhand aussagekräftiger Standortfaktoren zu strukturieren.

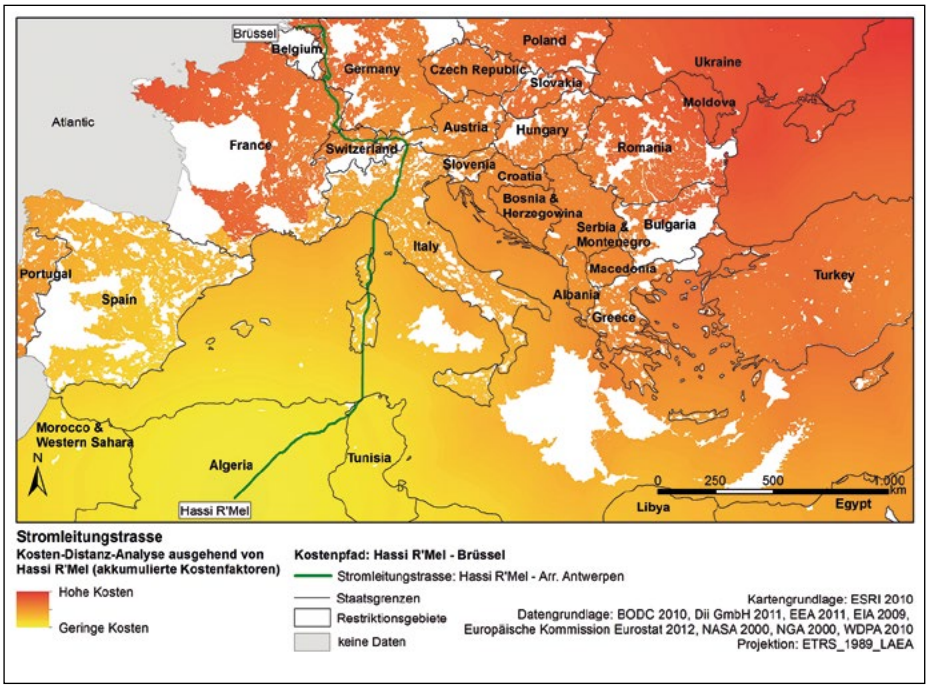

Abbildung 7: Optimale Stromtrasse Hassi R'Mel – Brüssel (eigene Darstellung)

Literatur

ABB AB (2008): Submarine Cable Link, The NorNed HVDC Connection, Norway – Netherlands. http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/2402665447f2d054c12571fb00333968/$file/project%20norned%20450%20kv%20dc%20mi%20sub.pdf, Zugriff 01/2012.

Bosch, S. (2010): Sauberer Strom aus der Wüste – Der Ausbau von konzentrierenden solarthermischen Systemen zur Sicherung der Energie- und Wasserversorgung in der EUMENA-Region. In: Friedmann, A.; Hilpert, M.; Jacobeit, J.; Kunstmann, H.; Peyke, G.; Reller, A.; Schneider, T.; Thieme, K.; Timpf, S.; Wetzel, K.-F.; Wieczorek, U. (Hrsg.): Geographica Augustana, 8. Augsburg.

Dannenberg, M.; Duracak, A.; Hafner, M.; Kitzing, S. (2012): Energien der Zukunft – Sonne, Wind, Wasser, Biomasse, Geothermie. Primus Verlag, Darmstadt.

Desertec Foundation (2009): Red Paper – Das Desertec Konzept im Überblick. www.desertec.org/downloads/summary_de.pdf, Zugriff 01/2012.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2006): Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power. http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/TRANS-CSP_Full_Report_Final.pdf, Zugriff 10/2012.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2009a): 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, Zugriff 08/2012.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2009b): Characterisation of Solar Electricity Import Corridors from MENA to Europe. www.dlr.de/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Solar_import_DLR_2009_07.pdf, Zugriff 02/2013.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2012): Corine Landcover – Bodenbedeckungsdaten für Deutschland. http://www.corine.dfd.dlr.de/intro_de.html, Zugriff 01/2012.

ESRI (2007): Mapping Center, Setting the Z Factor Parameter Correctly. http://blogs.esri.com/Support/blogs/mappingcenter/archive/2007/06/12/setting-the-z-factor-parameter-correctly.aspx, Zugriff 01/2012.

Europa (2008): Zusammenfassungen der EU-Gesetzgebung. http://europa.eu/legislation_summaries/regional_policy/management/g24218_de.htm, Zugriff 01/2012.

Europäische Union (EU) (2003): Verordnung (EG) Nr. 1059/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Mai 2003 über die Schaffung einer gemeinsamen Klassifikation der Gebietseinheiten für die Statistik (NUTS). http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:154:0001:0041:DE:PDF, Zugriff 01/2012.

European Environment Agency (EEA) (2011): Natura 2000 data – the European network of protected sites. http://www.eea.europa.eu/, Zugriff 01/2012.

Heuer, S. (2011): Strom aus der Schüssel. In: Technology Review – Das M.I.T.-Magazin für Innovation, 1 (Spezialheft Energie), S. 54-61.

Heup, J. (2012): Spiegel mit Kratzern. In: Neue Energie – Das Magazin für Erneuerbare Energien, 9, S. 83-86.

International Union for Conservation of Nature (IUCN) (2012): IUCN Protected Area Management Categories. http://www.iucn.org/about/work/programmes/gpap_home/gpap_quality/gpap_pacategories/, Zugriff 02/2013.

Lessner, A. (2010): CSP vor neuem Schub. In: Erneuerbare Energien – Das unabhängige Monatsmagazin für die Zukunftsenergien, 2, S. 52-55.

Leuthold, F.; Weigt, H.; v. Hirschhausen, C. (2008): ELMOD – A Model of the European Electricity Market. http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1169082, Zugriff 01/2013.

Löfken, J.-O. (2011a): Vorreiter Afrika. In: Technology Review – Das M.I.T.-Magazin für Innovation, 1 (Spezialheft Energie), S. 62-63.

Löfken, J.-O. (2011b): Afrika entdeckt die Sonne. In: Technology Review – Das M.I.T.-Magazin für Innovation, 6, S. 26-32.

National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2005): Shuttle Radar Topography Mission. http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataprod.htm, Zugriff 01/2012.

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

Rentzing, S. (2011): Im Schatten der Photovoltaik. In: Neue Energie – Das Magazin für Erneuerbare Energien, 10, S. 48-51.

Schmitt, T. (2012): Postfordistische Energiepolitiken? Das Desertec-Konzept als Szenario zur Restrukturierung der Energieversorgung in der EUMENA-Region. In: Zeitschrift für Wirtschaftsgeographie, 4, S. 244-263.

Schwarzburger, H. (2012a): Gebündelte Energie. In: Erneuerbare Energien – Das Magazin, 5, S. 62-65.

Schwarzburger, H. (2012b): Voll konzentriert. In: Erneuerbare Energien – Das Magazin, 11, S. 56-59.

Trieb, F. (2012): Strom aus der Wüste – DLR-Studien zum Projekt Desertec. In: Bührke, T.; Wengenmayr, R. (Hrsg.): Erneuerbare Energien – Konzepte für die Energiewende. Wiley-VCH Verlag, Weinheim.

Walter, K.; Bosch, S. (2012): Energietransport – GIS-gestützte Identifikation optimaler Stromleitungstrassen zwischen Nordafrika und Europa. In: Strobl, J.; Blaschke, T.; Griesebner, G. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2012. Beiträge zum 24. AGIT-Symposium Salzburg. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, S. 543-552.

Wandler, R. (2011): Der Sonnenkönig. In: Neue Energie – Das Magazin für Erneuerbare Energien Nr. 7, Berlin, S. 92-95.

WWF Deutschland (2008): Hintergrundinformation Internationale Schutzgebiets-Kategorien der IUCN. http://www.wwf.de/downloads/publikationsdatenbank/ddd/29437/, Zugriff 01/2012.

Zimmermann, J.-R.; Weinhold, N. (2011): Das Netz wächst zusammen. In: Neue Energie – Das Magazin für Erneuerbare Energien, 12, S. 17-23.