

# Modellierung potenzieller Planflächen für Windkraftanlagen in Bezug auf Lichtemissionen in Niedersachsen

FELIX JAUGSCH<sup>1</sup>, PAULINA RAILE<sup>2</sup> & MARC-O. LÖWNER<sup>3</sup>

*Zusammenfassung: Onshore Windkraftanlagen stellen nach dem BauGB im Außenbereich privilegierte Bauten dar, die allerdings etwa i.V.m. dem BImSchG unter Planvorbehalt bezüglich ihres Schattenwurfes auf Wohngebäude stehen. Hier wird ein mit ArcPy in ArcGIS implementiertes Verfahren vorgestellt, das die Verschattungsdauer von Gebäuden zeitlich hochaufgelöst für potenzielle Standorte in ganz Niedersachsen modelliert. Auf gleichmäßig über das Landesgebiet verteilten Standorten werden in der Auflösung von 1 km potenzielle Planflächen für Windkraftanlagen in Bezug auf die Parameter Mindestabstand sowie maximale täglich und jährliche Verschattungsdauer von Gebäuden bewertet. Die Implementierung ist grundsätzlich geeignet auch die weiteren gesetzlich verankerten Kriterien zur Errichtung einer Windkraftanlage zu überprüfen.*

## 1 Einleitung

Windkraftanlagen (WKA) stellen im Außenbereich privilegierte Bauten dar (§ 35 Abs. 1 BauGB), unterliegen zwecks Vermeidung des Wildwuchses allerdings dem Planvorbehalt nach §35 Abs. 3 Satz 3 BauGB. Dieser ermöglicht kommunalen Raumplanern die Ausweisung von Konzentrationszonen für die Windenergienutzung. Wichtiges Tabukriterium im gesetzlichen Entscheidungsverfahren zur Ausweisung von Windenergiepotenzialflächen ist nach §3 Abs. 2 BImSchG die Lichtemission, worunter bei WKA der Schattenwurf zählt. Demnach unterliegen betroffene Wohngebäude zeitlichen Verschattungshöchstgrenzen von 30 Stunden im Jahr und 30 Minuten am Tag.

Hier wird ein mittels ArcGIS und ArcPy implementiertes Verfahren vorgestellt, das die Verschattungsdauer von Gebäuden zeitlich hochaufgelöst modelliert und die WKA Position auf gegebenen Planungsgebieten optimiert.

Anhand zeitlich hoch aufgelöster Sonnenpositionen und gegebener WKA-Konfiguration werden für eine Vielzahl von möglichen WKA-Standorten Schattenpolygone auf Vektorbasis modelliert und für jeden Zeitabschnitt mit vorhandenen Gebäudegeometrien des OpenStreetMap Projektes (RAMM & TOPF, 2010) verschnitten. Als positiv bewertete Standorte können so zu einer potenziellen Planfläche aggregiert oder in einer höheren räumlichen Auflösung weiter untersucht werden.

1) Felix Jaugsch, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Braunschweig, Pockelsstraße 3, 38106 Braunschweig; E-Mail: f.jaugsch@tu-bs.de

2) Paulina Raile, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Braunschweig, Pockelsstraße 3, 38106 Braunschweig; E-Mail: p.raile@tu-bs.de

3) Marc-O. Löwner, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Braunschweig, Pockelsstraße 3, 38106 Braunschweig; E-Mail: m-o.loewner@tu-bs.de

Durch die so durchgeführte Standortbewertung kann zudem der Anteil der potenziellen Planungsfläche für WKA an der Landesfläche und damit das Gesamtpotenzial der Windenergie abgeschätzt werden. Die Implementierung lässt Erweiterungen problemlos zu und ist auch in der Lage, Anfragen bezüglich weiterer gesetzlicher Auflagen zu bewerten.

## 2 Modellierung potenzieller Planflächen für Windkraftanlagen

Zur Vorbeugung und Einhaltung der Immissionsrichtwerte ist die genaue Wahl einer geeigneten Position innerhalb der ausgewiesenen Planfläche einer zukünftigen Anlage entscheidend. Hierfür wird eine zeitlich hoch aufgelöste Rekonstruktion des Schattenverlaufs einer Windkraftanlage über ein astronomisches Jahr sowie die Bewertung der angrenzenden Gebäude hinsichtlich der Belastung durch Schattenwurf benötigt. Die zeitliche Auflösung der Modellierung des Schattenverlaufs und der Zeitraum über ein Jahr ergeben sich aus den gesetzlichen Grundlagen. Dabei darf ein Gebäude pro Tag höchstens 30 Minuten von einer WKA beschattet werden. Pro Jahr dürfen es nicht mehr als 30 Stunden sein, an denen das Gebäude betroffen ist.

### 2.1 Berechnung der Schattenpolygone mittels hochaufgelöster Sonnenstände

Die Bestimmung der potenziellen Planflächen erfordert zunächst die Rekonstruktion der durch die WKA abgeschatteten Fläche, die hier in Form von Polygonen auf einer Ebene repräsentiert wird. Der Schattenwurf verhindert das Eintreffen von Direktstrahlung auf eine Fläche und hängt sowohl vom jeweiligen Stand der Sonne als auch von der Position und geometrischer Ausprägung der Rotorblätter ab.

Die Berechnung der viertelstundengenauen Sonnenstände in Form von Azimutal- und Höhenwinkel nach (ASTALM 2006; MEEUS 2000) erfolgte in der plattformunabhängigen Skriptsprache Perl (vgl. RICHTER & LÖWNER, 2001). Es wurden dabei nur diejenigen Sonnenwinkelpaare für die weitere Modellierung berücksichtigt, deren Vertikalwinkel größer als fünf Grad betrug, um eine tatsächlich Beleuchtung der WKA zu gewährleisten. Dabei ergaben sich 15.796 Sonnenwinkelpaare, die zur Berechnung des Sonnenvektors (etwa nach BEN FEKIH FRADJ & LÖWNER, 2012) in eine FeatureClass geschrieben wurden.

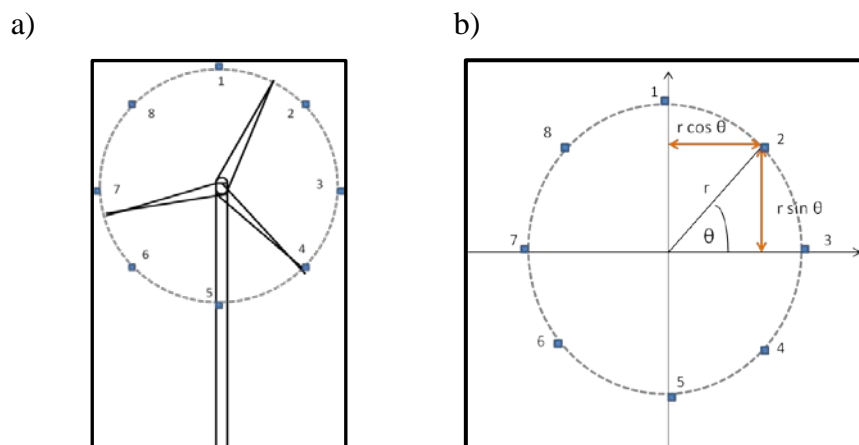


Abb. 1: Approximation der Rotorfläche durch a) acht Randpunkte und b) deren relative Positionsbestimmung

Die den Schattenwurf verursachende Rotorfläche einer WKA wird als Vieleck mit 8 in ihrer relativen Position konstanten Randpunkten abstrahiert. Dabei setzt sich die Position des jeweiligen Randpunktes aus den Standortkoordinaten der WKA, der Höhe der Rotornarbe sowie der Ausrichtung und dem Durchmesser des Rotors zusammen (Abb.1).

Aktuelle Windkraftanlagen besitzen zur Leistungsoptimierung eine Windrichtungsnachführung (HAU 2008), wodurch eine Aktualisierung der X- und Y-Koordinaten der sechs äußeren Randpunkt (2-4, 6-8) notwendig wird. Für die hier vorgestellte Modellierung lagen allerdings keine Wetterdaten in Form von Windrichtungen vor. Daher wird ein Worst-Case-Szenario angenommen, in dem die Rotorfläche sich stets orthogonal zum Azimut der Sonne befindet. Das Ergebnis ist die Modellierung der maximal möglichen Verschattungsfläche für den jeweiligen Zeitabschnitt.

Anhand der Positionen der Randpunkte des Rotors und des Sonnenvektors werden durch Vektorberechnung acht Schnittpunkte mit einer Nullebene bestimmt, zu denen zusätzlich Informationen über die Sonnenwinkel und den entsprechenden Zeitpunkt gespeichert werden. Die anschließende Selektion der Punkte eines Zeitpunktes ermöglicht das Aufspannen eines Polygons. Nach Durchlauf aller Zeitintervalle erhält man die Gesamtverschattungsfläche der WKA über ein Jahr.

Der folgende Pseudocode zeigt einen Überblick über die Schattenpunktberechnung:

```
For SonnenstandX: #####Punkterstellung#####
    Setze RotorpositionX in Berechnung ein:
        Wenn erster Durchlauf:
            RotorpositionX = 1
        Wenn zweiter Durchlauf:
            RotorpositionX = 2
        ETC
    Shadowpoint = Berechnung_Koordinaten(RotorpositionX)
    ErstellePunkt
    Hinzufügen_Metadaten(Zeit,Winkel,Rotorposition)

For Zeit in Sonnenfeature: #####Polygonerstellung#####
    Selektiere Punkte
    Aggregiere
    Hinzufügen_Metdaten (Zeit, Winkel)
```

## 2.2 Verschattungsanalyse der Gebäudegeometrien

Der periodisch wiederkehrende Schattenwurf wird als Immission nach Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) angesehen, wenn die maximal astronomische Beschattungsdauer mehr als 30 Stunden pro Jahr und darüber hinaus mehr als 30 Minuten pro Tag überschreitet (LANDESUMWELTAMT NRW, 2002). Auf Basis dieses Kriteriums wird jedes Gebäude im Einflussbereich der Verschattungsfläche überprüft.

Die relevanten Gebäudefeatures werden durch Überlappung der standortspezifischen Schattenpolygone ermittelt und herausgefiltert. Eine Zählung aller überschneidenden Flächen für jedes betroffene Gebäude ergibt den Gesamtzeitraum der Verschattung über ein Jahr in Abhängigkeit der Polygonintervalle. Mit der Zunahme einer Zeitbetrachtung pro Tag lässt sich die gesetzliche Vorgabe für die maximale tägliche Verschattungsdauer prüfen. Überschreitungen werden in dem Gebäudefeature markiert.

### **2.3 Landesweite Bewertung der Verschattungssituation zur Identifikation potenzieller Planflächen**

Das Überschreiten der gesetzlichen geregelten maximalen Verschattungszeiten von täglich 30 Minuten und 30 Stunden pro Jahr stellt ein Ausschlusskriterium bei der Errichtung von WKA dar. Zudem ist unabhängig von der Verschattungsbelastung je nach Bundesland und WKA ein genereller Abstand von 500 – 1000 Metern zu Wohngebäuden einzuhalten (BUND-LÄNDER INITIATIVE WINDENERGIE, 2012). Diese Ausschlusskriterien sollen in diesem Ansatz für ganz Niedersachsen mit den dafür vorgesehenen 500 Metern geprüft werden.

Die Modellierung der potenziellen Planflächen für Windkraftanlagen in Bezug auf Lichtemissionen wird anhand virtueller, gleichmäßig über die gesamte Landesfläche verteilter WKA-Standorte durchgeführt. Hierfür wird ein gleichmäßiges Raster auf der Landesfläche von Niedersachsen erstellt. Die Rasterzellengröße beträgt 1 km, das Raster selbst wird zur Modellierung möglicher Standorte in eine Punktfeatureklasse überführt. Somit entsteht im Zentrum jeder Zelle die potentielle Position für eine WKA, die den Bereich von jeweils 1 Km<sup>2</sup> abdeckt.

Die Matrix aller möglichen WKA Positionen kann vor der eigentlichen Simulation insbesondere in den Bereichen ausgedünnt werden, in denen eine dichte Bebauung vorliegt. Realisiert wird dies über die Selektion und Löschung der Standorte innerhalb eines 500 Meter Buffers um jedes Gebäude. Dies ermöglicht die Einbeziehung von bundeslandabhängigen Abstandsregelungen für WKA und führt zu einer Verkürzung der Rechenzeit. Da das Ausschlusskriterium der Bufferselektion in urbanen Regionen stets erfüllt wird, brauchen keine zusätzlichen Gemeindegrenzen importiert werden, innerhalb derer WKA generell anders zu bewerten sind.

Aufgrund der hohen Berechnungszeiten, sowohl für die Einzel- als auch für das Gesamtpolygon, wurde auf eine Neuberechnung an den einzelnen Standorten verzichtet. Stattdessen wird ein im Zentrum Niedersachsens berechnetes Polygonensemble auf die jeweiligen Standorte verschoben, ohne bedeutende Beeinträchtigungen des Ergebnisses in Kauf nehmen zu müssen (s. Kap. 4). Die nachfolgende Infrastrukturbewertung erfolgt dann mit den am aktuellen Ort betroffenen Gebäuden.

## **3 Darstellung der Ergebnisse**

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf eine Windkraftanlage mit einer Nabenhöhe von 80 Metern und einem Rotordurchmesser von 80 Metern. Dies entspricht etwa dem Typ einer Vestas V80, der meist verkauften Anlage des Herstellers. Bei den genutzten Sonnenverläufen handelt es sich um die Sonnenpositionsdaten von Braunschweig im Jahr 2013. In Abb. 2 sind die Ergebnisse der nach Kapitel 2.1 durchgeführten Erstellung der Schattenpolygone dargestellt. Abb. 2 a) zeigt hierbei 126.368 Einzelschattenpunkte, die je nach Sonnenstand und Anlagenausprägung berechnet worden sind. Im Anschluss wurden diese zu 15.796 Polygonen aggregiert, die in Abb. 2 b) farblich nach Monat dargestellt sind. Beide Featureklassen enthalten Informationen über den Zeitpunkt und die Sonnenwinkel der Entstehung, welche für rückführende Analysen genutzt werden können.

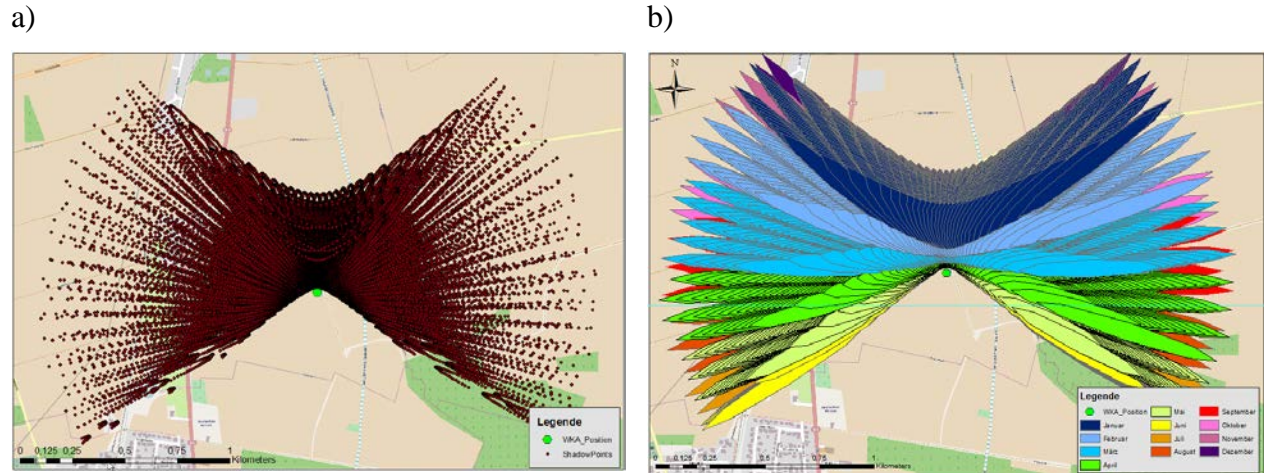


Abb. 2: Ergebnis der Modellierung von a) den Einzelschattenpunkten und b) der aggregierten Polygone

Das Ergebnis der Gebäudebewertung ist in Abb. 3 exemplarisch für einen analysierten Standort dargestellt. 3 a) zeigt die Überprüfung der Maximalverschattungsdauer für Gebäude von jährlich 30 Stunden. Je dunkler die Gebäudepolygone gefärbt sind, desto mehr Stunden sind sie im Jahr verschattet. An dieser Lokalität werden die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die jährliche Verschattungsdauer eingehalten.



Abb. 3: Standortbezogene Gebäudebewertung auf a) jährliche und b) tägliche Verschattung

3 b) zeigt die Überprüfung für die tägliche Verschattungsdauer, die 30 Minuten nicht überschreiten darf. Rot sind diejenigen Gebäude markiert, bei denen die gesetzlich vorgeschriebene, tägliche Verschattungszeit überschritten wird.

Es ist zu erkennen und auch nachvollziehbar, dass große Gebäudegeometrien länger verschattet werden als kleine. Da semantische Informationen über die Nutzung der Gebäude nur vereinzelt vorhanden waren, konnte nicht überprüft werden, ob es sich bei allen Geometrien tatsächlich um Wohngebäude handelt. Allerdings gelten für nicht Wohngebäude andere als die diskutierten gesetzlichen Grenzwerte.

Abb. 4 zeigt das Ergebnisraster der Standortanalyse für Niedersachsen und Bremen. Die schwarzen Bereiche (*Gebäude*) sind die Rasterzellen, die in der Voranalyse bereits aufgrund der strikten Abstandsregel von 500 Metern zu Wohngebäuden aus dem Standortpool entfernt wurden. An den roten Positionen würde die durch die WKA hervorgerufene Verschattungsdauer über dem gesetzlichen Maximum liegen und ihr Bau somit unzulässig sein. Die übrigen Flächen sind für einen Bau in Bezug auf Abstandsregelung und Verschattungsdauer zulässig und zeigen die Anzahl an Stunden, an denen betroffene Gebäude in einem Jahr verschatten würden. Die theoretische Verschattung dient der vorrauschauenden Planung von mehreren Anlagen in der Nähe eines überprüften Standortes. Gelbe Standorte sind hierbei in weiteren Schritten, etwa durch wiederholte Modellierung mit größerer räumlicher Auflösung zu prüfen.

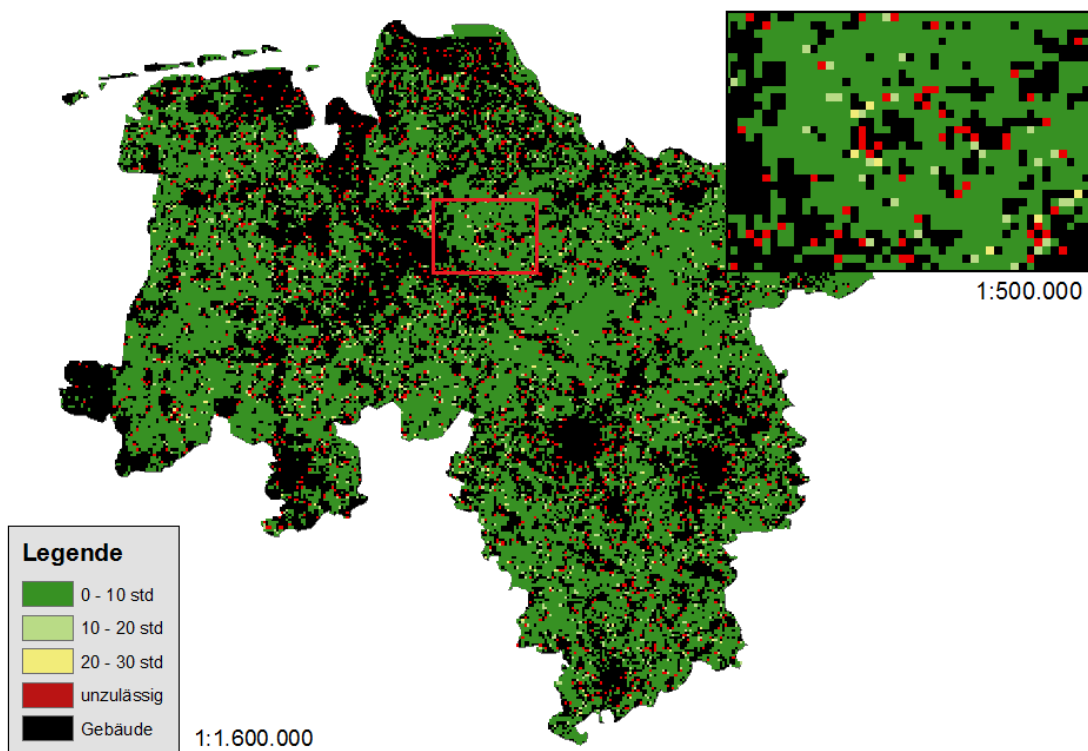


Abb. 4: Ergebnisse der Standortanalyse für Niedersachsen und Bremen

In Tabelle 1 ist die numerische Auswertung des Ergebnisrasters zusammengefasst. Von der untersuchten Maximalfläche, der Landesfläche von 48.182 km<sup>2</sup> eignen sich, abzüglich der bereits

durch die strikte Abstandsregel unzulässigen Standorte, 27.286 Standorte für die Planung von Windkraftanlagen. Lediglich 4 % der Landesfläche überschreiten den zulässigen Verschattungszeitraum, entweder täglich oder auf den Jahreswert bezogen.

Tab. 1: Numerische Auswertung des Ergebnisrasters

	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Flächenanteil [%]
Gesamtfläche Niedersachsens	48.182	100,00
Gebäudefläche	18.897	39,22
zulässige Flächen	27.286	56,63
unzulässige Flächen	1.998	4,15

## 4 Diskussion und Ausblick

Niedersachsen und Bremen besitzen zurzeit ca. 5.450 Windkraftanlage mit einer installierten Leistung von 6.780 MW (BUNDESVERBAND WINDENERGIE, 2010). Die oben vorgestellten Ergebnisse lassen abschätzen, dass die potenziell geeignete Fläche von 27.286 km<sup>2</sup> durch die Bebauung mit WKA des Typs Vestas V80 (Nennleistung 2 MW), ein theoretisches Potenzial von 54.572 MW bereithält.

Die vorgestellten Methoden bilden einen ersten Ansatz, das Auffinden potenzieller Standorte in ganz Niedersachsen unter Einhaltung gesetzlicher Rahmenbedingungen zu unterstützen. Dennoch gibt es Einschränkungen, die hier genauer betrachtet werden sollen. Diese gliedern sich zum einen in die Analyse der diskutierten gesetzlichen Grenzwerte für die Verschattungsdauer und zum anderen in die Nichtberücksichtigung weiterer gesetzlicher Vorgaben.

Die Einzelverschattungsflächen wurden aufgrund der hohen Berechnungsdauer lediglich für eine Koordinate im Zentrum Niedersachsens berechnet. Zur Bewertung anderer Standorte wurden diese Polygone dann verschoben, obwohl die Schattencharakteristik theoretisch vom Ort abhängig ist. Diese Vereinfachung ist bei der räumlichen Ausdehnung Niedersachsens allerdings zulässig. Die Ost-West-Verschiebung des Jahresschattenpolygons ohne Neuberechnung hat nur Einfluss auf den Beginn des Zeitintervalls zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang, nicht aber auf die Tageslänge. Die letztliche Verschattungsdauer für jedes einzelne Gebäude bleibt davon unberührt. Prinzipiell anders verhält es sich mit der Nord-Süd-Verschiebung ohne Neuberechnung. Hierbei werden die sich verändernden Tageslängen vernachlässigt. Bei einer Ausdehnung Niedersachsens in Nord-Süd-Richtung von etwa 2 Grad liegt diese etwa bei 26 Minuten (BARMETTLER, 2006) und beträgt damit einen hier durchgeführten zeitlichen Iterationsschritt. Dieser Zeitunterschied müsste je nach Standort einbezogen werden, da eventuelle Höchstwerte, die zum Ausschluss eines Flächenanteiles führen könnten, vermieden werden könnten.

Grundsätzlich kann eine Verbesserung der Bewertung durch zusätzlich Eingabedaten erzielt werden. Die Zahl der betrachteten Standorte umfasst in der hier vorgestellten Modellierung die gesamte Landesfläche, ohne die Berücksichtigung der für den Bau von WKA ungeeigneten Flächen wie Wasser-, Naturschutz- oder Waldgebiete, in denen dieser generell verboten ist.

Diese Eingabedaten müssten bei der Ausdünnung der potenziellen Standorte zu Beginn der Modellierung mit berücksichtigt werden.

Eine weitere Problematik sind fehlende semantische Informationen bezüglich der Gebäude. Große Gebäude werden länger verschattet als kleine. Da es sich bei den größeren Polygonen vermehrt um Industrieanlagen oder öffentliche Gebäude handeln kann, die gesondert betrachtet werden müssen, sollten diese vor einer Standortanalyse gesondert markiert werden, um das Ergebnis nicht zu verfälschen.

Die Ergebnisse der Analyse sind stark von der Auflösung der generierten potenziellen WKA-Positionen abhängig. Hierbei kann eine teilweise um wenige Meter zum gewählten Standort abweichende Position z.B. gar keine Verschattung an einem Gebäude bewirken. Die vorgestellte Methode ist also um die Option der räumlichen Auflösungsverbesserung an negativ bewerteten Standorten zu erweitern.

Prüfkriterien waren hier die gesetzlich vorgegebene maximale Verschattung von Gebäuden sowie eine generelle Abstandsregelung. Einen weiteren Ausblick für die vorgestellte Methodik ist die Adaption weiterer Bewertungskriterien, wie etwa Maschinendaten für Schallimmissionen, Abstandsregelungen zu Sondernutzungsflächen und meteorologische Daten. Letztere beeinflussen die Ausrichtung des Rotors und damit die Größe der Verschattungsflächen sowie das ortsbezogene Energiepotential und damit die infrage kommende Größe der WKA.

Die hier vorgestellte Implementierung lässt diese Erweiterungen problemlos zu und ist in der Lage, Anfragen bezüglich der Bewertung von WKA zielgerecht zu beantworten.

## 5 Literaturverzeichnis

- ASTALM, 2004: The Astronomical Almanac for the Year 2006, The Stationery Office, London.
- BARMETTLER, A., 2006: Sonnenlauf: Von Aufgang zum Transit, vom Transit zum Untergang. Internetseite, URL: <http://lexikon.astronomie.info/zeitgleichung/tagbogen.html>. Zuletzt besucht am 17.01.2014.
- BAUGB: Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. September 2004.
- BImSchG: Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013
- BEN FEKIH FRADJ, N. & LÖWNER, M.-O., 2012: Abschätzung des nutzbaren Dachflächenanteils für Solarenergie mit CityGML-Gebäudemodellen und Luftbildern. In: LÖWNER, M.-O., HILLEN, F. & WOHLFAHRT, R. (Hrsg.): Geoinformatik 2012 "Mobilität und Umwelt". Konferenzband zur Tagung Geoinformatik 2012 vom 28.-30.03.2012, Braunschweig, S. 171-177.
- BIMSCHG: Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013
- BUND-LÄNDER INITIATIVE WINDENERGIE, 2012: Überblick zu den landesplanerischen Abstandsempfehlungen für die Regionalplanung zur Ausweisung von Windenergiegebieten, URL: [http://www.bwlv.de/fileadmin/Gruppen/Umwelt\\_Windkraft/Abstandsempfehlungen\\_Windkraft\\_Juni\\_2012.pdf](http://www.bwlv.de/fileadmin/Gruppen/Umwelt_Windkraft/Abstandsempfehlungen_Windkraft_Juni_2012.pdf), Zuletzt besucht am 28.01.2014



BUNDESVERBAND WINDENERGIE, 2010: Windenergiepotenzial Bremen.

Flyer, URL: <http://www.wind-energie.de/sites/default/files/files/region/niedersachsen-bremen/bremen-potenzial.pdf>. Zuletzt besucht am 28.01.2014

HAU, E., 2008: Windkraftanlagen Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. Springer, Berlin.

MEEUS, J., 2000: Astronomical Algorithms, Willmann-Bell, Richmond.

LANDESUMWELTAMT NRW, 2002: Windenergieanlagen und Immissionsschutz, Essen.

RAMM, F. & TOPF & J., 2010: OpenStreetMap. Die freie Weltkarte nutzen und mitgestalten. 3. Auflage. Lehmanns, Berlin.

RICHTER, M. & LÖWNER, M.-O., 2011: Risikobewertung von Sichtbehinderungen durch niedrige Sonnenstände für das Verkehrswegenetz. In: Schwering, A.; Pebesma E. & Behncke, K. (Hrsg.): Geoinformatik 2011 "Geochange", ifgiPrints 41: 223 - 227.