

Photovoltaik in virtuellen Kraftwerken zur Versorgung regionaler Elektromobilitätskonzepte

Luis RAMIREZ CAMARGO^{1,2} und Roland ZINK¹

¹Technische Hochschule Deggendorf · roland.zink@th-deg.de

²Universität für Bodenkultur Wien

Zusammenfassung

Motiviert durch die zunehmende Dezentralisierung der Stromproduktion und dem damit einhergehenden Einsatz erneuerbarer Energien stellt dieser Beitrag eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste GIS-basierte Ertragsanalyse für Photovoltaik (PV) vor. Eine exakte Prognose ist Voraussetzung, um eine sichere und am Verbraucher orientierte Versorgung z. B. durch den Zusammenschluss verschiedener Kraftwerke gewährleisten zu können. Gerade bei wetterabhängigen Technologien wie der PV und neuen Verbrauchern wie der Elektromobilität stellt dies eine große Herausforderung dar. Mit einer Reihe an Open-Source GIS-Werkzeugen lassen sich jedoch auf Grundlage von LIDAR-Daten und Wetterdaten von Testreferenzjahren (TRY) die geforderten Kennlinien errechnen. Die Ergebnisse zeigen standort-, anlagen- und wetterbezogene Ertragswerte in 15 Minuten Intervallen und unterstützen damit wesentlich die Planung kleinräumiger virtueller Kraftwerke. So lässt sich auch bei kleinen Untersuchungsgebieten wie dem südöstlichen Bayerischen Wald durch eine gezielte Verteilung der Erzeugungskapazität auf Standorte verschiedener Wetterregionen die Variabilität um bis zu 48 % senken.

1 Regionale Elektromobilitätskonzepte

Die Entwicklung alternativer Antriebskonzepte wie etwa die Elektromobilität ist eine von mehreren Möglichkeiten, einen Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasen und zur nachhaltigen Gestaltung des Verkehrswesens zu leisten (vgl. WBGU 2011). Diese Argumentation überzeugt allerdings nur dann, wenn auch die dafür benötigte Elektrizität aus regenerativen Quellen stammt. Daher ist es bei regionalen Elektromobilitätskonzepten erforderlich, parallel zur infrastrukturellen Erschließung und der lokalen Bewusstseinsbildung entsprechende Energieversorgungsstrukturen zu schaffen. Aufgrund der wetterbedingten Produktionsschwankungen, insbesondere bei der PV und der Windenergie, richtet sich der Fokus dabei auf kommunikative Zusammenschlüsse mehrerer und unterschiedlicher erneuerbarer Energien in Form von Microgrids, Smartgrids oder virtueller Kraftwerke, mit deren Hilfe eine angepasste Versorgung der neuen Verbraucher erreicht werden kann.

Das Projekt E-WALD, gefördert durch den Freistaat Bayern, stellt Deutschlands größte Modellregion zur Erprobung von Elektromobilität dar. Das Gebiet erstreckt sich auf einer Fläche von ca. 7.000 km² entlang der Donau zwischen Straubing und Passau und umfasst den gesamten südöstlichen Bayerischen Wald. Geprägt durch eine ländliche Mittelgebirgslandschaft mit strengen Wintern, einer bewegten Morphologie und einem sehr hohen Anteil an Individualverkehr, hält die Region zahlreiche Herausforderungen für die Elektromobili-

tät bereit (vgl. E-WALD 2014). So gilt der elektronisch betriebene Individualverkehr – im Gegensatz zu städtischen Ballungsräumen – in derartigen Gebieten wegen der begrenzten Reichweite der Fahrzeuge bisher kaum als Alternative. Gleichzeitig ergeben sich aufgrund des räumlichen Umrisses der Projektregion neue Aufgaben bei der Elektrizitätsbereitstellung durch erneuerbare Energien.

2 Geoinformation zur Planung virtueller Kraftwerke

Im Forschungs- und Entwicklungsprojekt E-WALD soll die Stromversorgung durch heimische Ressourcen aus der Projektregion erfolgen. Zum einen bietet die Region bilanziell ausreichende Energiepotenziale, zum anderen lassen sich damit wirtschaftliche Impulse vor Ort setzen, wodurch der ländliche Raum gestärkt wird (vgl. ZINK 2013, 172f.). Um diesem Anspruch und dem einer sicheren Versorgung gerecht zu werden, bedarf es sowohl intelligenter Angebots- als auch Nachfragestrukturen. Auf der Angebotsseite bieten sich hierfür sogenannte virtuelle Kraftwerke an. Diese zeichnen sich durch einen kommunikativen Zusammenschluss verschiedener Erzeugungsformen an unterschiedlichen Standorten aus und ermöglichen eine zentrale Überwachung, Steuerung und Regelung.

Obwohl die Nutzung regionaler Energiepotenziale der Idee der Dezentralisierung entspricht, verringert sich dadurch allerdings die Möglichkeit einer breiten Ausdehnung des virtuellen Kraftwerkes, was einen besonderen Faktor dessen konzeptioneller Gestaltung darstellt. So ist es ein zentraler Aspekt virtueller Kraftwerke, anhand eines geographisch weit gestreuten Kraftwerksparks meteorologisch bedingte Schwankungen auszugleichen. Durch die gezielte Kombination verschiedener Energieformen einerseits und deren unterschiedlichen Standorte andererseits soll die Versorgungszuverlässigkeit gesteigert bzw. die Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Ausschläge minimiert werden.

Bei kleinen Gebieten – wie etwa dem Umgriff von E-WALD (vgl. Abbildung 1) – reduzieren sich jedoch sowohl die meteorologischen Unterschiede als auch die Anzahl an verfügbaren Flächen mit verschiedenen topographischen Bedingungen. Eine räumlich detailreiche Analyse und eine standortangepasste Anlagenkonfiguration werden deshalb umso wichtiger und markieren den Forschungsschwerpunkt, zeitlich und räumlich hochaufgelöste Prognosemodelle für die verschiedenen erneuerbaren Energien zu erstellen. Dies trifft insbesondere auf die PV zu, die neben der Wasserkraft die dominante Erzeugungsform in der Untersuchungsregion darstellt.

GIS-basierte Verfahren liefern folglich eine planerische Grundlage zur Gestaltung des Kraftwerksportfolios. Zum einen lassen sich mit der Verortung von Verbrauchern inklusive deren Lastprofile (Ladesäulen und Hausladungen) sowie den erneuerbaren Kraftwerkskomponenten und deren potenziellen Erzeugungskurven Rückschlüsse auf Bedarfs-, Versorgungs- und Netzstrukturen ziehen. Im Bereich der Elektromobilität schließt dies auch die Verwendung der Fahrzeuge selbst als Kurzspeicher ein (vgl. ROTHFUSS & LE BRIS 2013, 44), weswegen zu erwarten ist, dass Elektromobilitätsinitiativen wie E-WALD und die darin implementierten virtuellen Kraftwerke zur räumlichen Neudefinitionen von Energielandschaften beitragen und sich gänzlich neue Versorgungskonzepte etablieren. Zum anderen ermöglichen GIS-Anwendungen wie etwa r.sun im Bereich der Sonnenenergie, die Einstrahlung zu berechnen sowie unter Berücksichtigung lokaler Wetterbedingungen und der regionalen Topographie hochaufgelöste Ertragsprognosen zu erstellen.

3 GIS-basiertes Photovoltaikprognosemodell

Das Photovoltaikprognosemodell besteht aus drei aufeinander aufbauenden Schritten. Im ersten Schritt wird die solare Einstrahlung für ein ganzes Jahr in 15 Minuten Intervallen berechnet. Die Berechnung basiert auf der Annahme eines bewölkten Himmels und erfolgt mittels der Anwendung *r.sun*, welche von HOFIERKA & SURI (2002) für die Open-Source-GIS-Software GRASS entwickelt wurde. *r.sun* erfordert für die Berechnung der Strahlung zu einer bestimmten Uhrzeit folgende Parameter (vgl. HOFIERKA & SURI 2002, 9):

- a) Digitales Gelände-/Oberflächenmodell (DGM/DOM);
- b) Rasterdateien zur Ausrichtung und Neigung der Oberfläche;
- c) Linke-Trübungsfaktor;
- d) Rasterdateien der Koeffizienten sowohl zur direkten als auch zur diffusen Solarstrahlung unter bewölktem Himmel.

Die Parameter a) und b) lassen sich aus den LIDAR-Daten des jeweiligen Untersuchungsgebiets erzeugen. Die SoDa-Datenbank (SODA 2004) gibt Auskunft über den Linke-Trübungsfaktor. Die Koeffizienten zur direkten und diffusen Strahlung können als Faktor zwischen den gemessenen Werten für einen bewölkten Himmel und berechnete Werte für einen klaren Himmel kalkuliert werden. Die Berechnung letzterer ist mithilfe von *r.sun* selbst möglich. Hierzu bedarf es wiederum der Parameter a), b) und c). Gemessene Werte liefert der Datensatz zu den TRY des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES (2011).

Ein wesentlicher Aspekt bei der Ermittlung des Stromertrags ist die Beachtung der Verschattung von PV-Modulen. *r.sun* bietet hierzu entsprechende Funktionen, die aber wegen begrenzter Rechenkapazitäten häufig an ihre Grenzen stoßen. Die Rechenzeit korreliert dabei sowohl mit der Größe des Untersuchungsgebietes als auch mit dessen räumlicher Auflösung. Dieser Trade-Off lässt sich lösen, in dem mithilfe des *r.horizon*-Moduls im Vorfeld Horizontkarten für das gesamte Gebiet mit relativ niedriger Auflösung und nur für das nahe Umfeld der interessanten PV-Standorte detaillierte Horizontkarten erstellt werden. Die Horizontkarten dienen als Input für *r.sun* und werden für jeden Azimut (Richtungswinkel) der gewählten zeitlichen Auflösung berechnet. Damit lässt sich sowohl die gesamte Topographie als auch die nahe Umgebung der PV-Anlage effizient in der Beschattungsrechnung berücksichtigen.

Der zweite Schritt im Prognosemodell betrifft die Extraktion der Solarstrahlungswerte für ausgewählte Flächen. Hierzu bedient sich das Modell der Module *PKextract* und *PKdumpogr* der Anwendung *PK-Tools* (KEMPENEERS 2014) und Vektordaten, welche die zu analysierenden PV-Flächen kennzeichnen. Die aus den Rasterkarten extrahierten Werte werden als Zeitreihen in Form von Textdateien gespeichert und repräsentieren die Solarstrahlung für die jeweiligen Anlagen. Die Analyse kann dabei sowohl für PV auf Hausdächer als auch für PV auf Freiflächen durchgeführt werden.

Im dritten und letzten Schritt kommen die erzeugte Zeitreihen der Solarstrahlung und die Zeitreihen der Lufttemperatur zur jeweiligen Wetterregion aus den TRY zum Einsatz. Die Daten sind Grundlage der Ermittlung des Stromertrags einer PV-Anlage, die mit einem Tabellenkalkulationsprogramm durchgeführt wird. Unter Beachtung der Anlagenparameter stehen im Resultat Ertragswerte in Wh je Quadratmeter Modulfläche in 15 Minuten Zeitschritten für das ganze Jahr. Die Berechnungen stützen sich dabei auf die Formeln von JAKUBIEC & REINHART (2013, 133, Gleichungen 2, 3 und 4).

4 Photovoltaik in der E-WALD-Region

Die Integration von PV in virtuelle Kraftwerke erfordert fundierte Kenntnisse zu den Ertragskurven, da die anderen Kraftwerkskomponenten wie etwa BHKWs oder Speichersysteme in der Lage sein müssen, die Schwankungen der PV ausgleichen zu können. Demzufolge ist es hilfreich, bereits bei der PV selbst die Variabilität der Erzeugung durch eine geschickte Standort- und Anlagenwahl zu minimieren, um dadurch die Ersatz- und Speicherleistung möglichst klein zu halten. Ein Ansatz hierzu ist Einbeziehung von Anlagen verschiedener Ausrichtungen und die geographische Verteilung der Anlagen in unterschiedliche Wetterregionen.

Obwohl sich die E-WALD-Region auf den südöstlichen Bayerischen Wald beschränkt, wird das vorgestellte Prognosemodell angewendet, um kleinräumige meteorologische und topographische Unterschiede zu analysieren. Als Input dienen das frei zugängliche DOM25 der europäischen Union (EEA 2013) sowie LIDAR-Daten der Bayerischen Vermessungsverwaltung von jeweils einem Quadratkilometer um die analysierten PV-Standorte. Die Rasteranalyse im Umfeld der Anlagen hat eine räumliche Auflösung von einem Quadratmeter. In die Analyse werden drei PV-Standorte innerhalb der E-WALD-Region mit einbezogen. Die Standorte sind durch die jeweils unterschiedliche Zugehörigkeit zu den drei vorkommenden Wetterregionen charakterisiert (vgl. Abbildung 1).

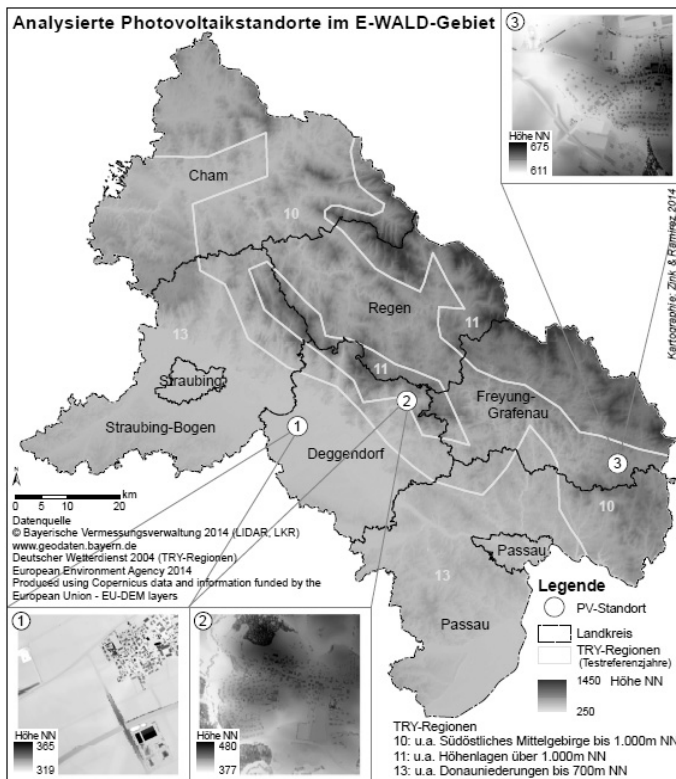


Abb. 1: Analyisierte Photovoltaikstandorte im E-WALD-Gebiet

In jedem der analysierten Gebiete werden sieben Flächen potenzieller und/oder bestehender PV-Anlagen mit verschiedenen Ausrichtungen betrachtet. Die Flächen repräsentieren dabei ausnahmslos Dachanlagen, deren Größen sich näherungsweise am bilanziellen Bedarf der E-WALD-Flotte orientieren. Die Ertragswerte der insgesamt 21 Flächen werden in Wh und in 15 Minuten Zeitintervallen über ein ganzes Jahr berechnet. Für die Quantifizierung der Variabilität wird in Anlehnung an HOFF & PEREZ (2012, 2178, Gleichung 1) auf die Standardabweichung der Veränderung pro Zeitschritt des PV-Ertrages zurückgegriffen. Die Kalkulation erfolgt sowohl für einzelne Standorte als auch für mögliche Standortkombinationen. Die Ergebnisse zeigen, dass innerhalb einer Analyseregion eine Reduktion der Variabilität um 15 % erreicht werden kann, wenn statt einer einzigen PV-Anlage eine Kombination von Anlagen mit unterschiedlichen Ausrichtungen und verschiedenen Beschattungsverhältnissen verwendet wird. Verteilt man die Anlagen zusätzlich auf die drei Wetterregionen des E-WALD-Gebietes, so steigt dieser Wert auf bis zu 48 %.

Folglich lassen sich enorme Optimierungspotenziale bei der Gestaltung kleinräumiger virtueller Kraftwerke konstatieren. Der Vergleich zwischen den PV-Ertragsveränderungen für den Einzelstandort mit der höchsten Variabilität und der, mittels dem Prognosemodell ermittelten stabilsten Anlagenkombination ist in Abbildung 2 dargestellt. Gerade extreme Ausschläge der Stromproduktion (hellgraue Linie) können stark abgebildert werden, was für das virtuelle Kraftwerk ein entscheidender Aspekt ist. So trägt das Modell dazu bei, PV in virtuellen Kraftwerken gezielt zu nutzen und verhilft der Planung derartiger Kraftwerke zu einer ökonomisch und technologisch verbesserten Auslegung von Ersatz- und Speicherkapazitäten.

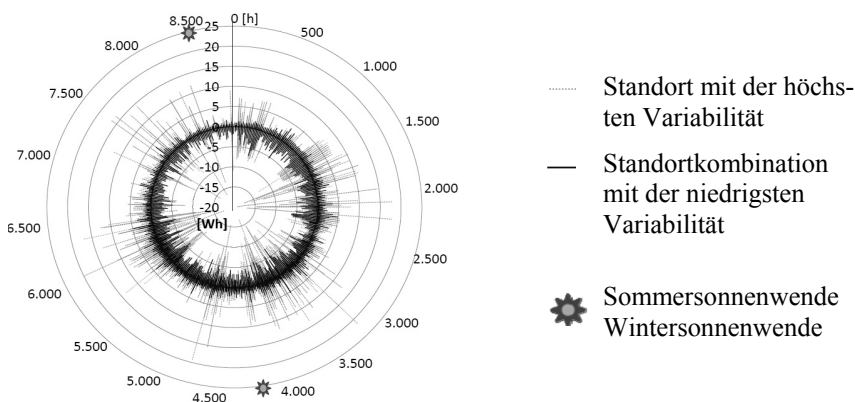


Abb. 2: PV-Ertragsänderungen zwischen 15-minütigen Zeitschritten für einen durchschnittlichen Quadratmeter des Standorts mit der höchsten Variabilität und der Standortkombination mit der niedrigsten Variabilität für ein ganzes Jahr.

5 Ausblick

Aufbauend auf den Forschungsaktivitäten im Rahmen des regionalen Elektromobilitätsprojektes E-WALD zeigt der Beitrag exemplarisch für die PV, wie diese Technologie zur Versorgung von Elektromobilitätskonzepten eingesetzt werden kann und welche räumlichen

Problemstellungen bei der Planung kleinräumiger virtueller Kraftwerke auftreten. Die Simulation von Stromertragswerten aus der PV erzielt unter Verwendung des TRY-Wetterdatensatzes und LIDAR-Daten zeitlich wie räumlich hochaufgelöste Ergebnisse, die feinste Unterschiede erkennen lassen. Wie dargelegt, kann so durch eine gezielte Kombination verschiedener Anlagen und Standorte in einem virtuellen Kraftwerk die Variabilität der Stromproduktion verringert werden.

Eine Weiterentwicklung des Verfahrens betrifft zum einen die Verwendung von live-Wetter- und Anlagendaten. Zum anderen soll das Modell für die permanente Berechnung von Ertragswerten mehrerer Anlagen parallel eingesetzt und diese Daten in das virtuelle Kraftwerk integriert werden. Angewendet auf verschiedene Standorte und Anlagenkonfigurationen (Ausrichtung der Module, Verschattung, Wirkungsgrad, usw.) liefert die vorgestellte Methodik zudem ein Set an prognostizierten Jahres- und Tageserzeugungskurven. Die Ergebnisse sind folglich auch Bewertungsgrundlage für das Kraftwerksportfolio und helfen sowohl die PV-Anlagen als auch die Standorte hinsichtlich ihrer Integrationsmöglichkeit in virtuelle Kraftwerke zu beurteilen. Neben der Identifizierung von Flächen für den Ausbau von Kraftwerken auf Basis von Landschaftsmerkmalen und Bodennutzungskategorien prädestinieren sich GI-Systeme damit auch als passende Werkzeuge zur Modellierung und Analyse von zeitlich-räumlichen Prozessen für die Planung dezentraler Energiesysteme.

Literatur

- E-WALD GMBH (2014), Über das Projekt, E-WALD Modellregion Bayerischer Wald.
<http://e-wald.eu/das-projekt/uber-das-projekt/> (20.03.2014).
- HOFF, T. E. & PEREZ, R. (2012), Modeling PV fleet output variability. *Solar Energy*, 86 (8), 2177-2189.
- HOFIERKA, J. & SURI, M. (2002), The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In: *Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference*, 1-19.
- JAKUBIEC, J. A. & REINHART, C. F. (2013), A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly Daysim simulations. In: *Solar Energy*, 93, 127-143.
- KEMPENEERS, P. (2014), PK-Tools, Open source toolkit for geospatial data.
<http://pktools.nongnu.org> (15.01.2014).
- ROTHFUSS, R. & LE BRIES, J. (2013), Elektromobilität und Pedelecs: Räumliche Neuordnung des Verkehrssystems? *Geographische Rundschau*, 6, 42-48.
- SODA-SOLAR RADIATION DATA (2004), Time Series of Solar Radiation Data.
http://soda-is.com/eng/services/services_radation_free_eng.php (18.01.2014).
- WBGU – WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (2011), *Welt im Wandel, Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation, Hauptgutachten*. Berlin.
- ZINK, R. (2013), Ländliche Entwicklung durch Erneuerbare Energien – Das Beispiel Photovoltaik in Niederbayern. *STANDORT – Zeitschrift für Angewandte Geographie*, 37, 172-178.