

Global denken – lokal handeln: ein Beitrag zur lokalen Umsetzung der Energiewende durch 4-dimensionale GIS-basierte Solarpotenzialanalysen

Michael Roth¹, Christian Tilk¹, Sina Röhner¹

¹Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen · michael.roth@hfwu.de

Zusammenfassung: Um die politischen Ziele für die erneuerbaren Energien in Deutschland zu erreichen, ist trotz gesunkener Einspeisevergütung weiterhin in großem Umfang die Installation von Photovoltaikanlagen nötig. Große Flächenpotenziale liegen auf den Dächern privater und öffentlicher Gebäude. Diese Potenziale sind ohne zusätzlichen Flächenverbrauch und die damit verbundenen Auswirkungen auf den Naturhaushalt nutzbar. Um Gebäudeeigentümer zielgerichtet zur Installation von Solaranlagen zu informieren und zu motivieren, wurde eine Solarpotenzialanalyse auf der Basis hochauflösender Oberflächenmodelle entwickelt, die zeitlich und räumlich fein aufgelöst Stromerzeugungspotenziale ermittelt und unter Berücksichtigung zeitlich differenzierter Eigenverbräuche eine valide Prognose der Rentabilität erlaubt.

Schlüsselwörter: Web-GIS, Landschaftsbewertung, erneuerbare Energien, Planungsunterstützungssystem, Photogrammetrie

Abstract: *To reach the political goals for renewable energies in Germany, further installations of photovoltaics are necessary, despite the decreasing feed-in tariffs. Roofs of private and public buildings offer large potentials. These potentials can be used without additional land consumption and the resulting impacts on nature and the environment. To inform and motivate building owners efficiently concerning the installation of rooftop photovoltaics, an insolation analysis was developed, based on high-resolution digital surface models. With its spatiotemporal high resolution of electricity production potentials and the inclusion of temporally varying self-consumption, a valid prognosis of profitability is possible.*

Keywords: *Web GIS, Landscape Assessment, Renewable Energy, Planning Support System, Photogrammetry*

1 Einführung

Als Reaktion auf beschränkte Reserven fossiler Brennstoffe und zum globalen Klimaschutz durch die Verringerung von Kohlendioxid-Emissionen werden erneuerbare Energien in Europa stark gefördert (ROTH 2015). Windkraftanlagen, Wasserkraftwerke und Photovoltaik sind die Hauptquellen erneuerbarer Energien in vielen Europäischen Ländern. Das Potenzial großer Wasserkraftanlagen ist oft bereits ausgeschöpft und große Windkraftanlagen und Freilandphotovoltaik erfahren aufgrund ihrer Auswirkungen auf die wahrgenommene Landschaftsqualität (VAN DER HORST 2007, BOSCH & PEYKE 2011), auf geschützte Arten und auf die menschliche Gesundheit oft starken Widerstand in der Öffentlichkeit. Photovoltaik auf Dächern hingegen werden sozial im Allgemeinen akzeptiert. In Deutschland wurden 2015 rund 30 % der Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt, 6 % des Gesamtstromverbrauchs aus der Photovoltaik (FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY 2016).

Seit das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Jahr 2000 in Kraft trat, haben hohe Förderungen durch eine lukrative Einspeisevergütung, die für 20 Jahre garantiert wird, viele private Hauseigentümer, öffentliche Institutionen und Unternehmen dazu motiviert, auf den Dächern Solaranlagen zur Erzeugung von Strom aus der Sonnenenergie zu installieren. Diese Förderung (Einspeisevergütung) startete mit über 50 Cent/kWh im Jahr 2001 und hat sich auf 12 Cent/kWh heute verringert. Nachdem zwischen 2010 und 2012 noch sehr große Zuwächse bei dachmontierten Photovoltaikanlagen zu verzeichnen waren, hat sich die Zahl neuinstallierter Photovoltaikanlagen in den letzten drei Jahren signifikant verringert (FRAUNHOFER INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME 2015), bedingt durch stabile Preise für die PV-Panels und die sinkende Einspeisevergütung und damit geringere erzielbare Rendite.

Bis 2025 soll in Deutschland 40-45 % des Stroms aus erneuerbaren Energien erzeugt werden, und 10 Jahre später in 2035 sogar zwischen 55 % und 60 % (FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY 2016). Dies wird nur durch neue dezentrale dachmontierte Photovoltaik gelingen, insbesondere in Anbetracht der Tatsache, dass die Energiequelle Solarenergie in ganz Deutschland verfügbar ist und nicht auf die Errichtung neuer Hochspannungsleitungen zum Stromtransport angewiesen ist, wie dies z. B. bei der Off-Shore-Windkraft der Fall ist.

In unserem Beitrag beschreiben wir die Entwicklung eines Prototyps einer GIS-basierten 4-dimensionalen Solarpotenzialanalyse für Dachflächen, am Beispiel der Stadt Nürtingen (Baden-Württemberg). Dieses Werkzeug wurde entwickelt, um genaue und valide Potenziale für die Erzeugung von Strom aus dachmontierten Photovoltaikanlagen zu ermitteln und zu kommunizieren, verbunden mit ökonomischen relevanten Informationen wie der erzielbaren Eigenverbrauchsquote, sodass die mögliche Profitabilität der Investition in erneuerbare Energien effizient und effektiv abgeschätzt werden kann. Als Oberziel des Projektes kann die Auslösung der weiteren Investition von vordringlich privater Hand in Photovoltaik angesehen werden. Dies wird unterstützt durch die zielgerichtete Kommunikation der Message, dass auf dem eigenen Dach trotz sinkender Einspeisevergütung mit einem gewissen Anteil an Eigenverbrauch bei der Nutzung optimal geeigneter Dachflächen immer noch sinnvoll in die dezentrale Nutzung von Solarenergie investiert werden kann. Auf höherer Ebene soll mit dem Werkzeug der 4D-Solarpotenzialanalyse zur lokalen Umsetzung der Energiewende von fossilen und nuklearen Energiequellen weg und hin zu erneuerbaren Energien beigetragen werden.

2 Daten und Methoden

Um akkurate und in raumzeitlicher Hinsicht hochauflösende Daten zur Solareinstrahlung zu berechnen, sind hochgenaue und hochauflösende Digitale Oberflächenmodelle, welche sowohl das Gelände, als auch die Bauwerke und Vegetation (die alle zur Verschattung von Dachflächen beitragen können) enthalten. Da das beste von der Landesvermessung zu beziehende Oberflächenmodell eine Auflösung von 1×1 m hat und durch die Art der Datenerzeugung durch Laserscanning (LIDAR) insbesondere Vegetation für die Belange der Solarpotenzialanalyse nur suboptimal repräsentiert, wurde ein eigenes Digitales Oberflächenmodell mithilfe autostereoskopischer Verfahren errechnet. Durch ein Set überlappender Luftbildaufnahmen, die aus ca. 1.500 m Höhe mit einer 200-Megapixel-Kamera aufgenommen wurden (Bodenauflösung ca. 5 cm) konnte mit der Software PhotoScan der Firma AGISOFT ein Di-

giales Oberflächenmodell durch die Nutzung sogenannter „Structure from Motion“-Verfahren errechnet werden, das für das ganze Stadtgebiet eine Auflösung von 10×10 cm hat. Da die Fotos zu einem Zeitpunkt aufgenommen wurden, an dem die Vegetation voll belaubt war, präsentieren sich Vegetationselemente in ihrer vollen Ausdehnung im Modell. Gerade in urbanen Settings, in denen Gebäude und Vegetation dicht miteinander verzahnt auftreten, und durch die vegetationsbedingte Verschattung signifikante Limitierungen der solaren Einstrahlung auftreten, ist eine genaue Einbeziehung der Vegetation maßgeblich für eine valide Abschätzung des Solarpotenzials. Ergänzend zum Digitalen Oberflächenmodell wurden genaue Gebäudegrundrisse als Vektordaten verwendet. Die folgende Abbildung 1 zeigt kein Luftbild, sondern ein texturiertes Oberflächenmodell, wobei die Texturen ebenfalls mit AGISOFT PhotoScan berechnet wurden.



Abb. 1: Rendering des hochauflösenden Oberflächenmodells, das als Haupt-Datengrundlage für die Solarpotenzialanalyse verwendet wurde

Unter Anwendung des Werkzeugs „Area Solar Radiation“ in Esri’s ArcGIS wurde auf der Basis des o. g. Oberflächenmodells für Intervalle von 15 Minuten Länge die Solareinstrahlung für die Dachflächen berechnet. Das Tool „Area Solar Radiation“ berechnet die direkte und diffuse Einstrahlung auf der Basis des sogenannte „Hemispherical-Viewshed-Algorithmus“, der von RICH et al. (1994) entwickelt und von FU & RICH (2000, 2002) weiterentwickelt wurde.

Die sehr hohe zeitliche Auflösung ist nötig, um nicht nur die Jahressumme an Solarstrahlung zu berechnen, sondern die Potenziale für den Eigenverbrauch der erzeugten Elektrizität ebenfalls berechnen zu können. Da für jeden Tag im Jahr hochauflösende Produktions- und Verbrauchsprofile, die sowohl tageszeitlich, wochentäglich als auch jahreszeitlich variieren, vorliegen, können durch Überlagerung der beiden Profile auch Eigenverbrauchsquoten berechnet werden.

Die Einstrahlungsdaten liegen zunächst für jedes Pixel des Digitalen Oberflächenmodells vor und wurden anschließend für homogene Dachteilflächen aggregiert. Die Aggregation erfolgte dabei für einzelne Gebäude nach gleichgerichteten und gleichgeneigten Dachflächen, so z. B. für die unterschiedlich exponierten Teilflächen eines Satteldachs. Anschließend wurden die Zeitreihen (in 15-Minuten-Intervallen) der Einstrahlung für die Dachteilflächen in Statistiksoftware exportiert und dort weiterverarbeitet.

Um die Potenziale des Eigenverbrauchs, der rechnerisch mit den Stromkosten von ca. 25 Cent/kWh bilanziert werden kann (anstatt der Einspeisevergütung von 12 Cent/kWh), zu ermitteln, wurden die Standardlastprofile des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft (Datenquelle: EWE 2014) genutzt. Diese Standardlastprofile beschreiben den zeitlich variierenden Stromverbrauch verschiedener Nutzertypen wie zum Beispiel Privathaushalte, landwirtschaftliche Betriebe, Einzelhandel, energieintensive Gewerbe wie Bäckereien etc. In jedem der Standardlastprofile wird in 15-Minuten-Intervallen vom 1. Januar bis zum 31. Dezember der mittlere Energieverbrauch abgebildet. Abbildung 2 zeigt ein solches Standardlastprofil für Privathaushalte. Diese Kurven können entsprechend des konkreten Gesamtverbrauchs vertikal skaliert werden, sodass die Standardkurve in der unten stehenden Abbildung keine Einheiten auf der Y-Achse trägt.

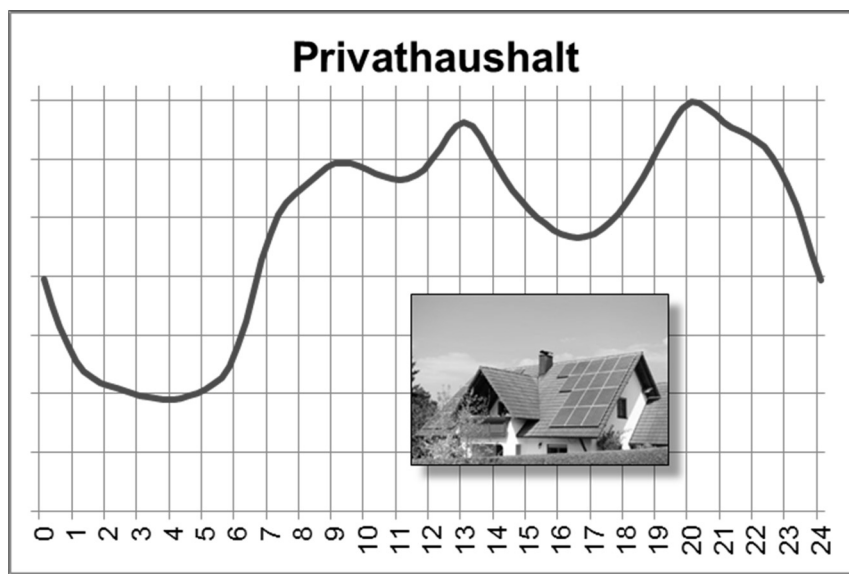


Abb. 2: Standardlastprofil des Stromverbrauchs eines Privathaushalts über den Tag (von Mitternacht bis Mitternacht) für einen ausgewählten Tag im Jahresgang

3 Ergebnisse

Die nachstehende Abbildung 3 zeigt beispielhafte Ergebnisse der Einstrahlungsanalyse, die oben erläutert wurde. In der linken Spalte der Abbildungen wird die aktuelle Einstrahlung

für ein 15-Minuten-Intervall (um 10:00 Uhr vormittags) für die unterschiedlichen Dachteilflächen und drei Tage im Jahresgang (20. März, 20. Juni, 20. September) dargestellt. In der rechten Spalte werden für die zwei umrandeten Dachteilflächen jeweils die Tagesgänge der Strahlung für die genannten Tage dargestellt. Die Kurve für das Ost-Süd-Ost exponierte Dach steigt dabei schneller an, während die Kurve für das Süd-Süd-West exponierte Dach mehr und länger Einstrahlung bekommt.

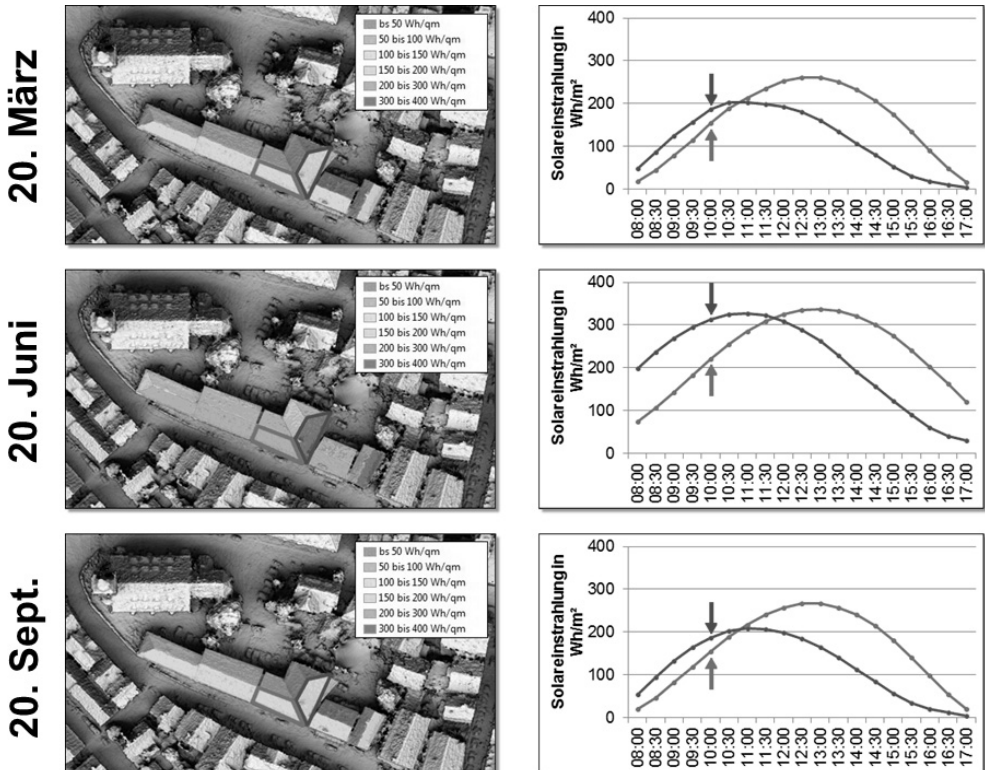


Abb. 3: Ergebnisse der Einstrahlungsanalyse für drei verschiedene Tage im Jahr und für ausgewählte Dachteilflächen im Tagesgang.

Die grundlegende Idee der 4-dimensionalen Solarpotenzialanalyse ist, wie oben beschrieben, die Überlagerung der Photovoltaik-Potenziale auf dem Dach mit dem Verbrauch, um daraus Eigenverbrauchsprozente und die entsprechende Profitabilität zu berechnen. Abbildung 4 zeigt klar, dass für eine hypothetische PV-Anlage und ein hypothetisches Gewerbe, wie z. B. einen Friseur ein wesentlich höherer Eigenverbrauchsanteil erreicht werden kann, als z. B. bei einem Mehrfamilienhaus. Dies ist im Beispiel 93 % Eigenverbrauch für den Friseur gegenüber 72 % Eigenverbrauch für das Mehrfamilienhaus.

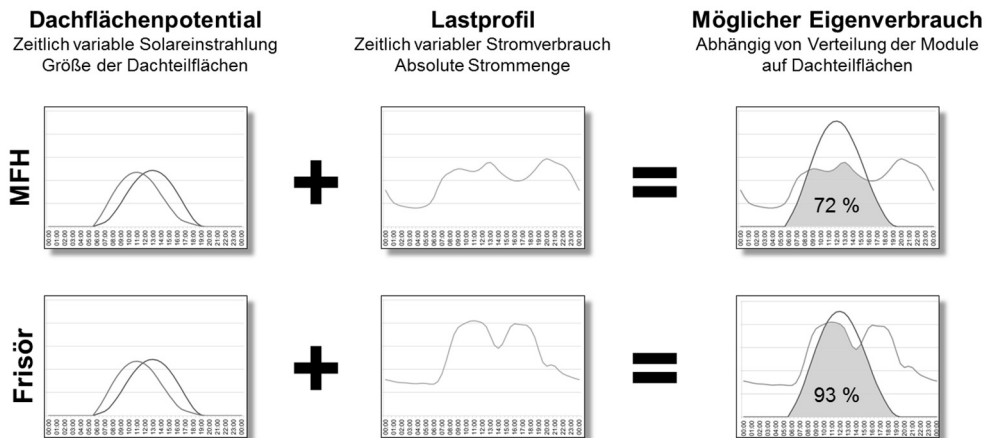


Abb. 4: Verschiedene Eigenverbrauchspotenziale basierend auf verschiedenen Lastprofilen bei gleicher Stromproduktion

Ergänzend zu dem hier vorgestellten Ansatz mit den Standardlastprofilen können auch genauere Verbrauchsdaten, z. B. aus Smart-Metering-Ansätzen wie dem freien Smart Meter „Volkszähler“ (<http://www.volkszaehler.org>) genutzt werden. So können noch genauere Eigenverbrauchsprognosen erstellt werden.

4 Diskussion

Ergänzend zu existierenden Solarpotenzialanalysen (z. B. LUBW 2012, KLÄRLE 2012) ermittelt unser Ansatz nicht nur die jährliche Gesamtstrahlungsmenge pro Gebäude, sondern bietet die folgenden Vorteile: (a) Aufgrund der hohen Auflösung von 10×10 cm und der Einbeziehung akkurater Vegetationsoberfläche (im Unterschied zu LIDAR-basierten Oberflächenmodellen) können wir sehr effektiv und genau Verschattungen durch Gelände, Gebäude, Dachstrukturen (Gauben, Schornsteine) und Vegetation berechnen. (b) Die feine zeitliche Auflösung erlaubt es, spezifische Solarenergie-Produktionsprofile für jedes Gebäude und jede Dachteilfläche zu berechnen. Somit kann die mögliche Stromerzeugung eines Gebäudes mit seinem Verbrauchsprofil überlagert werden, wobei momentan die verschiedenen Nutzertypen der Standardlastprofile des BDEW (2014) oder alternativ individuelle Daten aus einem Smart Meter wie dem „Volkszähler“ verwendet werden können. Damit ist eine sehr genaue und valide Abschätzung des Eigenverbrauchs möglich. Mit Stromkosten von ca. 25 Cent/kWh und einer Einspeisevergütung von nur 12 Cent/kWh ist der Eigenverbrauch aus ökonomischer Perspektive doppelt so lukrativ wie die Einspeisung in das Netz.

In Zukunft werden gebäudeinstallierte Energiespeicher in Form von Batterien an Bedeutung gewinnen (vgl. z. B. JOHANN & MADLENER 2014), die Preise für haushaltsbasierte Stromspeicher werden fallen, und die Nutzung von Elektroautos und deren Batterien als Energiespeicher wird gleichfalls an Bedeutung gewinnen (vgl. z. B. DALLINGER & WIETSCHEL 2012). Eine genaue und zeitlich gut aufgelöste Abschätzung des Stromerzeugungspotenzials kann

zur Abschätzung der Profitabilität derartiger Speichersysteme gleichfalls herangezogen werden und somit bei bestehenden oder geplanten PV-Anlagen eine Erhöhung der Eigenverbrauchsquote durch Zwischenspeicherung bewirken.

Da unser prototypisches Solarpotenzialanalysetool im Wesentlichen nur auf Daten basiert, die landesweit verfügbar sind, und die Berechnungen auf leistungsfähiger Standard-Hardware und mit Standard-Software möglich sind, kann die Übertragbarkeit auf andere Kommunen beziehungsweise auch auf die regionale Ebene als einfach eingeschätzt werden.

Wenn hochauflösende Luftbilder z. B. der Landesvermessung nicht verfügbar oder nicht erhältlich sind, kann der vorgestellte Analyse- und Bewertungsansatz auch durch die Befliegung mit sogenannten UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) durchgeführt werden, und damit eine Datenbasis für die Generierung photogrammetrischer Oberflächenmodelle erzeugt werden. SZABÓ et al. (2016) haben die Machbarkeit derartiger Ansätze, zumindest für kleinere Regionen, die einfach mit einem UAV befliegen werden können, nachgewiesen.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Indem die Ergebnisse der Solarpotenzialanalyse der breiten Öffentlichkeit durch ein Online-GI-System kommuniziert werden, begleitet durch eine abgestimmte Öffentlichkeitsarbeit, hoffen wir, zusätzliche und zukünftige Installationen von Photovoltaiksystemen auf privaten und öffentlichen Dächern zu befördern. Damit soll ein Beitrag geleistet werden, um die Energiewende im Allgemeinen voranzubringen, und nationale, landesweite und lokale Klima- und Erneuerbare-Energien-Ziele zu erreichen. Neben der angesprochenen abgestimmten Öffentlichkeitsarbeit ist dazu sicherlich auch die Einbeziehung relevanter Akteure wie der Kommunalverwaltung, Umweltschutzverbände, Energieversorger und des Handwerks erforderlich. Die Stadt Nürtingen hat gute Erfahrungen mit derartigen Informationssystemen gemacht, da schon 2010 ein erstes Solardach-Informationssystem veröffentlicht wurde, zwei Jahre bevor das erste landesweite Solarpotenzial-Informationssystem für das Land Baden-Württemberg veröffentlicht wurde. Wir sind zuversichtlich, dass mit dem vorgestellten Ansatz eine Anbindung an den bisherigen „Pioniergeist“ möglich ist.

Neben den Gebäudeeigentümern als Hauptzielgruppe kann das vorgestellte Werkzeug auch für die Stadtplanung, Landschafts- und Umweltplanung und für die Aufstellung kommunaler Energiestrategien genutzt werden. Erstes Interesse aus dem Kreise ortsansässiger Betriebe, die sich mit der Erzeugung und Speicherung von Strom aus Sonnenenergie befassen, hat sich schon gezeigt. Die Solarpotenzialanalyse kann von diesen als ein Baustein für effiziente Ansprache potenzieller Kunden genutzt werden.

Ein weiteres interessantes Potenzial für das vorgestellte Tool liegt in der Einbindung in ein Planungsunterstützungssystem, in dem z. B. die Sichtbarkeit/Einsehbarkeit der Dachflächen, Landschaftsbildbewertungsmodelle und eine naturschutzfachliche Beurteilung visueller Beeinträchtigungen miteinander verknüpft werden.

Literatur

- BDEW – BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT (2014), Standardlastprofile Strom. https://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Standartlastprofile (15.11.2015).
- BOSCH, S. & PEYKE, G. (2011), Gegenwind für die Erneuerbaren – Räumliche Neuorientierung der Wind-, Solar- und Bioenergie vor dem Hintergrund einer verringerten Akzeptanz sowie zunehmender Flächennutzungskonflikte im ländlichen Raum. *Raumforschung und Raumordnung*, 69 (2), 105-118.
- DALLINGER, D. & WIETSCHEL, M. (2012), Grid integration of intermittent renewable energy sources using price-responsive plug-in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (5), 3370-3382.
- EWE (2014), Standardlastprofile des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW). <https://www.ewe-netz.de/strom/1988.php> (12.01.2016).
- FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY (2016), Renewable Energy at a Glance. <http://www.bmwi.de/EN/Topics/Energy/Renewable-Energy/renewable-energy-at-a-glance,did=667458.html> (10.01.2016).
- FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME (ISE) (2015), Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>.
- FU, P. & RICH, P. M. (2000), The Solar Analyst 1.0 Manual. Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA.
- FU, P. & RICH, P. M. (2002), A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Agriculture and Forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37, 25-35.
- JOHANN, A. & MADLENER, R. (2014), Profitability of Energy Storage for Raising Self-consumption of Solar Power: Analysis of Different Household Types in Germany. *Energy Procedia*, 61, 2206-2210.
- KLÄRLE, M. (2012), Erneuerbare Energien unterstützt durch GIS und Landmanagement. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach.
- LUBW – LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2012), Solare Effizienz auf Hausdächern. <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/61510/> (15.11.2015).
- RICH, P. M., DUBAYAH, R., HETRICK, W. A. & SAVING, S. C. (1994), Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, 524-529.
- ROTH, M. (2015), Europe's changing energy landscape. *International Innovation*, 178, 99-101.
- SZABÓ, S., ENYEDI, P., HORVÁTH, M., KOVÁCS, Z., BURAI, P., CSOKNYAI, T. & SZABÓ, G. (2016), Automated registration of potential locations for solar energy production with Light Detection and Ranging (LiDAR) and small format photogrammetry. *Journal of Cleaner Production*, 112 (5), 3820-3829.
- VAN DER HORST, D. (2007), NIMBY or not? Exploring the relevance of location and the politics of voiced opinions in renewable energy siting controversies. *Energy Policy*, 35, 2705-2714.