

GIS-basierte Ermittlung des Leistungspotenzials von Eignungsflächen für Windkraftnutzung durch simulierte Windparkplanung: ein geometrischer Ansatz

Johannes UHL

Pfalzwerke Netz AG, Ludwigshafen · johannes.uhl@pfalzwerke-netz.de

Dieser Beitrag wurde durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.

Zusammenfassung

Windkraft ist eine der erneuerbaren Energiequellen, für die in den kommenden Jahrzehnten hohe Zuwachsraten prognostiziert werden. Um die Stromnetze von morgen bereits jetzt für eine zunehmende dezentrale Energieeinspeisung durch Windkraft sinnvoll auszulegen, ist die Frage nach der geographischen Verteilung des Windkraftpotenzials von großer Bedeutung für Entscheidungsträger aus Politik und dem Energieversorgungsbereich. Hierfür spielen Geodaten und GIS-Technologie eine zentrale Rolle. Neben der Identifizierung von Flächen, die aus technischer, raumplanerischer und wirtschaftlicher Sicht potenziell zur Windkraftnutzung geeignet sind, sind insbesondere quantitative Aussagen über das zu erwartende Leistungspotenzial in diesen Gebieten von großer Relevanz. Die zu erwartende Leistung bei einem Vollausbau der Eignungsflächen kann bei großräumigen Analysen mit ausreichender Genauigkeit anhand der Festlegung einer Referenzanlage und eines entsprechenden Flächenfaktors ermittelt werden. Für konkrete Planungsvorhaben lassen sich anhand komplexer Modelle aus Statistik und Strömungslehre exaktere Leistungsprognosen erzielen. In dieser Arbeit wird ein GIS-basiertes Verfahren vorgestellt, welches unter Berücksichtigung von geometrischen Vorgaben eine mögliche Windparkplanung simuliert und somit eine genauere Abschätzung der zu erwartenden Leistung auch für großflächige Gebiete ermöglicht.

1 GIS-gestützte Potenzialanalysen für Windenergie

Die Verwendung von GIS-Technologie und Geodaten zur Abschätzung von Windenergiepotenzialen ist weitverbreitet. Hierfür können verschiedene Daten zum Einsatz kommen und unterschiedliche methodische Ansätze verfolgt werden. Dieser Abschnitt versucht, einen Überblick über Datengrundlagen und Methoden zur Windpotenzialanalyse zu geben.

1.1 Datengrundlagen

Winddaten bilden die wichtigste Grundlageninformation, um das Potenzial für Windkraft abzuschätzen. Anhand meteorologischer Messungen werden Windgeschwindigkeiten, Windrichtungen sowie deren Häufigkeitsverteilungen registriert. Diese Informationen kön-

nen dann horizontal interpoliert werden, um flächenhafte Daten zu erhalten, sowie für verschiedene Bezugshöhen vertikal extrapoliert werden, was insbesondere für die Nabenhöhe von Windkraftanlagen (WEA) interessant ist (ZHOU et al. 2011). Anhand permanenter Messungen und daraus entstandenen Zeitreihen lassen sich flächenhaft mittlere Windgeschwindigkeiten ableiten, welche für grobe Potenzialabschätzungen ausreichen. Solche Daten sind in Rasterform auf globaler und in der Regel auf nationaler Ebene erhältlich. Für detaillierte Betrachtungen können auch die Häufigkeitsverteilungen von Windrichtung und Windgeschwindigkeit hinzugezogen werden (OZERDEM & TURKELI 2003, ALAMDARI et al. 2012, GASS et al. 2013).

Landnutzungsdaten können in vektorieller Form oder als Rasterdaten vorliegen. Informationen über bebauete Flächen wie z. B. Wohn- und Industriegebiete, Verkehrsnetze, Waldflächen und Schutzgebiete bilden die Grundlage, um in Kombination mit Angaben aus **gesetzlichen Festlegungen** wie Mindestabständen die für eine Windenergienutzung relevanten Abstands- und Ausschlussflächen zu erzeugen. Die Nähe zum Straßennetz kann im Hinblick auf Konstruktions- und Instandhaltungskosten von WEA außerdem eine Rolle bei der wirtschaftlichen Bewertung von Standorten spielen (MANN et al. 2012, VAN HAAREN & FTHENAKIS 2011). Mögliche Quellen für Landnutzungsdaten sind z. B. CORINE Land Cover-Daten oder auch digitale Landschaftsmodelle der Katasterverwaltungen.

Digitale Geländemodelle eignen sich dazu, um Gebiete auszuschließen, welche aufgrund ihrer Orographie, wie z. B. wegen zu starker Hangneigung, nicht für die Installation von WEA geeignet sind, und ermöglichen außerdem eine nach Geländebeschaffenheit differenzierte Verwendung von Referenzturbinen für die Potenzialberechnung (DOMINGUEZ-BRAVO et al. 2007, MCKENNA et al. 2014). Die aus digitalen Geländemodellen ableitbaren Kennwerte für die Geländerauigkeit spielen außerdem eine Rolle bei der Berechnung komplexer Windmodelle (ALAMDARI et al. 2012).

Oftmals werden Flächen, die zur Nutzung durch Windenergie verwendet werden können oder davon ausgeschlossen sind, in Raumordnungsplänen auf nationaler, regionaler und kommunaler Ebene definiert. Liegen diese **Raumplanungsdaten** wie z. B. Regionalpläne oder Flächennutzungspläne vor, so können diese ebenfalls in die Potenzialanalyse einfließen (KLÄRLE 2013). Bei der Planung von WEA sind einerseits gewisse Mindestabstände zum **elektrischen Versorgungsnetz** einzuhalten, insbesondere zu überirdischen Versorgungsleitungen höherer Spannungsebenen. Diese Abstandsflächen können anhand von Netzdaten generiert werden, welche i. d. R. von Netzbetreibern vorgehalten werden. Andererseits spielt die Nähe zum elektrischen Versorgungsnetz und zu geeigneten Einspeisepunkten eine wichtige Rolle bei der Bewertung potenzieller WEA-Standorte in Bezug auf deren Netzanschlusseignung (z. B. MANN et al. 2012).

In einigen sehr großflächigen Potenzialanalysen werden auch **sozioökonomische Daten** wie die Bevölkerungsdichte verwendet, um dünn besiedelte bzw. unbewohnte Gebiete zu identifizieren, welche ein höheres Windkraftpotenzial besitzen als Gebiete hoher Bevölkerungsdichte (NGUYEN 2007, JANKE 2010, MANN et al. 2012).

1.2 Ermittlung von Eignungsflächen mit GIS

Die Identifizierung von Flächen, welche potenziell zur Nutzung durch Windkraft geeignet sind, kann anhand verschiedener Methoden geschehen, je nach Verfügbarkeit von Daten und Größe des Untersuchungsgebietes.

Für großflächige Analysen bieten sich rasterbasierte Multi-Criteria-Analysen an (HIGGS et al. 2008). Alle flächenhaften Daten, die zur Potenzialanalyse beitragen, liegen hierfür als Rasterdaten vor. Durch Bildung binärer Raster („Fläche geeignet“ oder „Fläche nicht geeignet“) und pixelweiser Kombination lassen sich diejenigen Flächen ermitteln, welche sämtliche Eignungsbedingungen erfüllen (BABAN & PARRY 2001, VAN HAAREN & FTHENAKIS 2011). Alternativ können mittels Rasterdaten auch Eignungsgrade modelliert werden, z. B. basierend auf Fuzzy Logic (HANSEN 2005, AYDIN et al. 2013) oder durch Zuweisung von Gewichtungen für einzelne Kriterien (TEGOU et al. 2010, AL-YAHYAI et al. 2012). Auf diese Weise lassen sich graduelle Eignungsflächen ermitteln (z. B. „Fläche nicht geeignet“ / „mittelmäßig geeignet“ / „sehr geeignet“).

Auch vektorbasierte Ansätze zur Windpotenzialanalyse sind weitverbreitet. Hierbei werden die Eignungsflächen über geometrische Operationen wie „Clip“, „Buffer“ und „Erase“ bestimmt. Insbesondere bei kleinräumigen Potenzialanalysen lassen sich durch vektorbasierte Ansätze höhere geometrische Genauigkeiten erreichen, da eine Rasterisierung kleinmaßstäblicher Vektordaten zu Genauigkeits- und Informationsverlusten führen kann. Allerdings lässt sich mittels vektorbasierter Flächenverschneidung die Windkrafteignung lediglich in binärer Form („geeignet“ / „nicht geeignet“) modellieren. Beispiele für vektorbasierte Ansätze sind KREWITT & NITSCH (2003) und PHUANGPORNPIITAK & TIA (2012).

Bei der Auswahl der Methode zur Ermittlung von Eignungsflächen (rasterbasiert / vektorbasiert) spielen also neben der erforderlichen Komplexität des Modells (Anzahl der Eignungsbedingungen und deren Abstufungen) auch das Format und die räumliche Auflösung der Eingangsdaten sowie die Größe des Untersuchungsgebietes und der damit verbundene Rechenaufwand eine wichtige Rolle.

1.3 Quantifizierung des Leistungspotenzials der Eignungsflächen

Die folgenden Methoden dienen dazu, um für die ermittelten Eignungsflächen eine quantitative Aussage über deren Windkraftpotenzial treffen zu können.

Windleistungsdichte

Die Windleistungsdichte **WLD** (in Watt/m²) berechnet sich anhand von Mittelwerten der Windgeschwindigkeit v und der Dichte der Luft ρ nach MANWELL et al. (2003) als

$$WLD = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad \text{vgl. ALAMDARI et al. (2012)} \quad (1)$$

Anhand der Windleistungsdichte lässt sich für die nutzbare Fläche ein näherungsweise, theoretisches Windleistungspotenzial bestimmen. Dieser Ansatz wird hauptsächlich bei großflächigen Betrachtungen verwendet (SCHALLENBERG-RODRIGUEZ 2013).

Turbinendichte

Aus technischer Sicht ist es sinnvoll, zunächst die mögliche Anzahl der in den geeigneten Flächen installierbaren WEA zu bestimmen, um daraus Rückschlüsse auf die potenzielle Leistung zu ziehen.

Üblicherweise werden die WEA in Windparks arrayförmig angeordnet, um gegenseitige Beeinträchtigungen zu minimieren. Hierbei spielt die vorherrschende Hauptwindrichtung (HWR) eine Rolle, sowie die Abstände zwischen den Anlagen in HWR d_1 und zwischen den Anlagenreihen quer zur HWR d_2 , welche als Vielfache des Rotordurchmessers D ge-

wählt werden (SCHALLENBERG-RODRIGUEZ 2013), wobei d_1 üblicherweise das 5- bis 12-fache und d_2 das 3- bis 7-fache des Rotordurchmessers beträgt (NGUYEN 2007). Anhand dieser Abstandsparameter sowie des Rotordurchmessers einer Referenzanlage lässt sich eine rechteckige Fläche A_{WEA} ermitteln, welche eine WEA benötigt.

$$A_{WEA} = d_1 d_2 D^2 \quad (2)$$

Anhand dieser Fläche und der angenommenen Wirkleistung der Referenzanlage W_{WEA} lässt sich die Turbinendichte TD als

$$TD = \frac{W_{WEA}}{A_{WEA}} \quad (3)$$

sowie die Anzahl der installierbaren WEA n_{WEA} und die zu erwartende Leistung W_{POT} für die potenziell nutzbaren Flächen A_{POT} bestimmen:

$$n_{WEA} = \frac{A_{POT}}{A_{WEA}} \quad (4)$$

$$W_{POT} = TD \cdot A_{POT} \quad (5)$$

Dieser weitverbreitete Ansatz wird unter Anderem von HOSSAIN et al. (2011), ARNETTE & ZOBEL (2011), RUIZ-ARIAS et al. (2012), GRASSI et al. (2012) sowie MCKENNA et al. (2014) verwendet.

Micro-Siting

Bei konkreten Planungsvorhaben werden zur optimalen Anordnung der WEA komplexe Modelle aus Strömungslehre und Statistik verwendet, um einen maximalen wirtschaftlichen Nutzen des Windparks zu erreichen (sogenanntes „Micro-Siting“). Hierzu werden die Kenngrößen der geplanten Anlagentypen sowie Informationen über Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen sowie deren Häufigkeiten verwendet, um z. B. vom Windparkplaner zunächst grob manuell platzierte WEA-Standorte zu optimieren. Eine gute Übersicht über vorhandene Micro-Siting-Methoden wird von GONZÁLEZ et al. (2013) gegeben.

Abbildung 1 stellt die beschriebenen Daten und Methoden noch einmal im Kontext mit dem im Folgenden präsentierten Verfahren der „simulierten Windparkplanung“ dar.

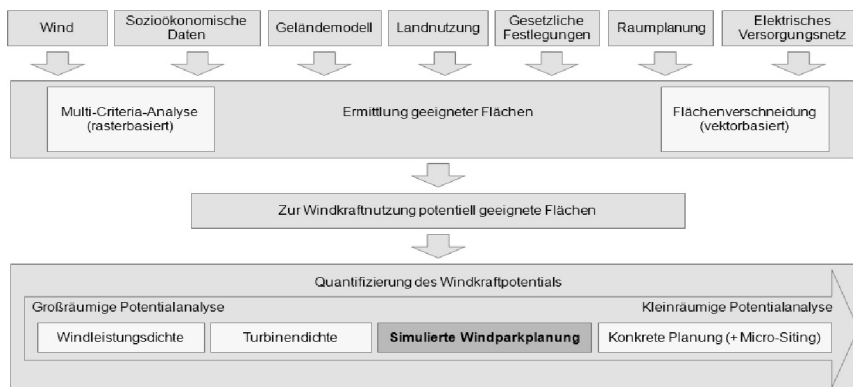


Abb. 1: Übersicht über mögliche Datengrundlagen und Methoden zur Windpotenzialanalyse (Quelle: eigene Darstellung)

2 Methode

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, erfolgt bei großflächigen Windpotenzialanalysen die Quantifizierung des Leistungspotenzials häufig anhand der Windleistungsdichte oder der Turbinendichte. Dies ist für grobe Potenzialabschätzungen ausreichend. Micro-Siting-Verfahren, welche genauere Prognosen erlauben, kommen häufig erst bei konkreten, kleinräumigen Planungen zu Einsatz. Im Folgenden wird ein geometrisches Verfahren präsentiert, welches auch bei großflächigen Betrachtungen genauere Prognosen für die Anzahl installierbarer WEA innerhalb der Eignungsflächen erlaubt.

Damit sich in die WEA in einem Windpark nicht gegenseitig beeinträchtigen, sind gewisse Abstände zwischen den Anlagen einzuhalten (siehe Kap. 1.3). Die Methode der Turbinendichte kann als Näherung für eine möglichst platzsparende, versetzte Anordnung von WEA gesehen werden, wobei sich keine Anlage innerhalb der Abstandsellipsen anderer Anlagen befinden sollte, beispielhaft dargestellt in Abbildung 2.

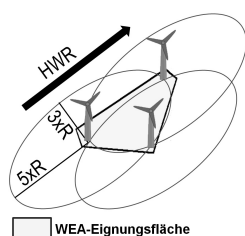


Abb. 2:

Beispielhafte Abstandsellipsen als Planungskriterium bei einer Windparkplanung, hier für eine 5Dx3D-Konfiguration (Quelle: eigene Darstellung)

Bei der Planung eines Windparks wird häufig so vorgegangen, dass zunächst grob eine maximale Anzahl von Anlagenstandorten unter Berücksichtigung ihrer Abstandsellipsen manuell in die dafür vorgesehene Fläche positioniert wird. Anschließend kann durch Micro-Siting-Verfahren die Windpark-Konfiguration hinsichtlich des maximalen Ertrags oder anderer wirtschaftlicher Kriterien optimiert werden. Dieser Vorgang der groben WEA-Positionierung innerhalb der Eignungsflächen wird im folgenden Verfahren automatisiert und simuliert somit eine Windparkplanung, was zur Potenzialabschätzung genutzt werden kann.

2.1 Clusteranalyse der Eignungsflächen

Die in einem vorherigen Schritt (durch raster- oder vektorbasierte Methoden) ermittelten Eignungsflächen bestehen mitunter aus vielen Flächensegmenten, was z. B. auf die Verwendung hochauflösender Flächennutzungsdaten zurückzuführen ist. Deshalb werden im folgenden Verfahren die Eignungsflächen zunächst zu Clustern zusammengefasst, welche individuell verarbeitet werden können. Dies ist dann der Fall, wenn die Abstände eines Flächensegmentes zu den Nachbarsegmenten so groß sind, dass es sich mit keiner der möglichen Abstandsellipsen aus benachbarten Flächensegmenten überschneidet, da sonst das Planungskriterium möglicherweise nicht erfüllt wäre. Um dies sicherzustellen, wird um jedes Flächensegment zunächst ein vom Autor entwickelter „Oriented-Ellipse-Buffer“ (OEB) gelegt. Dies bezeichnet eine Abstandsfläche, welche anhand der gewählten Parameter der Abstandsellipse gebildet wird und den Bereich darstellt, welchen die Abstandsellipsen der innerhalb der Fläche positionierten WEA maximal abdecken können.

Die OEB-Fläche eines Polygonumrings (Abbildung 3a) wird folgendermaßen generiert:

- Verdichten der Stützpunkte des Polygonumrings um einen geeigneten Wert, z. B. durch Halbieren aller Liniensegmente (Abbildung 3b).
- Platzieren einer Ellipse mit der gewählten Ausrichtung und Dimension auf jedem Stützpunkt des Polygonumrings (Abbildung 3c).
- Erzeugen einer geeigneten konkaven Hülle um das zu puffernde Polygon und alle Ellipsenflächen auf den Stützpunkten (Abbildung 3d).

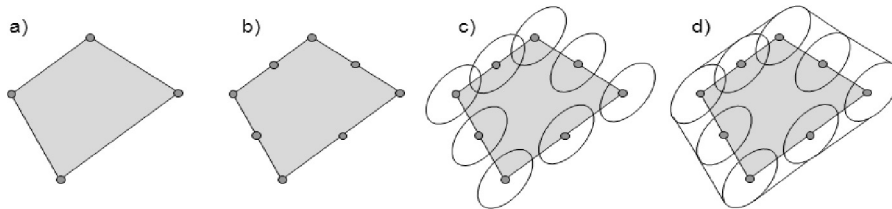


Abb. 3: Erzeugen des „Oriented-Ellipse-Buffers“ (Quelle: eigene Darstellung)

Schneidet sich ein Segment A mit der OEB-Fläche eines Nachbarn B, so gehören die Segmente A und B zum gleichen Cluster und dürfen im Folgenden nicht unabhängig voneinander verarbeitet werden.

2.2 Setzen von WEA-Standorten innerhalb der Clusterflächen

Das folgende Beispiel verwendet eine 5Dx3D-Konfiguration für eine Hauptwindrichtung von Südwest nach Nordost sowie die Referenzanlage Enercon E-126 ($W_{WEA} = 6$ MW, $D = 126$ m). Zunächst werden innerhalb der Bounding Box jedes Clusters parallele Linien im definierten Querabstand in Richtung der HWR über die Fläche gelegt. Die Schnittpunkte dieser Linien mit dem Flächenumring werden ermittelt und derjenige Schnittpunkt mit der geringsten Distanz zur Südwest-Ecke der Bounding Box wird als Startpunkt definiert (Abbildung 4 links), um eine optimale Anordnung der WEA zu erhalten. Ausgehend von diesem Punkt wird dann ein Punktraster über die Fläche gelegt, welche den Kriterien aus Abb. 2 entspricht (Abbildung 4 rechts). Die Punkte, welche sich innerhalb der Eignungsfläche befinden (hier: Punkte 1 und 2), werden als mögliche Standorte registriert (Abbildung 5 links).

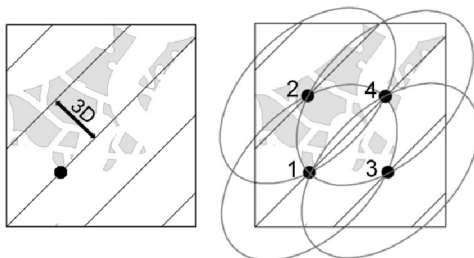


Abb. 4: Clusterfläche mit ermitteltem Startpunkt für das Punktraster (links) und regelmäßiges Ellipsenraster (rechts) (Quelle: eigene Darstellung)

2.3 Ermittlung noch ungenutzter Flächen

Durch Bildung der Ellipsenflächen der registrierten WEA-Standorte und geometrischer Subtraktion („Erase“) von den ursprünglichen Eignungsflächen können noch ungenutzte Flächen bestimmt werden (Abbildung 5 Mitte). Diese werden dann erneut anhand des „Oriented-Ellipse-Buffers“ zu Clustern zusammengefasst und mit WEA-Standorten besetzt (Abbildung 5 rechts). Dies geschieht in einem iterativen Verfahren so lange, bis keine neuen WEA-Standorte mehr hinzukommen. Dies bedeutet, dass entweder alle Flächen bereits verwendet werden, oder dass aufgrund der Geometrie der Clusterflächen eine Bildung von Schnittpunkten mit den Rasterlinien und somit eine Ermittlung des Startpunktes nicht mehr möglich ist. In solch einem Fall wird nacheinander für jedes der verbliebenen Flächenobjekte der Polygonschwerpunkt als möglicher WEA-Standort verwendet, und die restlichen Flächen um die Fläche der entsprechenden Abstandsellipse reduziert. Dies geschieht so lange, bis keine nutzbare Fläche mehr übrig bleibt (siehe Tabelle 1).

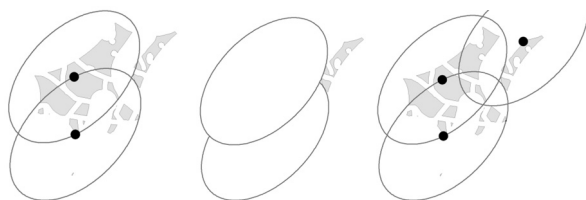


Abb. 5: Sich innerhalb der Eignungsflächen befindliche WEA-Standorte (links), ungenutzte Flächen nach der „Erase“-Funktion (Mitte) und Standorte nach der zweiten Iteration (rechts) (Quelle: eigene Darstellung)

2.4 Ergebnisse

Die ermittelten WEA-Standorte aller Clusterflächen aller Iterationsschritte (in diesem Falle 68 Stück) stellen eine gute Simulation des WEA-Vollausbaus der Eignungsflächen unter Berücksichtigung der definierten Abstandskriterien dar.

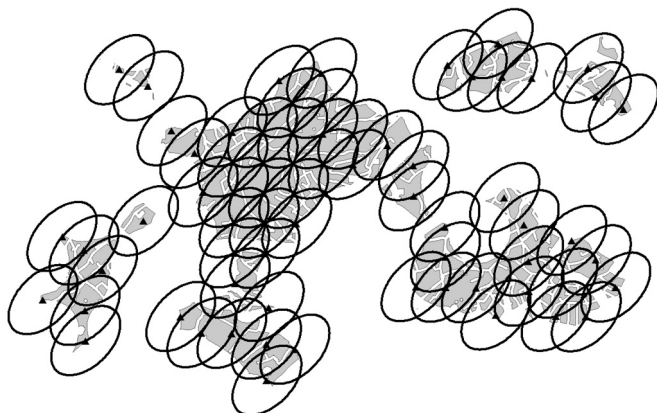


Abb. 6: Ergebnis der simulierten Windparkplanung für die zuvor ermittelten WEA-Eignungsflächen (Quelle: eigene Darstellung)

Tabelle 1: Übersicht der einzelnen Iterationsschritte

Iteration	Eignungsfläche [m ²]	Cluster	WEA-Standorte	Bereits verwendete Fläche [m ²]
1	8.620.429	1	39	6.926.794
2	1.693.635	9	14	8.191.318
3	429.111	9	7	8.573.455
4	46.974	6	2	8.601.609
5	18.820	5	1	8.601.624
6	18.805	4	0	8.601.624
7	18.805	4	5 (Schwerpunkte)	8.620.429
Summe WEA-Standorte:			68	

3 Validierung und Fazit

Für die ermittelten Eignungsflächen ($A_{POT} = 8.620.429 \text{ m}^2$) wird die Potenzialermittlung zusätzlich anhand folgender Verfahren durchgeführt und mit den Ergebnissen der simulierten Windparkplanung verglichen:

- Methode der Turbinendichte ($TD = 25,195 \text{ MW/km}^2$ für die gewählte Referenzanlage und Konfiguration).
- Hypothetische, manuelle Grobplanung ohne Micro-Siting-Optimierung. Hierbei werden WEA-Standorte manuell möglichst platzsparend platziert, wobei die notwendigen Abstände eingehalten werden.

Durch Multiplikation der WEA-Anzahl mit der Wirkleistung der Referenzanlage W_{WEA} erhält man das Leistungspotenzial. Die Ergebnisse der drei Methoden sind in Tabelle 2 gegenübergestellt.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der drei Methoden zur Potenzialabschätzung.

Methode	Anzahl potenzieller WEA	Leistungspotenzial [MW]
Turbinendichte	36	217
Simulierte Windparkplanung	68	408
Manuelle Planung	77	462

Durch die manuelle Planung wird eine nahezu maximal mögliche Anzahl von WEA-Standorten erzielt (77 WEA-Standorte), was einem Vollausbau der Eignungsflächen am nächsten kommt. Es ist zu erkennen, dass die Methode der Turbinendichte eine deutlich konservative Schätzung des Windkraftleistungspotenzials liefert (36 WEA-Standorte), da gegenseitige Überschneidungen der Abstandsellipsen sowie Überschneidungen an den Rändern der Potenzialflächen nicht optimal modelliert werden. Eine ähnliche Beobachtung wird auch von KRENN et al. (2011) gemacht. Das Ergebnis der simulierten Planung (68 WEA-Standorte) nähert sich deutlich dem Ergebnis der manuellen Planung an und kann somit als eine geeignete Methode zur Quantifizierung der Obergrenze des Windkraftpotenzials betrachtet werden, da ein WEA-Vollausbau der ermittelten Eignungsflächen mit aus-

reichender Genauigkeit abgeschätzt wird. Da eine manuelle Planung nicht automatisierbar ist, bietet die simulierte Windparkplanung eine wirtschaftliche Alternative bei der Potenzialabschätzung großflächiger Gebiete und könnte im Übrigen auch bei konkreten Planungen großer Windparks als Grundlage dienen. Das hier vorgestellte Verfahren der simulierten Windparkplanung liefert realistischere Leistungsprognosen als z. B. die Methode der Turbinendichte, allerdings sollte auch der wesentlich höhere Implementierungs- und Rechenaufwand der Methode an dieser Stelle erwähnt werden.

Analysen mit unterschiedlich ausgeprägten Eignungsflächen und Windparkkonfigurationen sowie der Vergleich mit Micro-Siting-Methoden könnten zur weiteren, systematischen Validierung des Verfahrens verwendet werden. Darüber hinaus könnten prognostizierte und tatsächlich erzielte Erträge von bereits realisierten Windparks miteinander verglichen werden, um das Verfahren durch eine Kalibrierung anhand realer Daten eventuell weiter zu verfeinern.

Literatur

- AL-YAHYAI, S., CHARABI, Y., GASTLI, A. & AL-BADI, A. (2012), Wind Farm Land Suitability Indexing Using Multi-Criteria Analysis. *Renewable Energy*, 44, 80-87.
- ALAMDARI, P., NEMATOLLAHI, O. & MIRHOSSEINI, M. (2012), Assessment of Wind Energy in Iran: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (1), 836-860.
- ARNETTE, A. N. & ZOBEL, C.W. (2011), Spatial Analysis of Renewable Energy Potential in the Greater Southern Appalachian Mountains. *Renewable Energy*, 36 (11), 2785-2798.
- AYDIN, N. Y., KENTEL, E. & DUZGUN, H. (2013), GIS-Based Site Selection Methodology for Hybrid Renewable Energy Systems: A Case Study from Western Turkey. *Energy Conversion and Management*, 70, 90-106.
- BABAN, S. M. J. & PARRY, T. (2001), Developing and Applying a Gis-Assisted Approach to Locating Wind Farms in the UK. *Renewable Energy*, 24 (1), 59-71.
- DOMINGUEZ-BRAVO, J., GARCÍA CASALS, X. & PINEDO PASCUA, I. (2007), GIS Approach to the Definition of Capacity and Generation Ceilings of Renewable Energy Technologies. *Energy Policy*, 35 (10), 4879-4892.
- GASS, V., SCHMIDT, J., STRAUSS, F. & SCHMID, E. (2013), Assessing the Economic Wind Power Potential in Austria. *Energy Policy*, 53, 323-330.
- GONZÁLEZ, J. S., PAYÁN, M. B., SANTOS, J. M. R. & GONZÁLEZ-LONGATT, F. (2013), A Review and Recent Developments in the Optimal Wind-Turbine Micro-Siting Problem. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 133-144.
- GRASSI, S., CHOKANI, N. & ABHARI, R. S. (2012), Large Scale Technical and Economical Assessment of Wind Energy Potential with a GIS Tool: Case Study Iowa. *Energy Policy*, 45, 73-85.
- HANSEN, H. S. (2005), GIS-based multi-criteria analysis of wind farm development. Report, National Environmental Research Institute, Aarhus, Denmark.
- HIGGS, G., BERRY, R., KIDNER, D. & LANGFORD, M. (2008), Using IT Approaches to Promote Public Participation in Renewable Energy Planning: Prospects and Challenges. *Land Use Policy*, 25 (4), 596-607.
- HOSSAIN, J., SINHA, V. & KISHORE, V. V. N. (2011), A GIS Based Assessment of Potential for Windfarms in India. *Renewable Energy*, 36 (12), 3257-3267.

- JANKE, J. R. (2010), Multicriteria GIS Modeling of Wind and Solar Farms in Colorado. *Renewable Energy*, 35 (10), 2228-2234.
- KLÄRLE, M. (2013), Ausweisung von Windparks: Chancen und Grenzen der Kommunalplanung. *Forum – Zeitschrift des Bundes der Öffentlich bestellten Vermessungsingenieure e. V.*, 2/2013, 20-27.
- KRENN, A., WINKELMEIER, J., TIEFGRABER, C., CATTIN, R., MÜLLER, S., TRUHEZ, H., BIBERACHER, M. & GADOCHA, S. (2011), Endbericht Windatlas und Windpotentialstudie Österreich. <http://www.windatlas.at/downloads/Endbericht.pdf> (11.4.2013).
- KREWITT, W. & NITSCH, J. (2003), The Potential for Electricity Generation from on-Shore Wind Energy under the Constraints of Nature Conservation: A Case Study for Two Regions in Germany. *Renewable Energy*, 28 (10), 1645-1655.
- MANN, D., LANT, C. & SCHOOF, J. (2012), Using Map Algebra to Explain and Project Spatial Patterns of Wind Energy Develop. in Iowa. *Applied Geography*, 34, 219-229.
- MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G. & ROGERS, A. L. (2002), *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons, Amherst, USA.
- MCKENNA, R., HOLLNAICHER, S. & FICHTNER, W. (2014), Cost-Potential Curves for On-shore Wind Energy: A High-Resolution Analysis for Germany. *Applied Energy*, 115, 103-115.
- NGUYEN, K. Q. (2007), Wind Energy in Vietnam: Resource Assessment, Development Status and Future Implications. *Energy Policy*, 35 (2), 1405-1413.
- OZERDEM, B. & TURKELI, M. (2003), An Investigation of Wind Characteristic on The Campus of Izmir Institute of Technology, Turkey. *Ren. Energy*, 28, 1013-1027.
- PHUANGPORNPIITAK, N. & TIA, S. (2011), Feasibility Study of Wind Farms under the Thai Very Small Scale Renewable Energy Power Producer (Vsp) Program. *Energy Procedia*, 9, 159-170.
- RUIZ-ARIAS, J. A., TERRADOS, J., PÉREZ-HIGUERAS, P., POZO-VÁZQUEZ, D. & ALMONACID, G. (2012), Assessment of the Renewable Energies Potential for Intensive Electricity Production in the Province of Jaén, Southern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (5), 2994-3001.
- SCHALLENBERG-RODRIGUEZ, J. (2013), A Methodological Review to Estimate Techno-Economical Wind Energy Production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 272-287.
- TEGOU, L.-I., POLATIDIS, H. & HARALAMBOPOULOS, D. A. (2010), Environmental Management Framework for Wind Farm Siting: Methodology and Case Study. *Journal of Environmental Management*, 91 (11), 2134-2147.
- VAN HAAREN, R. & FTHENAKIS, V. (2011), GIS-Based Wind Farm Site Selection Using Spatial Multi-Criteria Analysis (SMCA): Evaluating the Case for New York State. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (7), 3332-3340.
- ZHOU, Y., WU, W. X. & LIU, G. X. (2011), Assessment of Onshore Wind Energy Resource and Wind-Generated Electricity Potential in Jiangsu, China. *Energy Procedia*, 5, 418-422.