



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Studiengang Geoinformatik

Ermittlung der visuellen Wahrnehmung von Windenergieanlagen auf Basis einer Sichtbarkeitsanalyse

Bachelorarbeit

vorgelegt von: Sven Klettke

Zum Erlangen des akademischen Grades

„Bachelor of Engineering“ (B.Eng.)

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Ernst Heil

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Dirk Felgenhauer

Eingereicht am 15.08.2012

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2012-0197-2

Kurzfassung:

In der vorliegenden Bachelorarbeit wird die visuelle Wahrnehmung von Windenergieanlagen, basierend auf einer Sichtbarkeitsanalyse untersucht.

Dazu wurde eine Methodik entwickelt, welche eine Möglichkeit der Abbildung von Windenergieanlagen im Rahmen der Sichtbarkeitsanalyse beinhaltet. Die Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalyse werden bewertet, anschließend wird der Einfluss der Entfernung zwischen dem Betrachter und der Windenergieanlage berücksichtigt.

Die entwickelte Methodik wurde durch die Erstellung eines neuen Moduls mit der "System for Automated Geoscientific Analysis" (SAGA) Software umgesetzt.

Mit Hilfe dieses Moduls wurden anschließend Berechnungsergebnisse für verschiedene Betrachtungen erstellt, dargestellt und ausgewertet.

Abstract:

In the present bachelor thesis the visual perception of wind power stations, based on a visibility analysis will be examined.

A method which contains a possibility to depict a wind power station within the scope of the visibility analysis was developed. The results of the visibility analysis were valued, afterwards the influence of the distance between the viewer and the wind power station was considered.

The developed methodology was moved by the production of a new module with "System for Automated Geoscientific Analysis" (SAGA) software.

Afterwards with the help of this module calculation results for different considerations were provided, shown and evaluated.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	6
2	Die Wahrnehmung von Windenergieanlagen	7
3	Fragestellung	8
4.	Vorhandene Methoden	9
4.1	Sichttraumanalyse	9
4.1.1	Methodik	9
4.1.2	Ergebnisse	10
4.2	Sichtbarkeitsanalyse.....	11
4.2.1	Methodik	11
4.2.2	Ergebnisse	12
4.3	Defizite der vorhandenen Methoden.....	15
5.	Methodik	16
5.1	Grundlagen.....	16
5.1.1	Die Sichtbarkeitsanalyse.....	16
5.1.2	Das Digitale Geländemodell	17
5.1.3	Das Digitale Oberflächenmodell.....	19
5.2	Situationsbezogene Anpassung der Grundlegendaten	21
5.2.1	Abbildung von Objekten im Digitalen Oberflächenmodell	21
5.2.2	Die Erweiterung eines Digitalen Geländemodells	24
5.2.3	Probleme der Abbildung von Objekten in einem Digitalen Modell.....	26
5.2.4	Fazit	27
5.3	Anpassung der Methodik.....	28
5.3.1	Die Betrachtungshöhen einer Windenergieanlage.....	28
5.3.2	Die Wertigkeiten der Betrachtungshöhen	29
5.3.3	Der Einfluss der Entfernung.....	35
5.3.4	Die Verbindung der Einzelergebnisse.....	40
5.3.5	Der Einfluss der Beobachtungshöhe.....	43
6	Praktische Umsetzung der angepassten Methodik.....	44
6.1	SAGA Software	44
6.2	Die implementierte Funktion der Sichtbarkeitsanalyse	46
6.3	Ziele der Modulprogrammierung.....	47
6.4	Modulprogrammierung	48

6.5	Rechenzeit und Speicherbedarf	50
6.5.1	Die benötigte Rechenzeit.....	50
6.5.2	Der Speicherbedarf.....	50
7	Ergebnisse.....	52
7.1	Betrachtung einer Einzelanlage.....	52
7.2	Betrachtung einer begrenzten Anlagenzahl.....	55
7.3	Vielzahl von Windenergieanlagen	58
8	Die Grenzen der Modellierung	61
8.1	Die Witterungseinflüsse.....	61
8.1.1	Die Sichtweite	62
8.1.2	Die Windrichtung.....	63
8.1.3	Die Windstärke.....	64
8.1.4	Verschattung von Teilen einer Windenergieanlage.....	65
8.2	Weitere Vegetationseinflüsse	66
8.3	Sonstige Einflüsse einer Windenergieanlage	68
8.3.1	Farbgebung.....	68
8.3.2	Markierungen an Windenergieanlagen	69
8.4	Besondere geometrische Konstellationen	70
9	Zusammenfassung	71
10.	Quellenverzeichnis	73
11.	Abkürzungsverzeichnis.....	74
12.	Abbildungsverzeichnis	75
13.	Ergänzung zum Abbildungsverzeichnis	77
14.	Tabellenverzeichnis	78

1. Einführung

Mit der Entscheidung des deutschen Bundestages vom 30. Juni 2011, die im Herbst 2010 beschlossene Laufzeitverlängerung für die deutschen Atomkraftwerke rückgängig zu machen, wurde die sogenannte Energiewende eingeläutet. [bmu12]

Der Begriff der Energiewende beschreibt die Schaffung eines nachhaltigen Energiesystems. Eine Säule dieses Systems ist das Ziel der nachhaltigen Versorgung mit erneuerbaren Energien.

Die Verfolgung dieses Zieles bedingt, dass die erneuerbaren Energien zu denen unter anderem die Windenergie, Sonnenenergie und Wasserkraft gehören, weiter und stärker als bisher ausgebaut werden.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien und im speziellen der Windenergie sind dabei sehr flächenintensiv. Der Flächenbedarf richtet sich dabei nach den Mindestabständen der Windenergieanlagen (WEA). In der Windhaupttrichtung wird hier ein Abstand von dem 5 bis 9 fachen des Rotordurchmessers empfohlen. Für die Nebenwindrichtung dagegen wird ein Abstand von dem 3 bis 5 fachen des Rotordurchmessers empfohlen. [ökostrom12]

Diese Mindestabstände sind notwendig, um den sogenannten Windparkeffekt zu verringern. Dieser sorgt mit Verwirbelungen in den Luftströmungen die von jeder WEA erzeugt werden, für eine reduzierte Leistung der nachfolgenden WEA.

Aufgrund des durch die Nutzung der Windenergie bedingten hohen Flächenverbrauchs ergeben sich zwangsläufig Konflikte mit anderen Flächennutzungen, wie zum Beispiel Siedlungsräumen. Im Falle des Landes Brandenburg versuchen Regionale Planungsgemeinschaften mit dem Aufstellen von Regionalplänen, welche feste Kriterien für die Errichtung von Windenergieanlagen beinhalten, diese Konflikte zu begrenzen.

Jedoch kann auch diese Maßnahme nicht immer entscheidend zur Akzeptanz von Windenergieanlagen in der Bevölkerung beitragen. Daher ist es erforderlich, eine Methodik zu entwickeln, mit der sich die zu erwartende visuelle Wahrnehmung von Windenergieanlagen beschreiben und vergleichen lässt. Das Einsatzgebiet dieser Methodik erstreckt sich von der Bürgerinformation vor dem Beginn der Errichtung von Windenergieanlagen bis zur Betrachtung von Veränderungen im Windenergieanlagenbestand.

2 Die Wahrnehmung von Windenergieanlagen

„Die visuelle Wahrnehmung ist wie alle Wahrnehmungen stets eine subjektive und situative Interpretation der tatsächlichen Verhältnisse.“ [RB09] Das von Menschen wahrnehmbare Erscheinungsbild der Landschaft ist das Landschaftsbild. „Es verkörpert die Gesamtwirkung der für den Menschen mit dessen Sinnen wahrnehmbaren Merkmale und Eigenschaften von Natur und Landschaft.“ [GR11]

Die Errichtung und der Betrieb von WEA stellen immer einen enormen Eingriff in das Landschaftsbild dar. WEA überragen durch ihre Gesamthöhe von bis zu 200 m die üblichen in der Landschaft vorhandenen Elemente, wie zum Beispiel Wälder oder Kirchtürme um ein Vielfaches. Durch die Subjektivität der Wahrnehmung nimmt aber jeder Betrachter Eingriffe in das Landschaftsbild in einem anderen Maße wahr.

Die Wahrnehmung eines Objektes wird ebenso durch die persönliche Einstellung zu dem betrachteten Objekt beeinflusst. Die individuelle Haltung zu WEA kann also die Wahrnehmung von WEA im Landschaftsbild entscheidend beeinflussen. Diese kann dabei weit auseinandergehen und zwischen Zustimmung und totaler Ablehnung liegen.

Ein Mittel um die Akzeptanz von WEA bei den Anwohner zu erhöhen ist eine Beteiligung der Betroffenen an den Erträgen von WEA. Ein Modell zur Bürgerbeteiligung wurde beispielsweise von der Firma Enertrag in Kooperation mit den Stadtwerken Prenzlau am 20. April 2012 vorgestellt. Dabei können Bürger von Gemeinden in denen WEA errichtet wurden oder geplant sind, Vergünstigungen beantragen, um nach einem Bonussystem direkt den Strompreis und damit die eigene Stromrechnung zu verringern. Dadurch wird neben der Akzeptanz auch die persönliche Einstellung zum Thema Windenergie beeinflusst. [enertrag12]

Da viele Vorurteile gegenüber WEA auf wagen Vermutungen oder falschen Informationen beruhen, kann eine umfassende und transparente Information ein weiteres Mittel zur positiven Beeinflussung der Meinung von Betroffenen zu WEA sein.

Dafür ist es aber zwingend notwendig ein Instrument zu benutzen, welches die Sichtbarkeit der WEA nachvollziehbar analysiert und die Ergebnisse transparent darstellt.

3 Fragestellung

Im Bezug auf die Probleme, welche durch WEA hervorgerufen werden, wie zum Beispiel die unzureichende Information von Betroffenen im Rahmen von Planungen und die damit verbundene mangelnde Akzeptanz, wird nun eine Methodik erarbeitet um diesen Problemen entgegenzuwirken. Dabei soll insbesondere die Information von Betroffenen im Vorfeld der Planung und der Errichtung von WEA verbessert werden. Das mögliche Einsatzgebiet einer entsprechenden Methodik liegt daher auch in der Bürgerinformation und der Veranschaulichung geplanter Vorhaben.

Ziel ist es, ein Instrument auf Basis einer Methodik zu erstellen, um die visuelle Wahrnehmung von WEA zu ermitteln. Dazu sollen die Ergebnisse einer Sichtbarkeitsanalyse genutzt werden. Dieses Instrument soll im möglichen Rahmen der Modellierung Analyseergebnisse darstellen und vergleichbar machen. Die Grundlage bildet hier die Methodik, welche von zwei Kernfragen bestimmt wird.

1. Wie kann eine WEA als Objekt im Rahmen der Sichtbarkeitsanalyse sinnvoll abgebildet werden?
2. Wie kann die Entfernung zwischen Betrachter und Objekt in die Sichtbarkeitsanalyse einbezogen werden?

Den Antworten auf diese Kernfragen kommt bei der Erarbeitung der Methodik eine besondere Bedeutung zu, weshalb der Schwerpunkt der Methodik auch hier gesetzt wurde. Diese Methodik soll dann im Rahmen einer Sichtbarkeitsanalyse auf eine Datengrundlage in Form eines Digitalen Geländemodells (DGM) angewendet werden. Das DGM wird dazu entsprechend den Grenzen der Modellierung von Verschattungselementen zu einem Digitalen Oberflächenmodell (DOM) erweitert.

Das Ergebnis einer Sichtbarkeitsanalyse anhand der entwickelten Methodik besteht aus Werten, welche sich aus den Einflüssen der Sichtbarkeit einer WEA und der Entfernung zu dieser zusammensetzen. Diese sollen dann zum Beispiel im Vorfeld der Errichtung von WEA mit bereits installierten WEA vergleichbar sein.

4. Vorhandene Methoden

Bisher gab es einige Versuche die Sichtbarkeit von Objekten und insbesondere von Windenergieanlagen messbar und somit vergleichbar zu machen. Dabei können die bisherigen Ansätze in Sichttraumanalysen und Sichtbarkeitsanalysen unterschieden werden.

4.1 Sichttraumanalyse

Die Thematik der Sichttraumanalysen soll anschließend am Beispiel des Landkreises Diepholz (Niedersachsen) erläutert werden. Der Landkreis hat die Firma GIS-Plan-Service beauftragt, eine Methodik zu entwickeln, um visuelle Wirkungsanalysen als Werkzeug für die Entscheidungsfindung in der Regionalplanung einzusetzen. Die Ergebnisse wurden unter dem Titel „Visuelle Wirkungsanalyse von Windenergieanlagen im Repowering – Kontext Ein Werkzeug für die Regionalplanung“ veröffentlicht. Ziel der Regionalplanung des Landkreises Diepholz war dabei die Prüfung ob die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch WEA, neben den bestehenden Kriterien als weiterer Faktor zur Bewertung der Eignung von Flächen herangezogen werden kann.

Der Focus wurde dabei auf das Repowering gerichtet um Fehlentwicklungen in der Vergangenheit, in Form von der Errichtung von Einzelanlagen zu korrigieren und WEA in Windeignungsgebieten (WEG) zu konzentrieren. [re-ko12]

4.1.1 Methodik

Die Ausgangsgrößen für die Wirkungsanalyse sind ein Digitales Geländemodell (DGM), Daten über die visuell wirksame Oberflächenbedeckung, die Beobachterhöhe und die Einteilung der Wirkzonen.

„Die Wirkungsanalyse berücksichtigt in Abhängigkeit zur Anlagenhöhe unterschiedliche Wirkzonenradien. Mittels eines Geografischen Informationssystems können nun die jeweiligen Sichtbarkeitsanalysen unter Berücksichtigung des Digitalen Oberflächenmodells (DOM), der Betrachterhöhe, und der Wirkzonenweite durchgeführt werden. Hierzu wurde der methodische Ansatz weiterentwickelt. So

wurde die Wirkzone für größere Anlagen definiert und nicht handhabbar. So wurde eine Fernsicht mit gegebener Wahrnehmbarkeit mit der doppelten Entfernung der Zone III definiert. Diese Zone stellt somit eine differenzierte Ausweitung der bisherigen Zone III dar und berücksichtigt die aktuelle Diskussion hinsichtlich Auswirkungsweiten (s. a. Nohl 2007).“ [re-ko12]

Wirkzone	Gewichtung	Distanzen bei WKA-Höhe bis 180 m	Distanzen bei WKA-Höhe bis 150 m	Distanzen bei WKA-Höhe bis 100 m	Distanzen bei WKA-Höhe bis 80 m	Distanzen bei WKA-Höhe bis 50 m
subdominate Wahrnehmung (Zone III)	2	3.600 m	2.800 m	2.000 m	1.500 m	900 m
Fernsicht mit gegebener Wahrnehmbarkeit (Doppelte der Zone III)	1	7.200 m	5.600 m	4.000 m	3.000 m	1.800 m

Abbildung 1: Übersicht der Wirkzonen [re-ko12]

4.1.2 Ergebnisse

Das Ergebnis einer Sichttraumanalyse, entsprechend der beschriebenen Methodik, ist eine Karte in der die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes dargestellt wird. Für die Darstellung der Ergebnisse wurde eine Legende entwickelt, welche unter anderem auch die Definitionen zur Beeinträchtigung des Landschaftsbildes enthält. Die Beeinträchtigung wurde dazu in die fünf Kategorien: keine bis sehr gering, gering, deutlich, hoch und sehr hoch, unterteilt. [re-ko12]

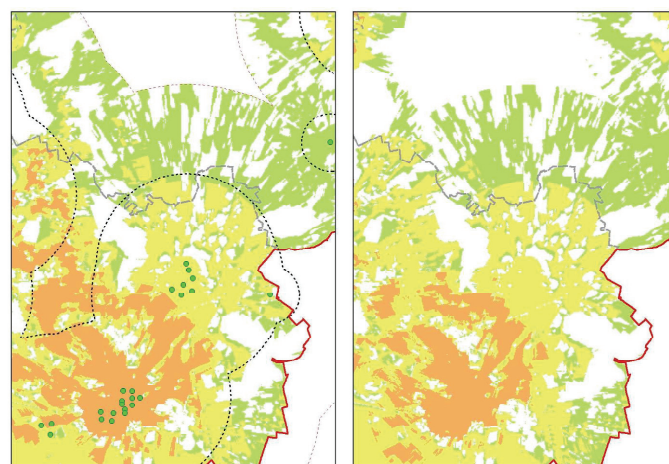


Abbildung 2: Vergleich von Ergebnissen der Sichttraumanalyse [re-ko12]

Links: Bestehende Anlagen - Rechts: Vision 2020 - Abgestimmte Entwicklung

Der Vergleich der Ergebnisse in der Abbildung 2 zeigt die erwarteten Auswirkungen der angestrebten abgestimmten Entwicklung zur Errichtung neuer WEA.

Legende

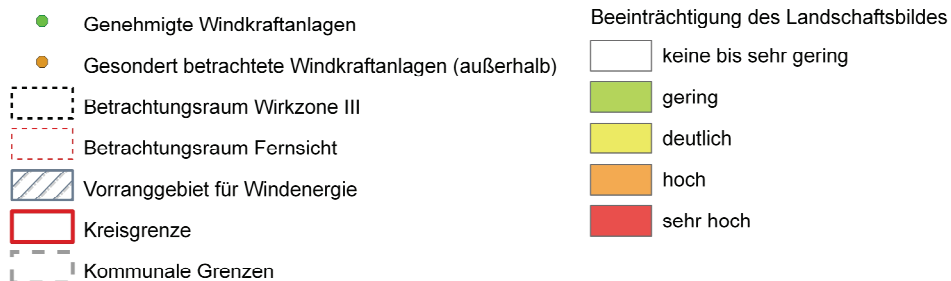


Abbildung 3: Legende zur Ergebnisdarstellung der Sichttraumanalyse [re-ko12]

4.2 Sichtbarkeitsanalyse

Ein Ansatz, sich der Thematik mit einer Sichtbarkeitsanalyse zu nähern, wurde von der Hochschule für nachhaltige Entwicklung (HNEE) in Eberswalde unternommen. Hier wurde unter der Führung von F. Torkler und C. Wygoda im Jahr 2011 ein Teilprojekt Sichtbarkeitsanalyse bearbeitet. Die Ergebnisse wurden unter dem Titel "Sichtbarkeit und Visualisierung von Windkraftanlagen und Strommasten" im Internetauftritt der HNEE veröffentlicht. Im Folgenden sollen die Methodik und die Ergebnisse dargestellt werden. [HNEE12]

4.2.1 Methodik

Bei der Bearbeitung dieses Teilprojekts wurde sowohl die herkömmliche Methodik der Sichtbarkeitsanalyse als auch eine angepasste Methodik bezüglich der Ermittlung von Teilsichtbarkeiten benutzt, um daraus verschiedene Ergebnisse bezüglich der Sichtbarkeit und der Entfernung zu WEA abzuleiten. [HNEE12]

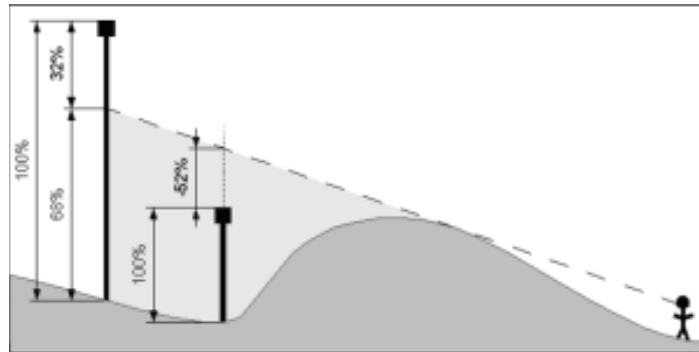


Abbildung 4: Schematische Darstellung der partiellen Sichtbarkeit [HNEE12]

Für die Ermittlung von Teilsichtbarkeiten wurde eine Methodik verwendet, durch die der Wert der Sichtbarkeit in einem Prozentwert angegeben wird. Wie in der Abbildung 4 schematisch dargestellt, wird die Gesamthöhe einer WEA gleich einem Wert von 100% gesetzt und dann die rechnerisch sichtbare Höhe dazu ins Verhältnis gesetzt. Im Fall von, für den Betrachter nicht sichtbaren WEA wird so ein negativer Prozentwert berechnet. Dieser Wert gibt Aufschluss über den Grad der Verschattung. [HNEE12]

4.2.2 Ergebnisse

Die allgemeine Methodik der Sichtbarkeitsanalyse wurde von der HNEE genutzt, um verschiedene Ergebnisse zu erzeugen. Die berechnete Entfernung zum nächsten Objekt wurde für jede Masche des Ausgangsdatensatzes berechnet und wie in Abbildung 5 dargestellt.

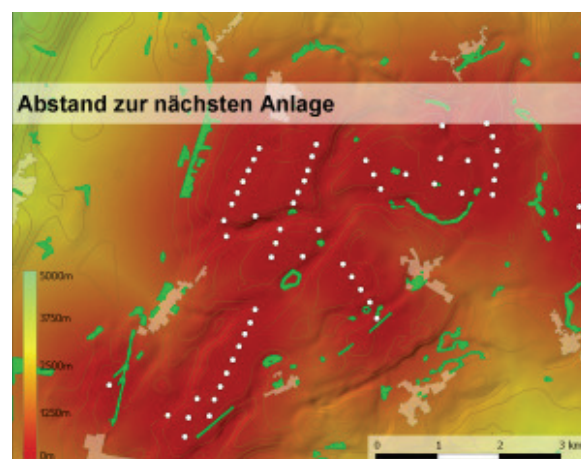


Abbildung 5: Abstand zur nächsten Anlage [HNEE12]

Die Entfernung zum nächsten sichtbaren Objekt wurde berechnet und entsprechend der Abbildung 6 visualisiert. Die Veränderungen im Vergleich zu der berechneten Entfernung zum nächsten Objekt, werden in den Gebieten mit Abschattungen deutlich, in denen näher gelegene Anlagen verschattet sind und daher weiter entfernte Anlagen in das Ergebnis einfließen. Ein solches Gebiet und das dafür verantwortliche Verschattungselement wurden in der Abbildung 6 mit Pfeilen markiert.

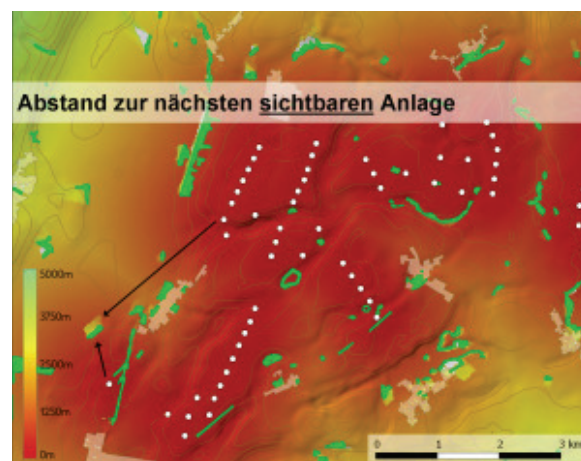


Abbildung 6: Abstand zur nächsten Anlage [HNEE12]

Die Ermittlung der absoluten Sichtbarkeit basiert auf einer Objekthöhe und liefert daher als Ergebnis eine Unterscheidung in sichtbare und nicht sichtbare Bereiche. Diese Berechnung ist die Grundlage für weitere Untersuchungen, wie zum Beispiel die Ermittlung der Anzahl der sichtbaren Anlagen. Ein Ergebnis der absoluten Sichtbarkeit stellt die Abbildung 7 dar.

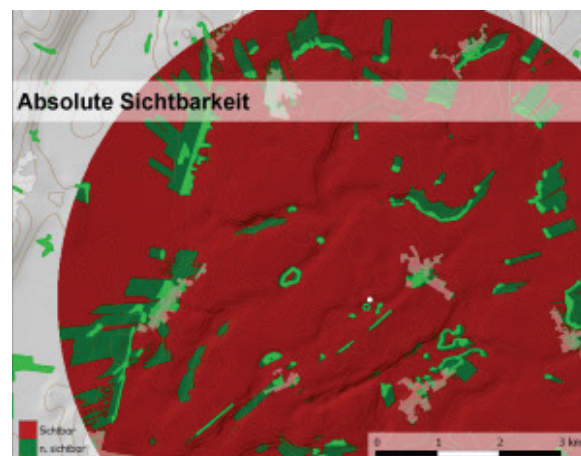


Abbildung 7: Absolute Sichtbarkeit [HNEE12]

Wird eine Berechnung einer einzelnen Sichtbarkeit für jedes Objekt (der absoluten Sichtbarkeit) durchgeführt und die Ergebnisse anschließend miteinander kombiniert, so entsteht ein Datensatz, der Aufschluss über die Anzahl der sichtbaren Objekte gibt. Die Abbildung 8 zeigt das Ergebnis dieser Berechnung.

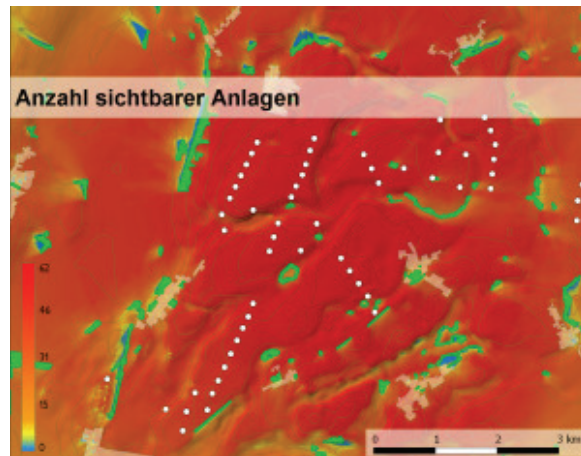


Abbildung 8: Anzahl sichtbarer Anlagen [HNEE12]

Die in Abbildung 4 abgebildete Methodik zur Berechnung von Teilsichtbarkeiten wurde verwendet, um die in Abbildung 9 dargestellten Ergebnisse zu berechnen. Dabei wurde eine Einzelanlage südöstlich der Ortschaft Schenkenberg (Uckermark, Brandenburg) betrachtet.

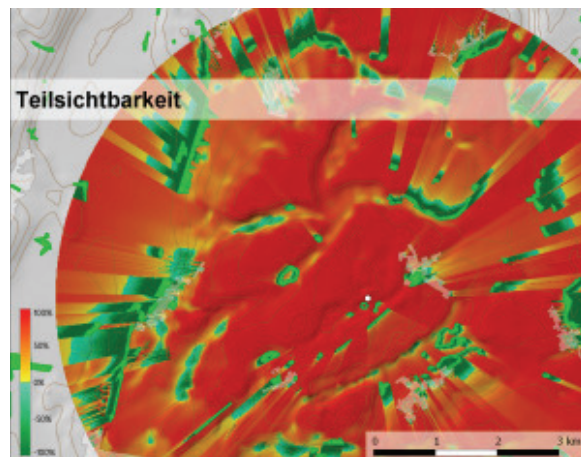


Abbildung 9: Ergebnis der Ermittlung von Teilsichtbarkeiten [HNEE12]

4.3 Defizite der vorhandenen Methoden

Sichtraumanalyse

Die in Punkt 4.1 erläuterte Methodik der Sichtraumanalyse hat aus meiner Sicht zwei Nachteile. Zum einen kann dem betroffenen Bürger alleine mit der in der Legende verwendeten Beschreibungen wie zum Beispiel „keine bis sehr gering, gering, deutlich, hoch und sehr hoch“ kein Eindruck der zu erwartenden visuellen Beeinträchtigung gegeben werden.

Die verwendeten Beschreibungen würden bei der Anwendung in Bürgerinformationsveranstaltungen zu Irritationen und Diskussionen führen und somit nicht zur Steigerung der Akzeptanz oder zur Planungstransparenz beitragen.

Zum anderen weist das Ergebnis Zonen mit gleichen Beeinträchtigungen aus. Der Grad der Beeinträchtigung innerhalb einer Zone ist dabei unabhängig von der Entfernung zu den WEA. Gerade die Entfernung zu WEA hat einen entscheidenden Einfluss auf die visuelle Wahrnehmung und damit auch der Beeinträchtigung.

Sichtbarkeitsanalyse HNEE

Die von der HNEE angewendete Methodik einer Sichtbarkeitsanalyse weist aus meiner Sicht ebenfalls zwei Nachteile auf. WEA wurden, entsprechend dem Titel der Arbeit "Sichtbarkeit und Visualisierung von Windkraftanlagen und Strommasten" mit Strommasten gleichgesetzt. Dabei wurde versäumt, das zu betrachtende Objekt passend der Form, in verschiedenen Höhen einzuteilen und diese Höhen entsprechend der visuellen Wahrnehmung zu gewichten.

Wegen der fehlenden Abbildung der Objektform, wird anstatt einer WEA ein Objekt betrachtet, welches einem Mast ähnelt.

Desweiteren wird zwar die Entfernung zwischen dem Betrachter und dem Objekt berechnet, deren Einfluss aber nicht berücksichtigt.

5. Methodik

5.1 Grundlagen

5.1.1 Die Sichtbarkeitsanalyse

Eine Sichtbarkeitsanalyse stellt immer eine Punkt zu Punkt Betrachtung dar. Die Methodik der Sichtbarkeitsanalyse wurde ursprünglich für die Antennentechnik entwickelt, um die Reichweite von Sende- und Empfangsantennen zu berechnen. Dabei wird die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen ohne weitere Einflüsse, wie zum Beispiel Brechung, Reflexion, Streuung und Absorption simuliert. Damit eine Sichtbarkeit zwischen zwei Punkten besteht, ist eine quasioptische Sicht in Form einer Sichtlinie notwendig.

Im Zuge einer Sichtbarkeitsanalyse wird eine Prüfung zwischen einer Rasterzelle mit einer definierten Höhe und der zu betrachtenden Zelle durchgeführt. Existiert eine Sichtlinie zwischen den beiden Punkten, besteht, bei einem Standpunkt auf einem der Punkte jeweils eine Sichtbarkeit zu dem anderen Punkt. Somit ist diese Methodik anwendbar, um Aussagen über die Sichtbarkeit einer Objekthöhe für jeden Punkt der Erdoberfläche zu treffen.

Eine Sichtbarkeitsanalyse wird für jede Rasterzelle eines Ausgangsdatensatzes durchgeführt, wobei jeweils zwischen zwei Zuständen unterschieden wird. Besteht eine Sichtbarkeit zwischen der Zelle des Objektes mit der entsprechenden Höhe, wird der betrachteten Rasterzelle der Wert 1 zugewiesen. Der Wert 0 wird der betrachteten Rasterzelle zugewiesen, wenn dies nicht der Fall ist. Die Abbildung 10 stellt die Verteilung der Werte schematisch dar.

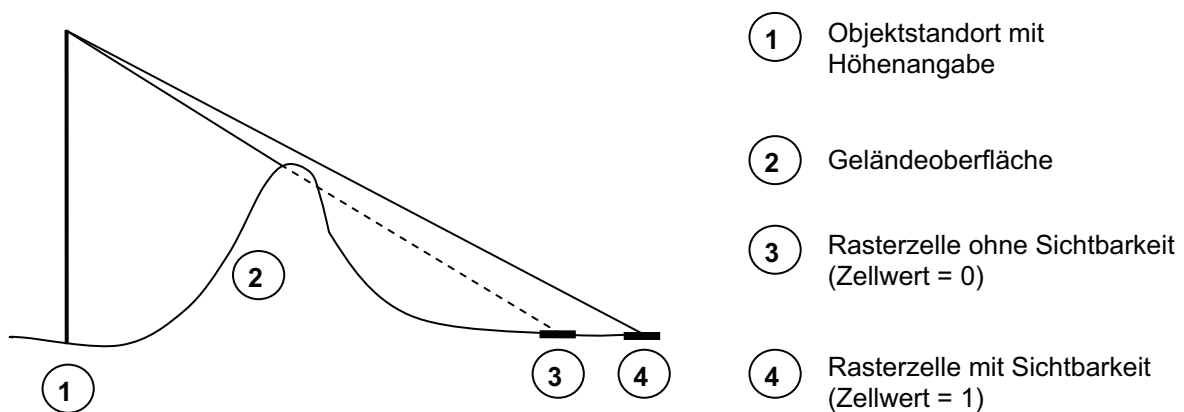


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Methodik einer Sichtbarkeitsanalyse

Damit die Methodik einer Sichtbarkeitsanalyse angewendet werden kann, müssen Grundlagendaten vorhanden sein. Neben den Koordinaten und der Höhe des zu betrachtenden Objektes wird ein Digitales Geländemodell der zu betrachtenden Oberfläche benötigt.

5.1.2 Das Digitale Geländemodell

Ein digitales Geländemodell (DGM) beschreibt die Erdoberfläche als eine in der Lage und Höhe bekannte Punktwolke, die entweder als regelmäßiges Gitter oder als unregelmäßig verteilte Punkte vorliegt. Die verwendeten Bezugssysteme für die Lage und die Höhe sind das European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89) sowie das Deutsche Haupthöhennetz 92 (DHHN92). Ein DGM wird anhand seines Gitterabstandes bezeichnet. Die Bezeichnung DGM wird dazu durch einen Zusatz der Gitterweite ergänzt. So benennt zum Beispiel ein DGM25 ein digitales Geländemodell mit einer Gitterweite von 25m. Ein DGM ist mit unterschiedlichen Gitterweiten wie zum Beispiel 1m, 2m, 5m, 10, 25m oder 50m verfügbar.

Des Weiteren unterscheiden sich die Digitalen Geländemodelle durch die Erfassungsmethode. Dabei wird zwischen dem DGM Klassik und dem DGM Laserscan unterschieden. Das DGM Laserscan ist die neuere Methode, welche sich gerade im Aufbau befindet. Im DGM-Laserscan der Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB) sind die Geländepunkte quadratisch angeordnet. Der Abstand der Punkte, die sogenannte Gitter- oder Maschenweite, beträgt 1 m, 2 m oder 5 m. Die Aktualisierung und Qualitätsverbesserung erfolgt über eine photogrammetrische Auswertung (Höhenpunkte, Geländekanten), die Vermessung von Böschungen bzw. durch Laserscanning.

Bei der herkömmlichen Methode, dem DGM Klassik, sind die Geländepunkte ebenfalls quadratisch angeordnet. Der Abstand der Punkte, die sogenannte Gitter- oder Maschenweite, beträgt jedoch zwischen 10 m, 25 m oder 50 m. Das DGM-Klassik wurde durch Digitalisierung von Höhenlinien (10 m-, 5 m-, 2,5 m-, 1,25 m-Isolinien), markanten Höhenpunkten, Uferlinien und Böschungen sowie durch photogrammetrische Stereoauswertung von Luftbildern (Maßstab 1 : 12 500) erstellt. Die Anwendungsgebiete sind dabei stark von der Genauigkeit der Daten abhängig.

Das DGM Klassik bietet eine Höhengenaugkeit von ± 1 bis 3m. Beim DGM Laserscan wird dagegen eine Höhengenaugkeit von ± 30 cm erreicht.

Ein DGM findet daher in vielen verschiedenen Bereichen Verwendung. Beispiele dafür sind u. a. : Hochwasserschutz, Regional-, Bauleit- und Straßenplanung, Wasserwirtschaft, Ökologie, Mobilfunk- und Navigationssysteme, Umweltschutz (Erstellung von Schallimmissionsplänen, Hochwassersimulationen), Verkehr (Trassenplanungen, Profildarstellungen, Volumenermittlung), Energieversorgung (Planung von Windkraftanlagen), Geologie und größere Bauvorhaben. [geobasis-bb12]

Ein DGM ist daher eine zwingende Voraussetzung zur Durchführung einer Sichtbarkeitsanalyse. Dabei gilt es die Balance zwischen der Genauigkeit, der Rechendauer und dem Kostenaufwand zu finden.

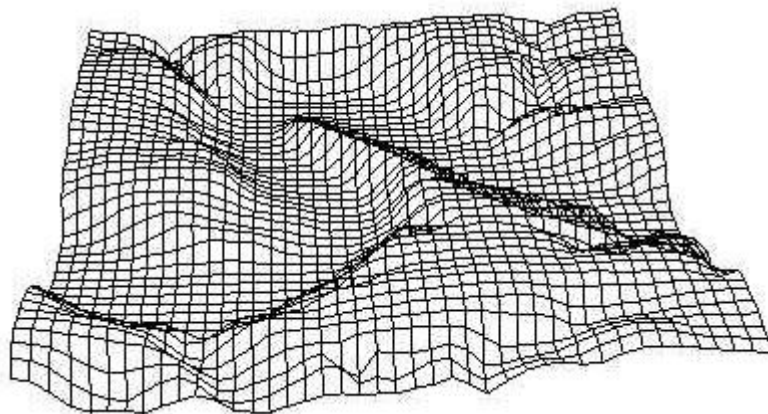


Abbildung 11: Modell eines Digitalen Geländemodells [kreis-rueg12]

Die Genauigkeit wird zum größten Teil durch die Art des DGM und die Gitterweite bestimmt. Versuche mit dem DGM50 und dem DGM25 haben ergeben, dass das zu verwendende Geländemodell an die Bedürfnisse der Betrachtungsregion anzupassen ist. So ist es nur bedingt möglich eine starke Höhenänderung des Geländes mit einem großmaschigem DGM ausreichend abzubilden. Das führt zu einer starken Diskrepanz zwischen den berechneten Werten und der Realität.

5.1.3 Das Digitale Oberflächenmodell

Ein wichtiger Teil der Datengrundlage für jede Sichtbarkeitsanalyse ist ein DGM. Durch die Verwendung eines DGM, wird jedoch nur die Erdoberfläche bei der Analyse berücksichtigt. Daher muss für eine genauere Modellierung ein digitales Oberflächenmodell (DOM) verwendet werden. Ein DOM kann als eine in der Lage und Höhe bekannte Punktwolke, die entweder als regelmäßiges Gitter oder als unregelmäßig verteilte Punkte vorliegen, definiert werden und so die Erdoberfläche einschließlich der Vegetation und der Bebauung abbildet. Ein DOM stellt also eine Erweiterung des in Punkt 5.1.2 beschriebenen DGM dar.

Um Flächen mit abschattender Wirkung, wie zum Beispiel Vegetation oder Gebäude, zu berücksichtigen muss zwingend ein DOM, also ein erweitertes DGM verwendet werden.

Ein DOM kann aus verschiedenen Datenquellen erzeugt werden. Eine mögliche Datenquelle ist die Abtastung der Erdoberfläche durch Laserstrahlen, dem Laserscanning, im Zuge einer Befliegung mit einem speziell dafür ausgerüsteten Luftfahrzeug. Diese Daten werden für die Fläche des Landes Brandenburg vom Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB), erstellt und angeboten. Für diese Daten werden, analog zu den DGM, das Lagebezugssystem ETRS89 und das Höhenbezugssystem DHHN92 verwendet.

Ein DOM, erstellt aus den Daten einer Abtastung der Erdoberfläche mit Laserstrahlen, bietet eine Höhengenaugigkeit von ± 20 cm. Die aus dem Laserscanning gewonnen Daten eines DOM sind jedoch sehr teuer.

Einheit/Art		Entgelt in Euro	Preisspanne in Euro		Bemerkung
Laserscanrohdaten Abgabe First Pulse					
vom	bis	je km²	von	bis	
1. km²	500. km²	50,00	15,00*	25.000,00	*Mindestentgelt
501. km²	50.000. km²	25,00	25.025,00	137.000,00	
5001. km²	25.000. km²	12,50	137.512,50	312.500,00*	*Höchstentgelt

Abbildung 12: Preisübersicht Laserscanrohdaten First Pulse [geobasis12]

Für die Planungsregion Uckermark-Barnim, mit einer Gesamtfläche von ca. 4.552 km², würden dadurch Kosten in Höhe von ca. 126.300 Euro entstehen.

Liegt diese kostenintensive Datengrundlage nicht vor, kann ein vorhandenes DGM bearbeitet und zu einem DOM erweitert werden. Im Zuge dieser Bearbeitung wird den zu berücksichtigenden Strukturelementen eine feste Höhe zugewiesen, daraus ein Rasterdatensatz erzeugt, um anschließend diese Zellwerte mit den entsprechenden Zellwerten des verwendeten DGM zusammenzufassen. Das Ergebnis dieser Bearbeitung ist ein erweitertes DGM, welches die Erdoberfläche für die Sichtbarkeitsanalyse im Rahmen der Möglichkeiten der Modellierung bestmöglich abbildet.

Dazu sind jedoch die Daten der zu berücksichtigenden Strukturelemente notwendig. Eine mögliche Datenquelle ist das Automatisierte Topographische Kartographische Informationssystem (ATKIS). Hier werden einzelne Strukturelemente in Form von Shape Dateien verwaltet. Diese Dateien enthalten je nach Datengrundlage die drei verschiedenen Elemente Punkte, Linien und Flächen. So werden zum Beispiel Waldflächen und Ortslagen durch Flächen, Straßen und Flüsse mit Linien sowie Masten und Einzelbäume mit Punkten abgebildet.

Im Gegensatz zu den Daten der Ortslagen, die ohne eine weitere Betrachtung zur Weiterverarbeitung übernommen werden können, ist es notwendig die Daten der Vegetation genauer zu betrachten. Im ATKIS sind die Vegetationsdaten in eine Vielzahl von Untergruppen aufgeschlüsselt und mit einer eigenen eindeutigen Objektidentifikationsnummer versehen. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die für eine Sichtbarkeitsanalyse relevanten Vegetationsformen und deren Identifikation im ATKIS.

Objekt ID	Bezeichnung
4107	Wald, Forst
4108	Gehölz
4201	Baum
4202	Baumreihe
4203	Hecke, Knick

Tabelle 1: Übersicht Vegetationsformen und ObjektID [geobasis-bb12]

5.2 Situationsbezogene Anpassung der Grundlagendaten

5.2.1 Abbildung von Objekten im Digitalen Oberflächenmodell

Diese einzelnen Untergruppen müssen vor der Verwendung zunächst auf die Abbildungsmöglichkeit im digitalen Oberflächenmodell untersucht werden. Dazu wurden die Vegetationsdaten aus dem ATKIS mit der tatsächlich vorhandenen Vegetation verglichen. Das Ergebnis dieser Vergleiche zeigt, dass es nur sinnvoll ist Wald und Gehölzflächen in das digitale Oberflächenmodell zu übernehmen.

Andere Vegetationsformen wie Hecken, Baumreihen und Einzelbäume eignen sich durch die Art der Kartierung nicht für die Modellierung eines DOM. Nachfolgend werden die Vegetationsformen Hecken, Baumreihen und Einzelbäume näher betrachtet und die Gründe für den Verzicht einer Modellierung erörtert. Eine Hecke oder Knick ist laut dem ATKIS-Objektartenkatalog definiert als

1) "In einer Reihe dicht beieinander stehende, meist wildwachsende Büsche oder Sträucher." [geobasis-bb12]

und

2) "Als Begrenzung oder Umzäunung angepflanzte, dichte, in sich geschlossene, ineinander verwachsene und meist in eine bestimmte Form geschnittene Reihe von Büschen oder Sträuchern." [geobasis-bb12]

Eine Hecke wird im ATKIS mit Hilfe einer Linie oder eines Linienzuges dargestellt. Die Kartierung dieser Vegetationsform ist sehr genau, jedoch sind die Höhe und die Grundfläche einer Hecke, welche in den Daten des nicht ATKIS erfasst sind, in der Realität mitunter sehr unterschiedlich und lassen sich dadurch nicht ausreichend in einem DOM modellieren. Eine Hecke kann neben den Höhenunterschieden auch Lücken aufweisen, welche im Bezug auf die Sichtbarkeit eines Objektes eine Abweichung zwischen den Ergebnissen der Berechnung im Modell und der Realität hervorrufen. Dies führt dann zu einer berechneten Verschattung, welche in der Realität nicht gegeben ist. Zur visuellen Darstellung, wurden zwei im ATKIS kartierte Hecken in gleicher Entfernung aufgenommen und gegenübergestellt.



Abbildung 13: Vergleich zweier im ATKIS kartierter Hecken

Eine Reihe von Bäumen ist im ATKIS-Objektartenkatalog als

"Reihenförmige Anordnung von Bäumen außerhalb von 'Wald, Forst'." [geobasis-bb12]

definiert und wird wie eine Hecke mit einer Linie oder einem Linienzug dargestellt. Lücken in einer Baumreihe durch fehlende bzw. nachgepflanzte Bäume, welche noch nicht die Höhe der anderen Bäume erreicht haben, verursacht. Des Weiteren ist der Abstand der Einzelbäume nicht einheitlich, wodurch sich zwangsläufig Lücken ergeben.

Da eine Baumreihe aus Einzelbäumen besteht, ist es dem Betrachter möglich, den unteren Bereich eines sonst verschatteten Objektes wahrzunehmen. Diese Wahrnehmung ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass Bäume sofern sie einreihig vorhanden sind, nur im Bereich der Baumkrone eine ausreichende Verschattung eines Objektes bewirken können. Die folgende Abbildung stellt den Vergleich eines Datensatzes im ATKIS aus dem Jahr 2008 mit der Realität dar. Die betrachtete Baumreihe befindet sich nordöstlich der Ortschaft Stramehl im Norden der Uckermark. Der Datensatz im ATKIS stellt eine durchgehende Baumreihe dar. In der Realität, wird diese Baumreihe jedoch durch eine Lücke unterbrochen. Eine anhand der Daten berechnete Verschattung wäre hier nicht gegeben.

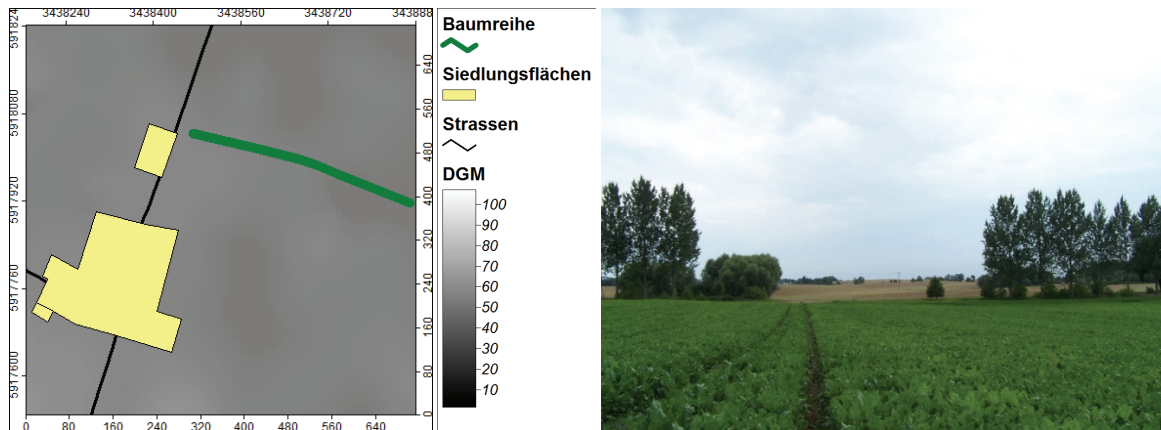


Abbildung 14: Vergleich zwischen Datenlage und Realität bei Baumreihen

Der ATKIS-Objektartenkatalog definiert einen Baum als ein

"Holzgewächs mit Stamm" [geobasis-bb12]

Erfasst werden laut dem ATKIS-Objektartenkatalog einzeln stehende Bäume nur, wenn diese als Naturdenkmäler eingestuft oder landschaftsprägend sind.

Im Gegensatz zu Hecken oder Baumreihen werden Einzelbäume für das ATKIS mit Hilfe einer Punktgeometrie abgebildet. Jedoch sind auch hier keine Informationen zur Höhe und zur Art der Vegetation hinterlegt. Durch die fehlende Höhenangabe und die unterschiedliche Form, bedingt durch die Art der Vegetation, lassen sich Einzelbäume nicht zuverlässig in einem DOM modellieren.



Abbildung 15: Vergleich verschiedener Einzelbäume

5.2.2 Die Erweiterung eines Digitalen Geländemodells

Nach der Betrachtung der verschiedenen Vegetationsformen und der Auswahl der für die Modellierung in einem DOM geeigneten Strukturelemente, kann die Erweiterung des DGM vorgenommen werden. Dazu werden die flächenhaften Daten wie Ortslagen, Wälder und Gehölz berücksichtigt. Nachfolgend wird anhand eines Beispiels die Vorgehensweise in Verbindung mit der Nutzung der Software „System for Automated Geoscientific Analysis“ (SAGA) erläutert. Die verwendeten Daten stammen aus dem ATKIS Datensatz aus dem Jahr 2008. Dabei werden zu jeder Einzelfläche in der Attributtabelle die Objektart (OBJART), das Vegetationsmerkmal (VEG), die Längenausdehnung (SHAPE LENG), die Fläche (SHAPE_AREA) sowie eine eindeutige Nummer (ID) verwaltet. In dem folgenden Beispiel werden Waldflächen mit der OBJART 4107 betrachtet und dem VEG 1000. Die OBJART 4107 ist definiert für Flächen, die mit Forstpflanzen (Waldbäume und Waldsträucher) bestockt ist. Das VEG mit dem Wert 1000 bezeichnet dabei Laubholz.

	OBJART	VEG	SHAPE LENG	SHAPE_AREA	ID
1	4107	1000	3.39258797505e+002	5.62201500001e+003	14785
2	4107	1000	1.56345940511e+002	1.48652055002e+003	14786
3	4107	1000	5.61988014348e+002	1.07880040000e+004	14791
4	4107	1000	2.17453336903e+003	1.15210381000e+005	14792
5	4107	1000	4.41064975821e+002	3.48546374997e+003	14793

Abbildung 16: Attributtabelle

Den nächsten Schritt der Bearbeitung stellt das Hinzufügen eines neuen Attributes, der zu modellierenden Höhe, dar. Damit der Aufwand dafür begrenzt wird, ist es sinnvoll zuvor die einzelnen Flächen zusammenzufassen. Dazu bietet die Software SAGA die Funktion "dissolve" an. Im Falle des Beispiels bietet sich eine Zusammenführung nach dem Attribut OBJART an. Da so auch die einzelnen Geometrien zusammengefasst werden, ist das Ergebnis dieser Vorgehensweise eine Fläche. Anschließend kann die zu modellierende Höhe von 20 m als ein neues Attribut eingetragen werden.

	OBJART	HöHE
1	4107	20

Abbildung 17: Attributtabelle mit Höhenattribut nach der Zusammenfassung

Anschließend wird dieser Datensatz in ein sogenanntes GRID, also einen Rasterdatensatz umgewandelt. Die dafür zuständige Funktion in SAGA ist "shapes to grid". Dabei muss die Shape Datei und das zu verwendende Attribut angegeben werden. Die Datengrundlagen sind hier die originale Shape Datei der Waldflächen, mit der bearbeiteten Attributtabelle, und das eingefügte Attribut der Höhe. Das Ergebnis der Umwandlung ist ein Rasterdatensatz wobei der berücksichtigten Fläche der Wert des Höhenattributs aus der Attributtabelle zugewiesen wird. Im Falle der Waldflächen aus dem Beispiel bedeutet dies, dass den Rasterzellen, welche die Waldflächen abbilden, ein Wert von 20 zugewiesen wird und die restlichen Rasterzellen keine Werte beinhalten.

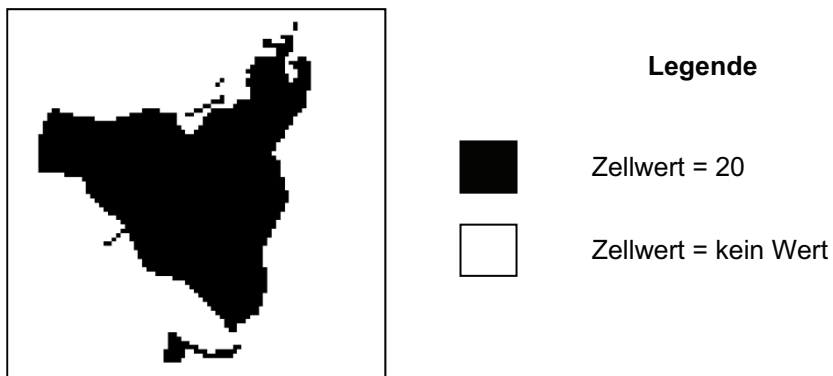


Abbildung 18: Ausschnitt aus dem erzeugten GRID

Der letzte Schritt zum DOM, in dem die Waldflächen mit einer Höhe von 20 m berücksichtigt werden, ist das Zusammenführen des Ergebnisses aus dem letzten Arbeitsschritt und dem DGM. Dazu werden das DGM und das GRID addiert. Das Ergebnis ist ein DOM, welches neben der Erdoberfläche aus dem DGM auch die Waldflächen mit einer vorher bestimmten Höhe von 20 m berücksichtigt.

Diese Vorgehensweise wird dann anschließend für alle zu berücksichtigenden Elemente und jeweiligen Höhen wiederholt.

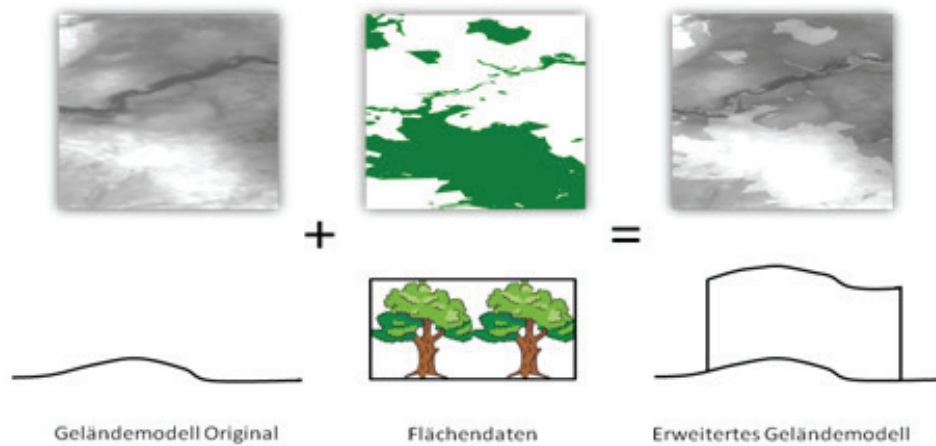


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Erweiterung eines Geländemodells

5.2.3 Probleme der Abbildung von Objekten in einem Digitalen Modell

Ein grundlegendes Problem bei der Abbildung von Daten aus dem ATKIS, welche mit Linien, Linienzügen, Punkten und kleinflächigen Polygonen abgebildet werden, ergibt sich schon durch die Verwendung des DGM. Wird beispielsweise ein DGM mit einer Maschenweite von 25 m verwendet, so muss etwa für die Modellierung eines Einzelbaumes mit einer Höhe von 10 m der Höhenwert der entsprechenden Rasterzelle um die Höhe des Baumes verändert werden. Dadurch erhält der modellierte Baum eine quadratische Grundfläche, die der Zellgröße entspricht.

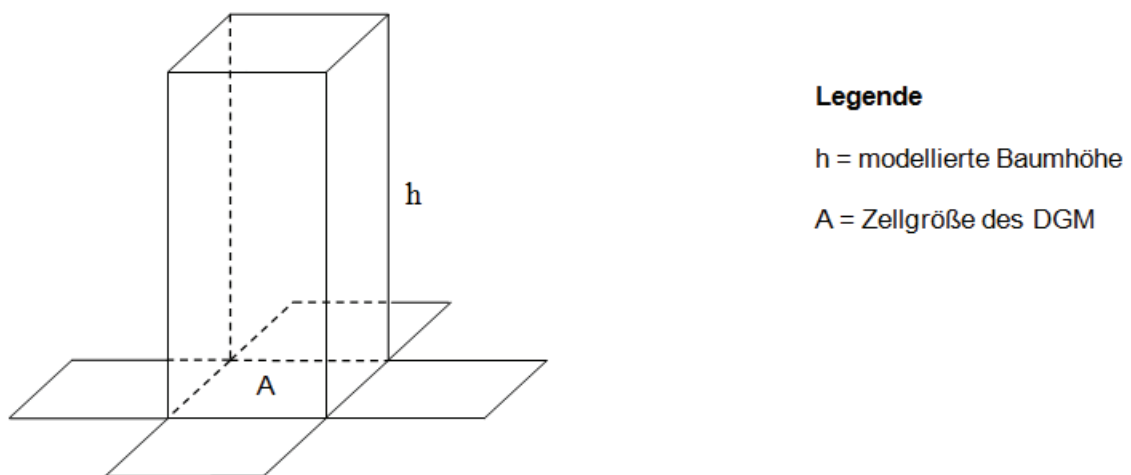


Abbildung 20: Darstellung eines modellierten Einzelbaumes

Der Einzelbaum wird so durch einen Quader abgebildet, welcher aber die Form eines Baumes nur unzureichend abbildet. Die Auswirkungen dieser Modellierung verstärken sich dabei noch weiter mit Zunahme der Maschenweite des verwendeten DGM.

Auch die durch eine Linie oder einen Linienzug dargestellten Elemente, wie zum Beispiel eine Hecke oder eine Baumreihe, lassen sich nicht ohne weiteres sinnvoll in einem erweiterten DGM modellieren. Hier ist es notwendig, vor der Erstellung eines Rasterdatensatzes, für die einzelnen Elemente eine Grundfläche zu definieren. Dazu kann ein Puffer um die Geometrieelemente gelegt werden, der dann anschließend zusammen mit dem vergebenen Höhenattribut in einen Rasterdatensatz übergeben wird.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich Baumreihen, Hecken und Einzelbäume aus den zuvor angeführten Gründen nicht für eine generelle Modellierung eignen, sondern bei der Betrachtung eines Gebietes gesondert aufgenommen, begutachtet und modelliert werden müssen.

5.2.4 Fazit

Strukturelemente wie Hecken, Baumreihen und Einzelbäume, welche bei der Erstellung eines DOM nicht berücksichtigt werden, haben in der Realität einen Einfluss auf die Sichtbarkeit eines Objektes, welcher aber nicht in das Ergebnis der Sichtbarkeitsanalyse einfließt.

Ich bin daher der Ansicht, dass eine Verschattung durch diese nicht berücksichtigten Elemente den Betroffenen zugutekommt. Da diese Methodik auch bei der Information von Bürgern eingesetzt werden soll, sollten auf keinen Fall Ergebnisse präsentiert werden, welche später durch die Realität übertroffen werden. Das Ergebnis der Analyse muss also den Fall des GAU darstellen. Andernfalls würde die Glaubhaftigkeit der Nutzer dieser Methodik sowie das Vertrauen der Bürger in die seriöse Planung zerstört werden.

5.3 Anpassung der Methodik

5.3.1 Die Betrachtungshöhen einer Windenergieanlage

Um bei einer Sichtbarkeitsanalyse die Form eines Objektes ausreichend berücksichtigen zu können, ist es erforderlich statt wie üblich eine Objekthöhe, mehrere Höhen eines Objektes zu betrachten. Dazu ist es notwendig, für WEA eine sinnvolle und allgemeingültige Einteilung in Betrachtungshöhen vorzunehmen.

Dabei ist es wichtig, die Balance zwischen ausreichender Abbildung des Objektes und mit Blick auf die folgende Berechnung der Ressourcenplanung zu finden. In einer Vorbetrachtung wurden die markanten Punkte einer WEA benannt.

Eine WEA besteht im Wesentlichen aus zwei elementaren Teilen, dem Mast und dem Rotor mit Nabengehäuse. Während der Mast die optische Verbindung einer WEA zur Erdoberfläche darstellt, ist die Nabenhöhe mit der Gondel als massives Bauteil, die sich gleichzeitig im Mittelpunkt des Rotors befindet, der markanteste Punkt einer WEA. Der Rotor bildet durch die immensen Dimensionen und die bei einer Rotation überstrichenen Fläche, einen Schwerpunkt bei der Abbildung einer WEA.

Die für die Sichtbarkeitsanalyse und deren Bewertung relevanten Angaben zu einer WEA sind daher die Nabenhöhe und der Rotordurchmesser.



Abbildung 19: Vergleich der Sichtbarkeit einer WEA

Damit diese markanten Punkte abgebildet werden können, wird die WEA in sechs Betrachtungshöhen eingeteilt. Fünf Betrachtungshöhen entfallen dabei auf den Rotor und eine Betrachtungshöhe ist für den Mast vorgesehen.

Der Grund für diese Verteilung der Betrachtungshöhen, ist die deutlich stärkere visuelle Wahrnehmung einer WEA bei gegebener Sichtbarkeit des Rotors. Ist zusätzlich zu dem Rotor der Mast der WEA sichtbar, wird die visuelle Wahrnehmung in einem geringeren Maße verstärkt.

Das Verhältnis dieser beiden Angaben zueinander ist abhängig vom Anlagenhersteller und Anlagentyp und ist daher variabel. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird die unterste Betrachtungshöhe auf 25% der Nabenhöhe gesetzt.

Die übrigen fünf Betrachtungshöhen werden durch den Rotordurchmesser in Verbindung mit der Nabenhöhe definiert. Ausgangspunkt für die fünf vom Rotordurchmesser abhängigen Betrachtungshöhen ist die Nabenhöhe der WEA.

Dazu wird zur Nabenhöhe jeweils einmal der halbe sowie der gesamte Rotorradius addiert und subtrahiert. Durch diese Vorgehensweise werden die fünf vom Rotordurchmesser abhängigen Betrachtungshöhen definiert.

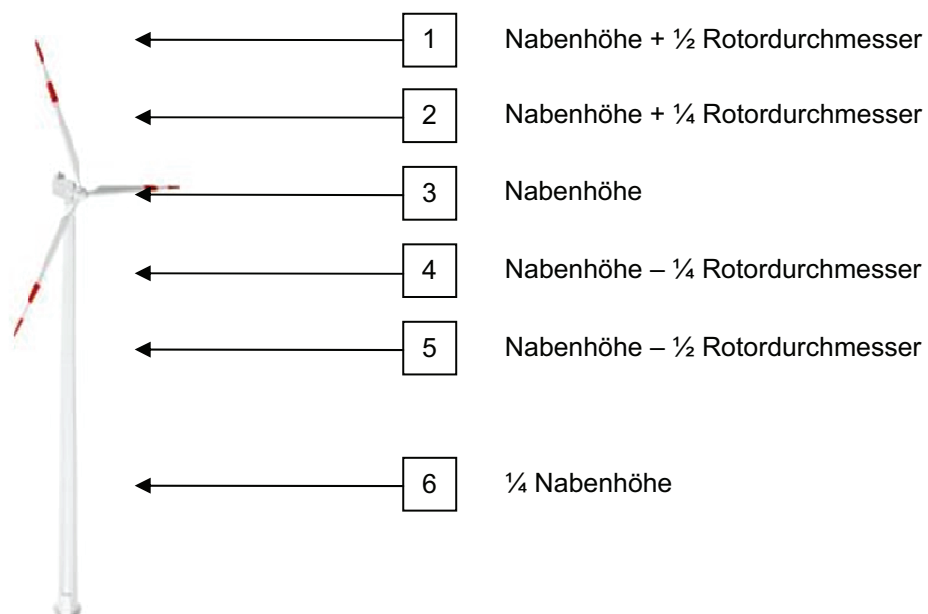


Abbildung 21: Übersicht Betrachtungshöhen

5.3.2 Die Wertigkeiten der Betrachtungshöhen

Nach der Einteilung der WEA in sechs Betrachtungshöhen, siehe Punkt 6.1, wird für jede dieser Höhen eine einzelne Sichtbarkeitsanalyse durchgeführt. Die so entstandenen sechs Einzelergebnisse bilden jeweils die Sichtbarkeit einer Objekthöhe ab. Summiert man nun die Layer und damit die einzelnen Zellwerte der Raster, so ergibt sich ein Gesamtergebnis der Sichtbarkeitsanalyse für diese WEA.

Wurden im Verlauf der einzelnen Sichtbarkeitsanalysen Werte von 1 für eine bestehende Sichtbarkeit und 0 für keine Sichtbarkeit vergeben, so erstreckt sich der Wertebereich der Sichtbarkeitsanalyse einer WEA mit sechs Betrachtungshöhen zwischen 0 und 6. Dieser Wertebereich würde sich bei der Nutzung des in Punkt 7.2 beschriebenen Moduls ergeben.

Aufgrund dieser Tatsache kann bei der Betrachtung einer einzelnen WEA, anhand dieses Gesamtergebnisses, für jede Rasterzelle der betrachteten Fläche jedoch nur eine Aussage getroffen werden, welche Betrachtungshöhen dieser WEA sichtbar sind. Die Sichtbarkeiten der einzelnen Höhen würden so durch die Werte von 1 für die Gesamthöhe bis 6 für 1/4 der Nabenhöhe dargestellt werden. Dabei ist davon auszugehen, dass wenn eine Sichtbarkeit zu einer Betrachtungshöhe besteht, die jeweils höher gelegene Betrachtungshöhe ebenfalls sichtbar sind.

Um die Form einer WEA und deren visuelle Wahrnehmung wirklichkeitsgetreu nachzubilden, ist es erforderlich die vorher definierten Betrachtungshöhen einer Gewichtung zu unterziehen. Dies ist notwendig, da eine WEA bedingt durch den Rotor keine gleichmäßige Form, wie zum Beispiel ein einfacher Mast, besitzt. Daher erzeugt jede Betrachtungshöhe eine andere visuelle Wahrnehmung der WEA für den Betrachter.

Um diesen Unterschieden bei der visuellen Wahrnehmung gerecht zu werden, werden bei der Analyse der einzelnen Betrachtungshöhen und der Erzeugung der jeweiligen Ergebnislayer nicht wie ursprünglich Werte von 0 oder 1, sondern je nach Betrachtungshöhe Werte von 0 oder 1 bis 5 verteilt. Die folgende Abbildung stellt die Werteverteilung schematisch dar.

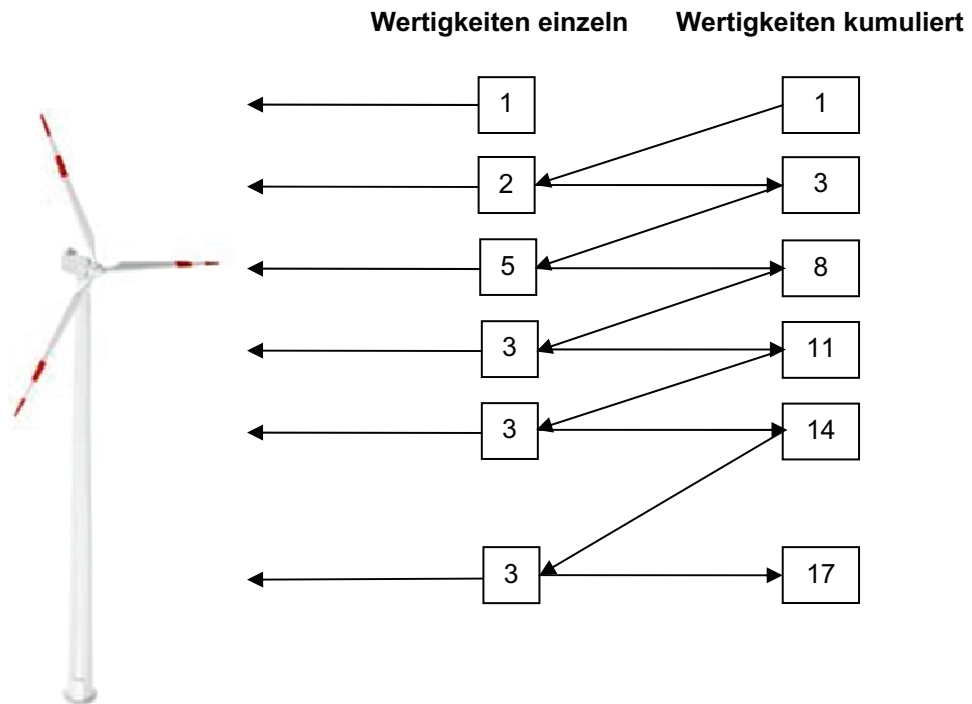


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Verteilung der Wertigkeiten

Die Wertigkeiten wurden beginnend mit dem Wert 1 für die Gesamthöhe entsprechend der eigenen visuellen Wahrnehmung vergeben. Die Grundlagen dafür sind die Betrachtung von installierten WEA sowie die nachträgliche Auswertung von selbst angefertigten Aufnahmen, welche WEA in unterschiedlichen Verschattungen abbilden. Nachfolgend wird die Vergabe der Wertigkeiten beginnend bei der obersten Betrachtungshöhe erläutert.

Betrachtet man eine WEA entsprechend den sechs in Punkt 5.3.1 beschriebenen Höhen, so ist im Fall der gegebenen Sichtbarkeit zur obersten Betrachtungshöhe, der Gesamthöhe, die visuelle Wahrnehmung gering. Dies ist der Fall wenn eine WEA fast vollständig zum Beispiel durch eine Waldfläche verschattet wird und nur die Spitze des Rotors sichtbar ist. In diesem Fall wird der geringste Wert des Wertebereiches, der Wert 1 vergeben.



Abbildung 23: Beispielsituation für die Betrachtungshöhe Nr. 1

Besteht dagegen eine Sichtbarkeit eines halben Rotorblattes, was der zweiten Betrachtungshöhe entspricht, wird der Wert 2 vergeben. Diese Betrachtungshöhe wird durch die Summe der Nabenhöhe und $\frac{1}{4}$ des Rotordurchmessers bestimmt. Der Gesamtwert erhöht sich durch die Sichtbarkeit von zwei Betrachtungshöhen auf den Wert 3.



Abbildung 24: Beispielsituation für die Betrachtungshöhe Nr. 2

Die dritte Betrachtungshöhe, der gleichzeitig bei einer bestehenden Sichtbarkeit auch der größte Wert vergeben wird ist die Nabenhöhe. Auf Höhe der Nabe erreicht die Sichtbarkeit des Rotors die volle Ausdehnung in der Breite. Zusätzlich ist sie der

Drehpunkt des Rotors und besitzt mit der Gondel ein massives Bauteil einer WEA. Daher wird für diese Betrachtungshöhe der Wert 5 vergeben. Der Gesamtwert für eine bestehende Sichtbarkeit ab der Nabenhöhe einer WEA, erhöht sich folglich auf den Wert 8.



Abbildung 25: Beispielsituation für die Betrachtungshöhe Nr. 3

Im Fall einer Sichtbarkeit zur vierten Betrachtungshöhe, wird der Wert 3 vergeben. Diese Betrachtungshöhe wird durch die Nabenhöhe minus $\frac{1}{4}$ des Rotordurchmessers festgelegt. Die visuelle Wahrnehmung wird hier durch die Sichtbarkeit zur Nabenhöhe dominiert und erhöht sich nur mäßig. Der Gesamtwert der Sichtbarkeit erhöht sich auf den Wert 11.



Abbildung 26: Beispielsituation für die Betrachtungshöhe Nr. 4

Die fünfte Betrachtungshöhe wird durch die Nabenhöhe minus den Rotorradius festgelegt. Hier erreicht die Sichtbarkeit des Rotors einer WEA die maximale vertikale Ausdehnung. Die visuelle Wahrnehmung wird aber weiterhin durch die oberen Betrachtungshöhen dominiert und erhöht sich wiederum nur mäßig. Daher wird auch hier der Wert 3 vergeben, so dass der Gesamtwert der Sichtbarkeit auf einen Wert von 14 steigt.



Abbildung 27: Beispielsituation für die Betrachtungshöhe Nr. 5

Die unterste Betrachtungshöhe ist für einen Wert von 25% der Nabenhöhe definiert. Dadurch sollen die unterschiedlichen Verhältnisse zwischen Rotordurchmesser und Nabenhöhe abgebildet werden. Dieses Verhältnis ist abhängig vom Anlagentyp. Im Fall der WEA Enercon E-82, mit einem Rotordurchmesser von 82 m befindet sich die Nabenhöhe auf 138 m. Dagegen befindet sich die Nabenhöhe einer WEA vom Typ REpower MM 82, bei gleichem Rotordurchmesser, auf einer Höhe von 100 m. Der Mast einer WEA stellt die visuelle Verbindung des Rotors zur Erdoberfläche dar und erhöht die visuelle Wahrnehmung. Dieser Betrachtungshöhe wurde der Wert 3 zugeordnet, was den Gesamtwert der Sichtbarkeit aller Betrachtungshöhen auf den Wert 17 ansteigen lässt.



Abbildung 28: Beispielsituation für die Betrachtungshöhe Nr. 6

5.3.3 Der Einfluss der Entfernung

Die visuelle Wahrnehmung eines Objektes hängt hauptsächlich von der Entfernung zwischen dem Betrachter und dem Objekt ab. Ohne die Berücksichtigung der Entfernung bei der Ermittlung der visuellen Wahrnehmung eines Objektes, wäre die Wahrnehmung bei gleicher Sichtbarkeit in jeder Entfernung identisch. Dies ist jedoch in der Realität nicht der Fall.

Vor der Festlegung auf eine geeignete Methode, um die Entfernung angemessen zu berücksichtigen muss untersucht werden, wie sich unterschiedliche Entfernungen auf die Objektgröße auswirken. Dazu wurde, ausgehend von einer WEA, Beobachtungspunkte auf einer geraden Linie in einem Abstand von 500 Metern bestimmt und einzelne photographische Aufnahmen der WEA aufgenommen. Die WEA vom Typ Enercon E-82 weist eine Gesamthöhe von 180 m auf. Eine Analyse der Beobachtungen ergab die in der folgenden Abbildung zusammengefassten Ergebnisse.

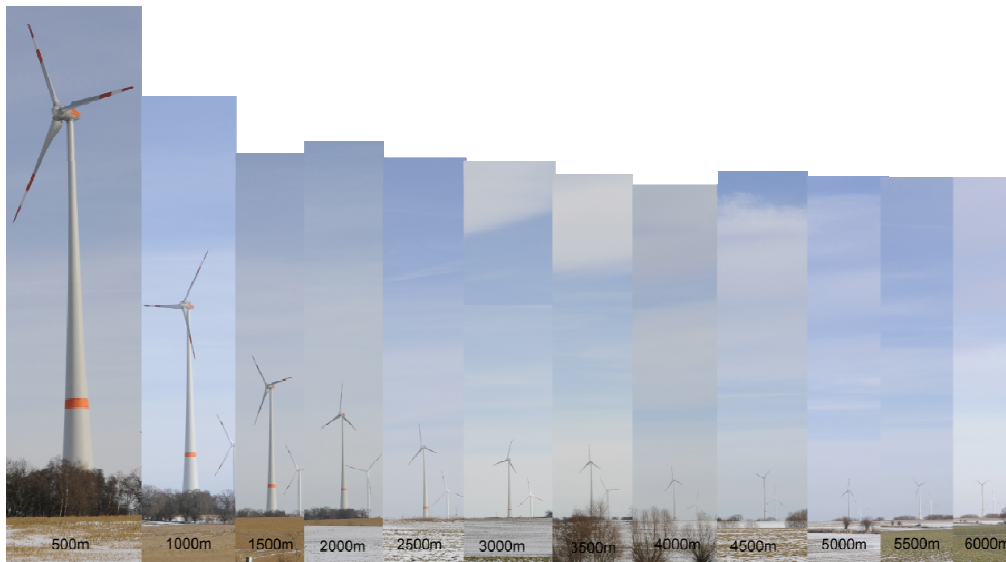
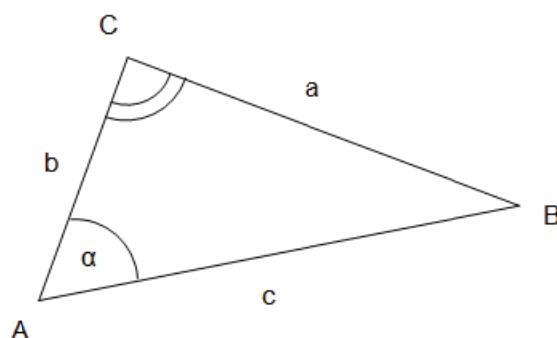


Abbildung 29: Darstellung der Entfernung auf die wahrnehmbare Objektgröße

Hieraus folgt, dass sich die wahrgenommene Objektgröße nicht proportional zur Entfernung verhält. Vielmehr beschreibt die Objektgröße bei linear zunehmender Entfernung eine stark abfallende Kurve.

Aufgrund dieser Tatsache gilt es eine Methode zu finden, welche diese Kurve abbildet.

Ein Verfahren zur Abbildung der wahrnehmbaren Objektgröße ist die Berechnung des aufgespannten Winkels zwischen dem Betrachtungsstandpunkt, dem Objektfußpunkt und der Objektgesamthöhe. Für die Berechnung dieses Winkels werden die Winkelfunktionen im rechtwinkligen Dreieck genutzt.



Legende

a = Gegenkathete

b = Ankathete

c = Hypotenuse

α = gesuchter Winkel

Abbildung 32: Winkelbeziehungen im rechtwinkligen Dreieck [nach FJGRJ09]

Umgesetzt für den Fall der Betrachtung einer WEA bedeutet dies, dass die Ankathete der Entfernung zwischen dem Betrachter und der WEA sowie die Gegenkathete der Gesamthöhe der WEA entspricht.

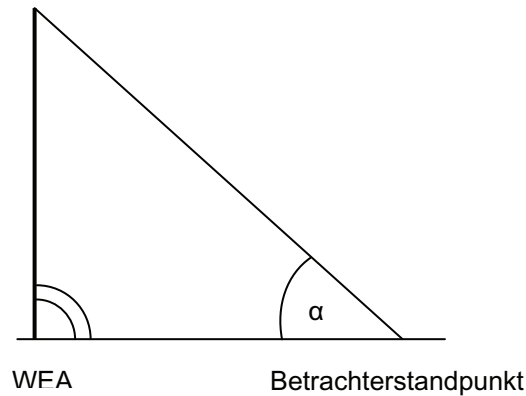


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Umsetzung der Winkelbeziehungen

Der Tangens des gesuchten Winkels wird durch das Verhältnis von Gegenkathete und Ankathete definiert.

$$\tan \alpha = \left(\frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}} \right)$$

Daraus folgt, dass der gesuchte Winkel durch die Umkehrfunktion des Tangens von der Gegenkathete durch die Ankathete bestimmt wird.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}} \right)$$

Bezogen auf die Betrachtung einer WEA ergibt sich die Formel:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Gesamthöhe der WEA}}{\text{Entfernung zur WEA}} \right)$$

Der Einfluss der Entfernung folgt also wie in der folgenden Abbildung dargestellt der Tangensfunktion und nähert sich mit zunehmender Entfernung zur WEA dem Wert 0 an. Der Grund dafür ist der gegen 0 gehende Quotient aus der Gesamthöhe und der Entfernung. Für die folgende Abbildung wurde wie bei Beobachtungsanalyse eine

Gesamthöhe von 180 m angenommen. Die Winkelwerte wurden entsprechend der Beobachtungsanalyse in Schrittweiten von 500 m für einen Entfernungsbereich zur WEA von 0,5 bis 6 km berechnet.

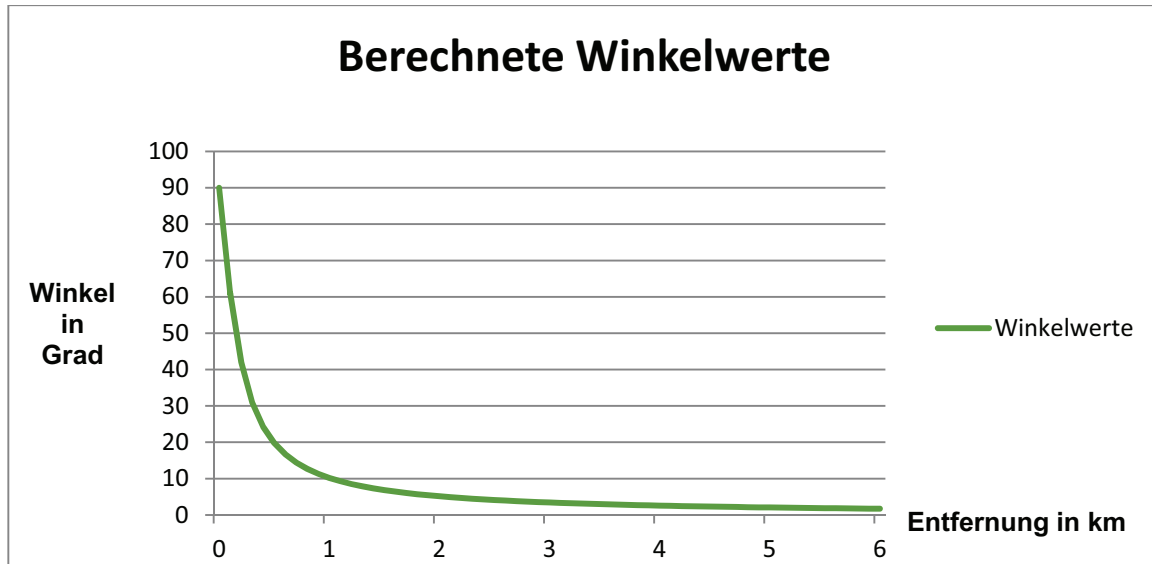


Abbildung 31: Entwicklung der Winkelwerte

Theoretisch befindet sich der maximale berechenbare Winkelwert in unmittelbarer Nähe zum betrachteten Objekt. Beträgt die Entfernung zum Objekt jedoch 0, gilt für die Gesamthöhe von 180m entsprechend der oben genannten Formel:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{180}{0} \right)$$

also:

$$\alpha = \tan^{-1} (0)$$

was wiederum einem Winkelwert von 0 entspricht. Der maximale berechenbare Winkel wird also durch die Maschenweite des verwendeten DGM bestimmt. Beträgt die Maschenweite beispielsweise 10m, so gilt:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{180}{10} \right)$$

also:

$$\alpha = \tan^{-1} (18)$$

Der maximale berechenbare Winkel beträgt daher bei einer Gesamthöhe von 180 m und einer Maschenweite des verwendeten DGM von 10m 86,82 Grad. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis dieser mit SAGA durchgeführten Berechnung.

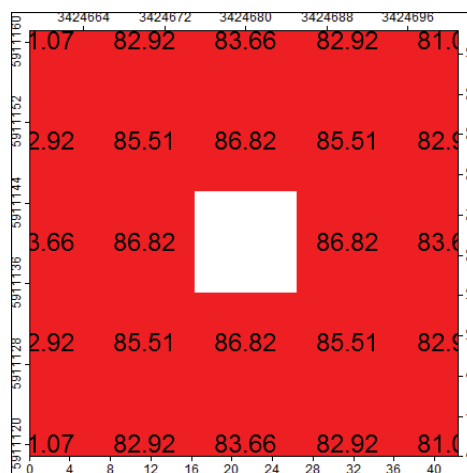


Abbildung 32: Darstellung der Berechnungsergebnisse

Eine Vergleich der berechneten Werte mit der Auswertung der Beobachtungen zeigt eine Übereinstimmung des gedachten Kurvenverlaufes der Beobachtungsanalyse und der berechneten Kurve der Winkelberechnung. Demzufolge ist diese Methodik geeignet, um die Entfernung eines Objektes im allgemeinen und einer WEA im speziellen zu berücksichtigen.

Dieser Winkel wird im Bezug auf die betrachtete WEA für jede einzelne Rasterzelle berechnet. Werden mehrere Anlagen betrachtet, so müssen die Anlagenbezogenen Ergebnislayer anschließend miteinander summiert werden. Dabei werden die Zellwerte von Zellen mit gleicher Position addiert und die Summe anschließend in einem eigenen Layer abgelegt. Durch diese Vorgehensweise wird für jede Zelle des Rasterformates ein Gesamtwert ermittelt, der angibt, in welchem Gesamtwinkel WEA von einer jeweiligen Rasterzelle aus sichtbar sind. Durch diese Methodik ist es möglich, WEA in einem Umfeld von 360 Grad um den betrachteten Standpunkt herum zu berücksichtigen.

5.3.4 Die Verbindung der Einzelergebnisse

Die Durchführung einer Sichtbarkeitsanalyse unter Verwendung der erarbeiteten Methodik erzeugt zwei Ergebnisse. In den folgenden Ausführungen soll die Verbindung der Einzelergebnisse zu einem Gesamtergebnis veranschaulicht werden. Dafür wurde im Folgenden, aus Gründen der Übersichtlichkeit, eine fiktive Einzelanlage mit einer Nabenhöhe von 10 m und einem Rotordurchmesser von ebenfalls 10 m betrachtet für eine quadratische Teilfläche mit einer Kantenlänge von 1.000 m. Die Grundlage dieser Teilfläche ist ein DGM mit einer Maschenweite von 10 m.

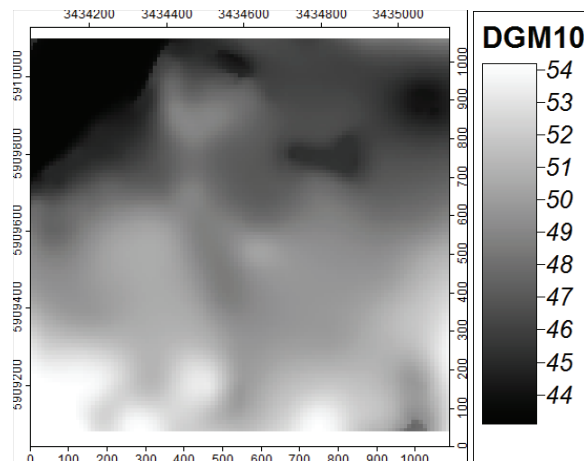


Abbildung 33: Darstellung der verwendeten Teilfläche des DGM

Der erste Schritt ist die Ermittlung der Sichtbarkeit des Objektes nach der im Punkt 5.3.2 beschriebenen Methodik. Die Basis dafür sind neben der Teilfläche des DGM die Nabenhöhe, der Rotordurchmesser und die Koordinaten der WEA. Der Standort der fiktiven Anlage, wurde mit Sicht auf den Höhenverlauf der Teilfläche, in die linke obere Ecke des Ausschnitts auf den Rechtswert 3434116 und den Hochwert 5910019 gelegt.

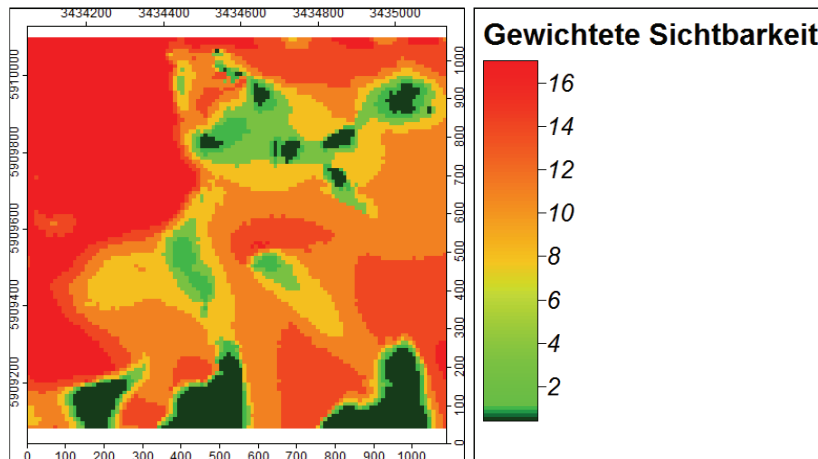


Abbildung 34: Darstellung der Gewichteten Sichtbarkeit

Durch den fehlenden Einfluss der Entfernung kommt es dazu, dass gleiche Sichtbarkeiten in unterschiedlichen Entfernungen zur betrachteten WEA auftreten. Um der visuellen Wahrnehmung in der Realität gerecht zu werden, ist es im zweiten Schritt notwendig, den Einfluss der Entfernung zwischen dem Betrachter und der betrachteten WEA zu ermitteln. Dazu wird, entsprechend der Methodik in Punkt 5.3.3, der Winkel zwischen dem betrachteten Standpunkt, dem Fußpunkt und dem höchsten Punkt der WEA berechnet und in einem Ergebnisdatensatz im Rasterformat abgelegt.

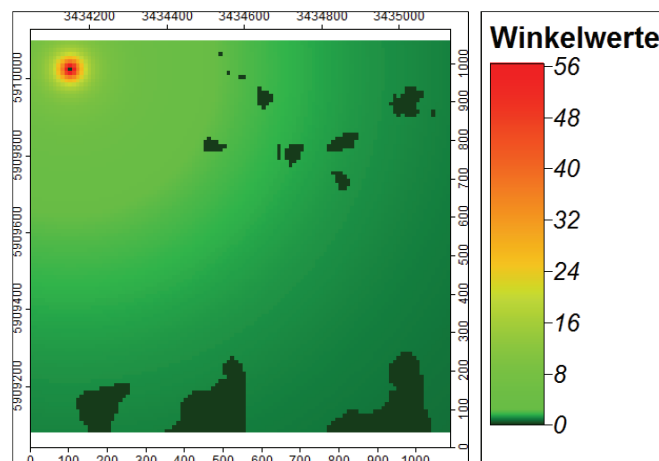


Abbildung 35: Winkelwerte der Rasterzellen

Deutlich zu erkennen ist der Standpunkt der betrachteten WEA in der oberen linken Ecke der Abbildung 37. Im direkten Umfeld des Anlagenstandpunktes treten erwartungsgemäß die höchsten Winkelwerte auf. Dieses Teilergebnis bildet den Einfluss der Entfernung zur WEA ab.

Zur Berechnung des Endergebnisses werden anschließend die beiden Einzelergebnisse, welche jeweils in einem Rasterformat vorliegen, miteinander multipliziert.

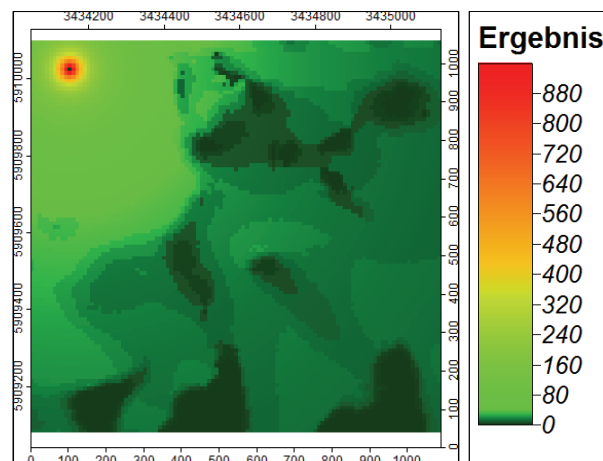


Abbildung 36: Endergebnis

Dadurch wird erreicht, dass gleiche Sichtbarkeiten in unterschiedlichen Entfernungen zur betrachteten WEA, durch den Einfluss der Winkelwerte, ab bzw. aufgewertet werden. Eine direkte Gegenüberstellung der Einzelergebnisse sowie des Endergebnisses soll diese Entwicklung verdeutlichen.

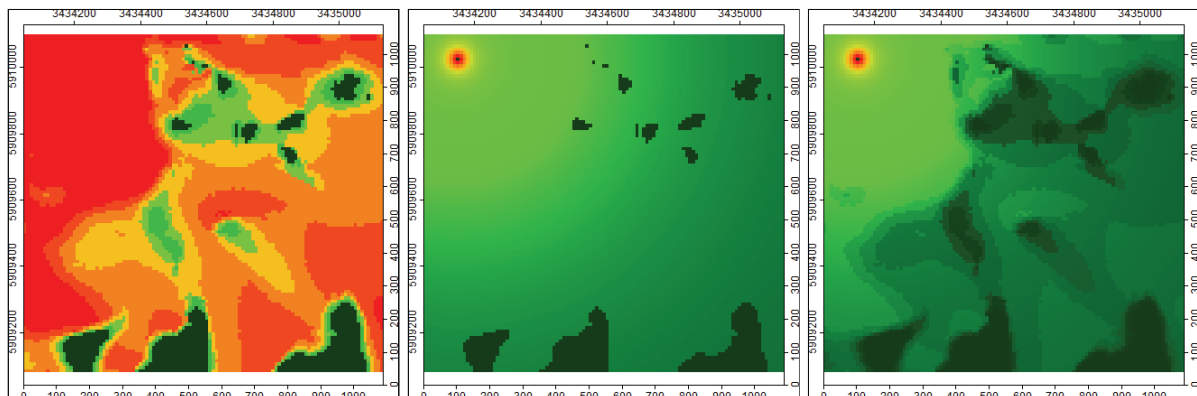
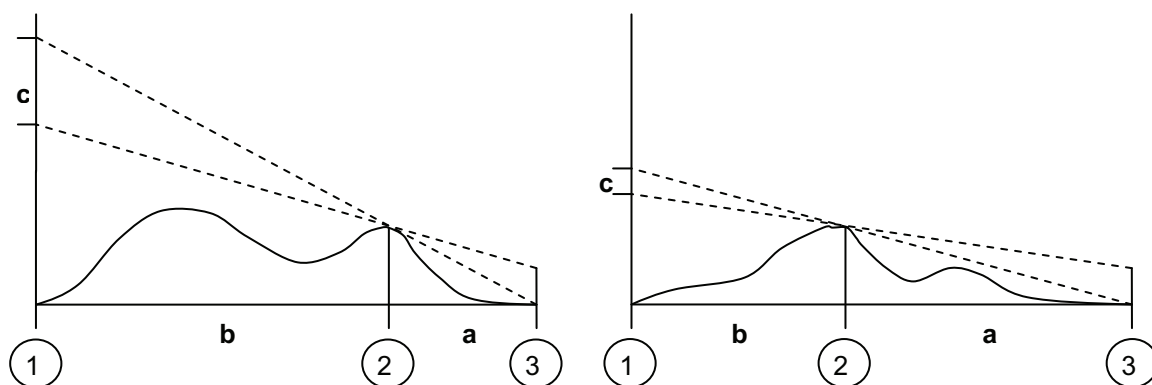


Abbildung 37: Gegenüberstellung Sichtbarkeit – Winkelwerte - Endergebnis

5.3.5 Der Einfluss der Beobachtungshöhe

Der Grund für den Einfluss der Beobachtungshöhe ist immer ein Verschattungselement. Ein solches Element kann neben Gebäuden oder einer Vegetationsform auch eine Geländestruktur, wie zum Beispiel ein Hang oder ein Hügel sein. Der Einfluss der Beobachtungshöhe hängt dabei im Wesentlichen von dem Verhältnis zwischen zwei Größen ab.

Eine Größe ist dabei die Entfernung zwischen dem Betrachter und dem Verschattungselement. Die zweite Größe ist die Entfernung zwischen dem Objekt und dem Verschattungselement.



Legende:

- ① WEA ② Verschattungselement ③ Beobachter

- a: Entfernung zwischen Beobachter und Verschattungselement
b: Entfernung zwischen WEA und Verschattungselement
c: Einfluss der Beobachtungshöhe

Abbildung 38: Schematische Darstellung des Einflusses der Betrachtungshöhe

Dabei gilt, je größer die Entfernung zwischen dem Betrachter und dem Verschattungselement ist, umso geringer ist der Einfluss der Betrachtungshöhe.

Die Abbildung 40 stellt den Einfluss einer Geländeneigung auf die Sichtbarkeit von Objekten dar. Die Geländeerhebung stellt in diesem Fall das Verschattungselement

dar. Die Entfernung zwischen dem Betrachter und den WEA beträgt ca. 1.500 m und das Verschattungselement befindet sich ca. 150 m vom Betrachter entfernt.



Abbildung 39: Einfluss der Beobachtungshöhe in der Realität

Die Höhe des Betrachters, also die Beobachtungshöhe wurde in der von mir erstellten Methodik nicht berücksichtigt, da sie in den Untersuchungsgebieten der Uckermark nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Die Berücksichtigung der Betrachtungshöhe bei der Durchführung einer Sichtbarkeitsanalyse wäre jedoch möglich und würde die Anpassung des dafür zuständigen SAGA Moduls erfordern. Durch diese Anpassung wäre es möglich, die Beobachtungshöhe als Eingabeparameter festzulegen und vor Durchführung der eigentlichen Sichtbarkeitsanalyse diesen Wert auf den jeweiligen Zellwert des verwendeten Modells zu addieren. Durch die Festlegung der Betrachtungshöhe als Eingabeparameter, wäre der Wert variabel und könnte bei Bedarf vor jeder Sichtbarkeitsanalyse individuell angepasst werden. Denkbar wäre dadurch auch die Berechnung von Sichtbarkeiten für erhöhte Beobachtungspositionen wie zum Beispiel Häuser, Türme oder Aussichtsplattformen.

6 Praktische Umsetzung der angepassten Methodik

6.1 SAGA Software

Die praktische Umsetzung der im Punkt 5.3 beschriebenen Anpassung der Methodik erfolgte unter der Verwendung der Open Source Software SAGA. Das SAGA Projekt wurde von einer Gruppe von Forschern des Geographischen Instituts Göttingen zur

Jahrtausendwende ins Leben gerufen. Ab dem Jahr 2007 wurde dann die Weiterentwicklung an das Geographische Institut Hamburg verlegt, wo einige der Entwickler beschäftigt sind.

Die SAGA Software ist modular aufgebaut und beruht auf der Programmiersprache C++. Sie besteht aus einer graphischen Nutzerschnittstelle und einem Kern, der bei Bedarf auf externe Module zugreifen kann um diese auszuführen.

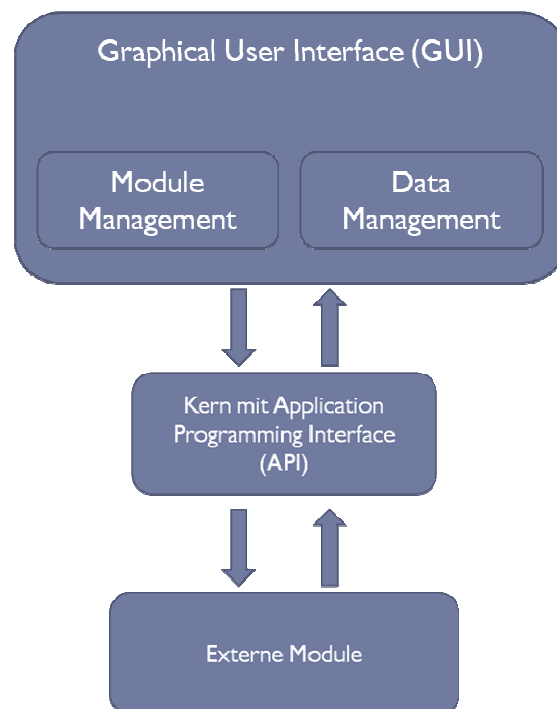


Abbildung 40: Schematische Darstellung des Aufbaus von SAGA

Des Weiteren bietet SAGA dem Nutzer die Möglichkeit die einzelnen Module, unter Angabe der entsprechenden Parameter und der Verwendung der Eingabeaufforderung, auszuführen. Dadurch ist es möglich die Benutzung der Graphischen Oberfläche zu umgehen. Dies gilt jedoch nur für Module die nicht interaktiv sind und daher keine Aktion des Nutzers voraussetzen. Dies ist insbesondere für eine spätere Automatisierung der Sichtbarkeitsanalyse von Bedeutung.

6.2 Die implementierte Funktion der Sichtbarkeitsanalyse

In der von mir benutzten SAGA Version 2.0.8 ist bereits eine Funktion zur Durchführung einer Sichtbarkeitsanalyse implementiert. Diese Funktion gehört zu den interaktiven Modulen, deren Merkmal eine erforderte Aktion des Nutzers ist. Des Weiteren muss ein interaktives Modul vom Nutzer gestartet und vor einer erneuten Benutzung eines anderen Moduls wieder gestoppt werden. Im Fall des Moduls zur Durchführung einer Sichtbarkeitsanalyse wird vom Nutzer eine Aktion in der graphischen Oberfläche verlangt, um den Objektstandort für die Analyse festzulegen. Dieser Vorgang muss für jede Sichtbarkeitsanalyse wiederholt werden.

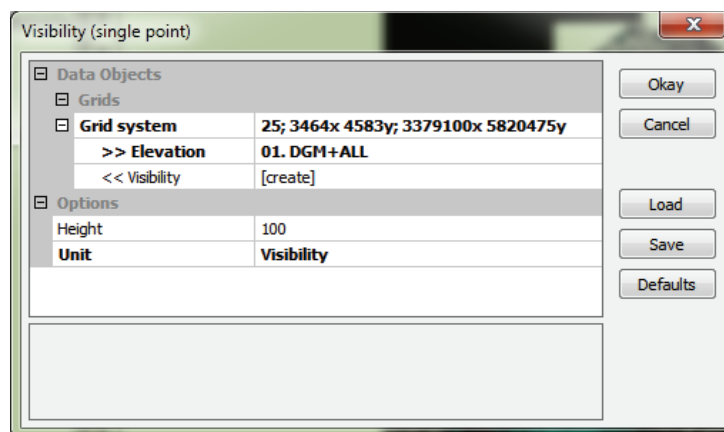


Abbildung 41: Eingabemaske des originalen Moduls zur Sichtbarkeitsanalyse

Beim Aufruf des Moduls kann unter "Options - Unit" siehe Abbildung 43 gewählt werden, welche Berechnungsmethode angewendet werden soll. Mit der in SAGA bereits implementierten Funktion zur Sichtbarkeitsanalyse lassen sich neben der Sichtbarkeit eines Objektes noch drei weitere Werte bestimmen.

Funktion	Beschreibung
Visibility	Analysiert die Sichtbarkeit eines Objektes für jede Rasterzelle
Shade	Analysiert den Winkel zwischen der Sichtlinie zur Gesamthöhe des Objektes und der Senkrechten auf der Rasterzellenoberfläche.
Distance	Analysiert die Entfernung jeder Rasterzelle zum Objekt
Size	Analysiert den Winkel von jeder Rasterzelle zur Gesamthöhe des Objektes

Tabelle 2: Übersicht der Funktionen des originalen Moduls

Die bereits implementierte Funktion ist in ihrer ursprünglichen Form aus mehreren Gründen für die Umsetzung meiner Methodik ungeeignet.

Ein Grund ist die fehlende Option für die Eingabe von Standortkoordinaten des zu betrachtenden Objektes. Mit dieser Option wäre es möglich den Standort einer Anlage mehrmals ohne fehlende Genauigkeit zu betrachten. Jedoch ist die Dateneingabe des Originalmoduls (siehe Abbildung 43) auf die Informationen zum Rasterdatensatz des DGM, dem zu Erstellenden Datensatz und der Objekthöhe begrenzt. Das Modul in seiner originalen Form führt demnach zu Ungenauigkeiten in der Standortbestimmung des betrachteten Objektes.

Zum anderen, ist es mit dem bereits implementierten Modul nur unter sehr großem Aufwand möglich, den in Punkt 5.3.2 beschriebenen Teil der Methodik umzusetzen. Da in der originalen Version des Moduls während der Analyse den Bereichen denen eine Sichtbarkeit zugeordnet wird, der Wert 1 und nicht sichtbaren Bereichen der Wert 0 zugewiesen wird, müsste der Wert 1 nach jeder einzelnen Berechnung manuell durch den entsprechenden Wert für die Gewichtung der betrachteten Höhe ersetzt werden.

Der dritte Grund ist, dass das vorhandene Modul zu Sichtbarkeitsanalyse jeweils nur eine Objekthöhe betrachten kann. Die Analyse müsste vom Nutzer für die in Punkt 5.3.1 dargestellten Betrachtungshöhen manuell durchgeführt werden.

Zusätzlich müsste der Nutzer für jede WEA eine Winkelberechnung durchführen.

Durch die nötigen manuellen Anpassungen der Wertigkeiten, der erneuten Eingabe der Betrachtungshöhen für jede einzelne Berechnung und die manuelle Winkelberechnung ergibt sich ein enormer Zeitaufwand, der mit einer steigenden Anzahl betrachteter WEA unverträglich wird.

6.3 Ziele der Modulprogrammierung

Ziel der Modulprogrammierung war es, ein Modul für SAGA mit folgenden Eigenschaften zu erstellen. Das zu erstellende Modul darf nicht interaktiv sein, somit keine Eingabe des Nutzers innerhalb der graphischen Oberfläche erfordern. Dies ist eine Grundvoraussetzung um das Modul über die Eingabeaufforderung mit der

entsprechenden Parameterübergabe auszuführen und damit eine spätere Automatisierung zu ermöglichen.

Auch muss das Modul die Methodik zur Betrachtung von sechs vordefinierten markanten Punkten einer WEA unterstützen. Dazu ist es notwendig, die Eingabe der für die Berechnung, der markanten und damit für die Betrachtung vorgesehenen Höhen, erforderlichen Ausgangsdaten in der Eingabemaske zu verlangen. Dafür eignen sich die Nabenhöhe und der Rotordurchmesser, da diese Parameter von Herstellern zur Beschreibung ihrer Produkte verwendet werden und damit auch zugänglich sind.

Das Modul muss die Gewichtung der einzelnen Objekthöhen entsprechend der Vorgaben vornehmen. Dazu muss während der Analyse den sichtbaren Bereichen ein Wert zugeordnet werden, der abhängig von der betrachteten Höhe ist.

6.4 Modulprogrammierung

Die Anleitung zum Einstieg in die Modulprogrammierung liefert die Dissertation von O. Conrad, einem Mitglied der Entwicklergruppe von SAGA aus dem Jahr 2006. [Conrad06]

Eine weitere Grundlage, ist die durch das SAGA Projekt bereitgestellte Programmierschnittstelle. [saga12] Für die Erstellung eines neuen, auf meine Methodik angepassten Moduls, wurde Microsoft Visual 2008 benutzt.

Die Dissertation des SAGA Mitbegründers, mit dem Titel "Entwurf, Funktionsumfang und Anwendung eines Systems für Automatisierte Geowissenschaftliche Analysen", beschreibt mit dem Punkt 3.7 "Einführung in die Modulprogrammierung" die ersten Schritte zur Erstellung eines eigenen Moduls. Dabei sind grundlegende Programmierkenntnisse notwendig, jedoch werden keine speziellen Kenntnisse der Programmiersprache C++ vorausgesetzt.

Das Ergebnis meiner Modulprogrammierung stellt ein neues Modul dar. Dabei wurde der Funktionsumfang des originalen Moduls (siehe Tabelle 2) beibehalten und die Eingabemaske (siehe Abbildung 44) um die Eingabe von Rechtswert und Hochwert des Objektstandortes sowie den Anlagenbezogenen Daten der Nabenhöhe und des Rotordurchmessers erweitert.

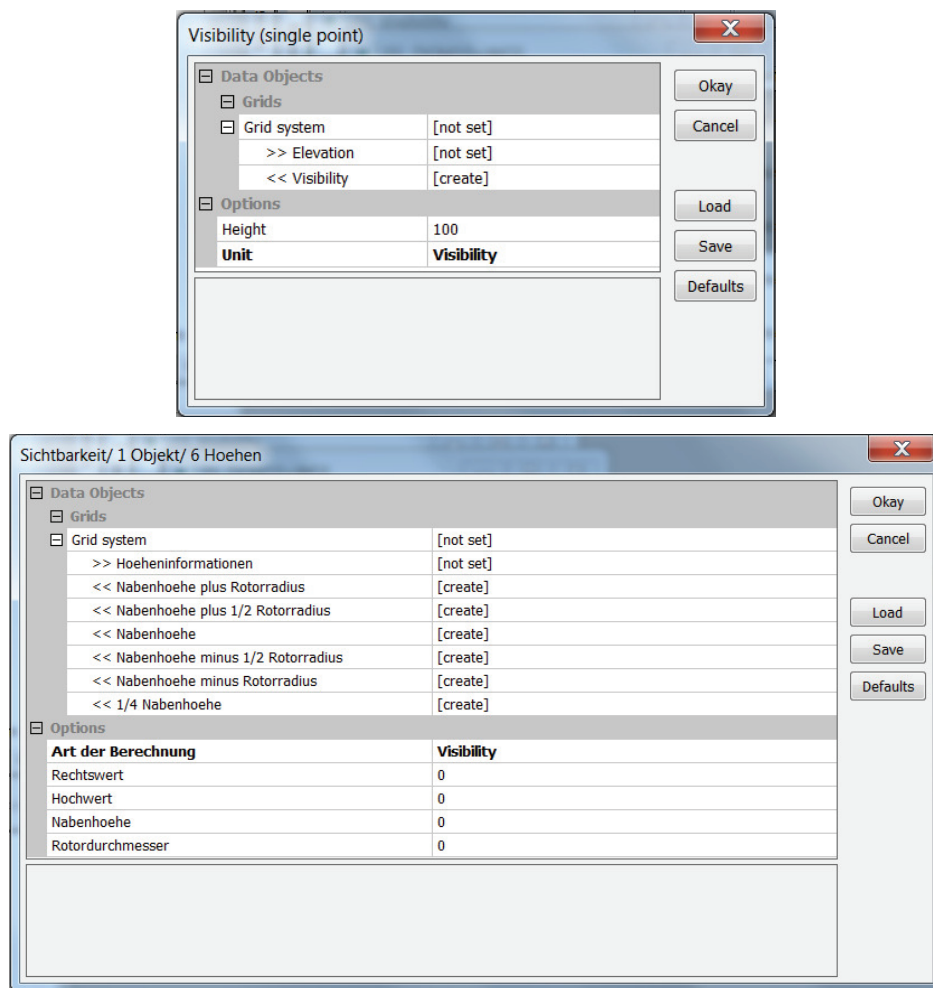


Abbildung 42: Gegenüberstellung der Eingabemasken

Oben: Originalmodul - Unten: Entwickeltes Modul

Durch die Eingabe der Anlagenkoordinaten ist es dem Nutzer nun möglich, ein Objekt anhand der Standortkoordinaten zu analysieren. Das Eingabeformat dieser Koordinaten orientiert sich an dem SAGA Standard, der Universalen Transversalen Mercator Projektion (UTM).

Die Eingabe der Anlagenbezogenen Daten der Nabenhöhe und des Rotordurchmessers sind die Grundlage für die Ermittlung der für die jeweilige WEA zu verwendenden Betrachtungshöhen. Wurde die Modulfunktion "Visibility" gewählt, werden nach der Ausführung des Moduls, ohne weitere Interaktionen mit dem Nutzer, die Sichtbarkeitsanalysen für die Betrachtungshöhen durchgeführt und jedes

Ergebnis in einem eigenen Rasterdatensatz abgelegt. Die Vergabe der Wertigkeiten erfolgt dabei Modulintern.

Die weiteren Modulfunktionen (siehe Tabelle 2) wurden unverändert übernommen.

6.5 Rechenzeit und Speicherbedarf

6.5.1 Die benötigte Rechenzeit

Die Rechenzeit hängt im Wesentlichen von vier Faktoren ab. Die Größe der zu betrachtenden Fläche und das als Grundlage verwendete DGM, bestimmen die Anzahl der Maschen. Da die Maschen bei der Sichtbarkeitsanalyse einzeln und nacheinander in Verbindung mit den Objektparametern betrachtet werden, hängt die Rechenzeit direkt von der Maschenanzahl ab. Eine Halbierung der Maschenweite bewirkt eine Vervierfachung der Maschenanzahl.

Fläche	Anzahl Maschen DGM25	Anzahl Maschen DGM10	Anzahl Maschen DGM5
1 km ²	1.600	10.000	40.000
250 km ²	400.000	2.500.000	10.000.000
600 km ²	960.000	6.000.000	24.000.000

Tabelle 3: Übersicht zur Entwicklung der Rasterzellenanzahl

Da für jede WEA das gesamte Raster zeilenweise durchlaufen wird, ist der dritte Faktor zur Beeinflussung der Rechenzeit, die Anzahl der zu betrachtenden WEA.

Unabhängig von der Größe der Fläche, des verwendeten DGM und der Anlagenzahl werden die Teilberechnungen, welche im Anschluss zum Endergebnis zusammengefügt werden, durch einen Computer durchgeführt. Zwangsläufig beeinflusst dabei die Rechenleistung des Systems die zur Analyse notwendige Zeit.

6.5.2 Der Speicherbedarf

Das Ergebnis jeder Sichtbarkeitsanalyse ist ein Rasterdatensatz mit der Maschenanzahl, welche der des Ausgangsrasters, also dem DOM entspricht. Dieser

Rasterdatensatz wird nach der Analyse in einer Datei abgespeichert. Nach der von mir entwickelten Methodik entstehen dementsprechend je betrachteter WEA sechs Ergebnisdateien in denen die Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalyse enthalten sind. Zusätzlich wird für jede betrachtete WEA eine weitere Datei im Zuge der Winkelberechnung erzeugt. Auch dieses Zwischenergebnis liegt im Rasterformat vor und orientiert sich an der Maschenweite des verwendeten DOM.

Für jede betrachtete WEA werden demzufolge insgesamt sieben Ergebnisdateien im Rasterformat angelegt. Nach der Betrachtung von mehr als einer WEA, müssen die Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalyse sowie die Ergebnisse der Winkelberechnung summiert werden. Dies ist ein notwendiger Zwischenschritt vor der Berechnung des Endergebnisses und erhöht die Anzahl der Dateien um den Wert 2. In der folgenden Tabelle werden die Anzahl der Dateien in Abhängigkeit der betrachteten Anzahl von WEA und dadurch benötigte Speicherplatz dargestellt. Grundlage für die Berechnung des benötigten Speicherbedarfs ist ein betrachtetes Gebiet mit einer Fläche von 225 km² und einem verwendeten DGM mit einer Maschenweite von 10 m.

Anzahl WEA	Anzahl Dateien Sichtbarkeit	Anzahl Dateien Winkelberechnung	Anzahl Dateien gesamt	Benötigter Speicherplatz
1	6	1	7	Ca. 60,1 MByte
5	30	5	37	Ca. 317,6 MByte
100	600	100	702	Ca. 5,9 GByte

Tabelle 4: Übersicht Anzahl der zu verwaltenden Dateien

Für jede Rasterzelle werden 4 Byte Speicherplatz verwendet. Wird demnach ein Gebiet von 15 x 15 km betrachtet und dafür ein DGM mit der Maschenweite von 10 m betrachtet, so ergeben sich folgende Daten.

Eine Kantenlänge von 15 km ergibt eine Fläche von 225 km². Da für die Abbildung eines Quadratkilometers 10.000 Rasterzellen nötig sind, beträgt die Gesamtanzahl der Rasterzellen 2.250.000.

Aus der Anzahl der Rasterzellen und einem Speicherbedarf von 4 Byte pro Zelle ergibt sich ein gesamter Speicherbedarf von 9.000.000 Byte, was ca. 8.789 kByte oder ca. 8,58 MByte entspricht.

Dieser Speicherplatz wird für jedes Analyseergebnis benötigt. Im Fall der Betrachtung einer WEA werden 6 Rasterdatensätze für die Sichtbarkeit der jeweiligen Betrachtungshöhen und 1 Rasterdatensatz für das Ergebnis der Winkelberechnung angelegt. Der benötigte Speicherplatz erhöht sich für das Beispiel demzufolge um den Faktor 7 auf ca. 60,08 MByte.

Sind nun auf dieser Beispielfläche von 225 km² 150 WEA errichtet, ergibt sich ein gesamter Speicherbedarf von ca. 8,8 GByte.

7 Ergebnisse

Um die Ergebnisse anschaulich darzustellen, wurde die entwickelte Methodik jeweils für die Ermittlung der visuellen Wahrnehmung einer einzelnen WEA, eines kleinen WEG und einer Vielzahl von WEA in einem bestimmten Gebiet angewendet. Für die Berechnungen wurde ein DGM mit einer Maschenweite von 10 m verwendet, welches durch die Verwendung von Flächendaten zu Wäldern, Gehölzen und Siedlungen zu einem DOM erweitert wurde.

Eine weitere Datengrundlage für Berechnungen stellt eine Datenbank dar, die von der RPG Uckermark Barnim verwaltet wird. Darin befindet sich eine Vielzahl von Informationen zu den einzelnen WEA, wie zum Beispiel der Anlagentyp, die Leistung, die Standortkoordinaten sowie Nabenhöhe und Rotordurchmesser.

Aus dieser Datenbank wurden die vier für die Analyse notwendigen Daten einer WEA (Position, Nabenhöhe und Rotordurchmesser) entnommen. Die Betrachtungsergebnisse werden jeweils mit einer einheitlichen Farbskala dargestellt.

7.1 Betrachtung einer Einzelanlage

Die betrachtete Einzelanlage vom Typ Enercon E-66/15.6 befindet sich in der nördlichen Uckermark (Brandenburg) in einem Gewerbegebiet im Norden der Stadt Prenzlau, bei den UTM Koordinaten 33U 424920 und 5911428.

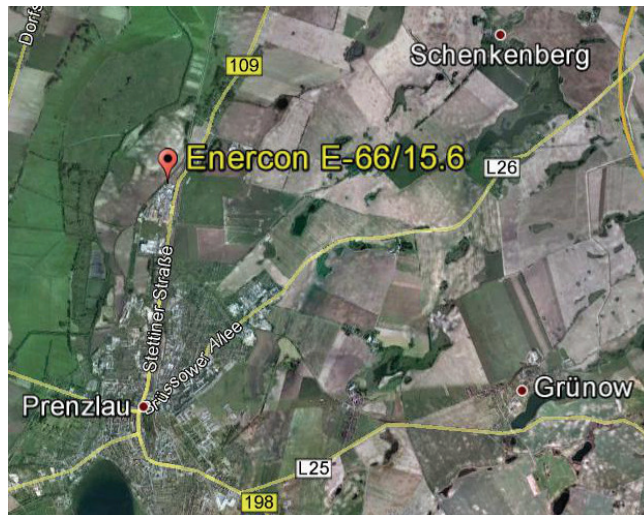


Abbildung 43: Standort Einzelanlage [GE12]

Anlagentyp	Enercon E-66/15.6
Nabenhöhe	98 m
Rotordurchmesser	66 m

Tabelle 5: Anlagendaten Enercon E-66/15.6

Das Ziel der Betrachtung einer Einzelanlage, ist die übersichtliche Darstellung und Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse. Dadurch können die Ergebnisse der Betrachtung einer WEA, ohne den Einfluss der Überlagerung, mit den Betrachtungsergebnissen anderer WEA dargestellt werden. Es wurde dazu ein Gebiet mit einer Kantenlänge von jeweils 2 km betrachtet.

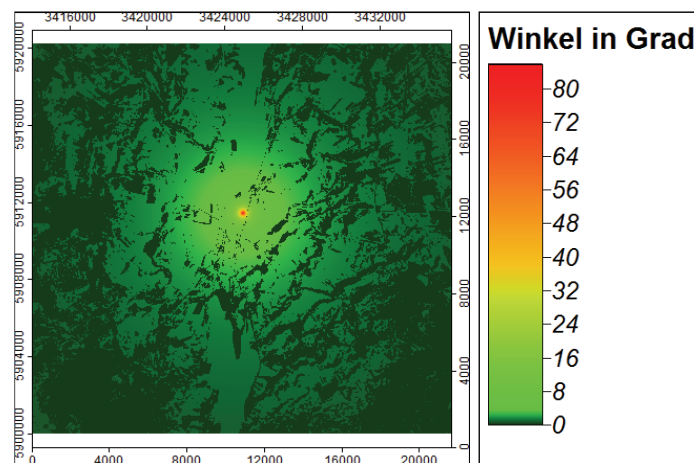


Abbildung 44: Ergebnis der Winkelberechnung einer einzelnen WEA

Die Abbildung 46 stellt das Ergebnis der Winkelberechnung für die Betrachtung einer Einzelanlage dar. Der maximale Winkelwert ergibt sich durch die in Punkt 5.3.3 erläuterten Methodik. Die Gegenkathete entspricht hier der Gesamthöhe der Anlage von 131 m. Die Länge der Ankathete wird bestimmt durch die Maschenweite des verwendeten DGM. Am Beispiel des hier verwendeten DGM mit einer Maschenweite von 10 m, sind für die Länge der Ankathete nur Vielfache der Zahl 10 möglich. Der sich daraus ergebende maximale Winkel liegt in einer Entfernung von 10 m zur WEA an und beträgt 85,63 Grad. Mit zunehmender Entfernung zum betrachteten Objekt nähert sich dieser Wert 0. Gleichzeitig wird den Rasterzellen von verschatteten Bereichen bereits mit der Wert 0 zugewiesen.

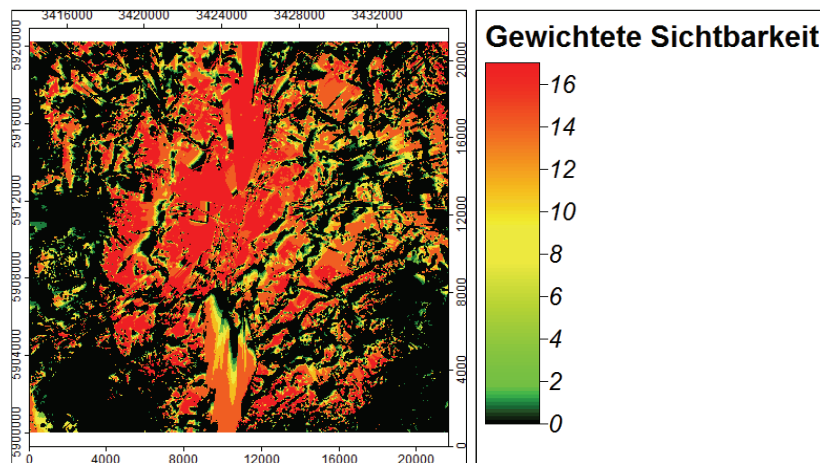


Abbildung 45: Gewichtete Sichtbarkeit von sechs Betrachtungshöhen einer WEA

Nach der in Punkt 5.3.2 beschriebenen Gewichtung der Betrachtungshöhen und die Bildung der Summe der Einzelergebnisse, liegt der Wertebereich für die Sichtbarkeit einer Einzelanlage zwischen 0 und 17. Der maximale Wert wird Zellen zugewiesen für die eine Sichtbarkeit aller Betrachtungshöhen ermittelt wurde und ist unabhängig von der Entfernung.

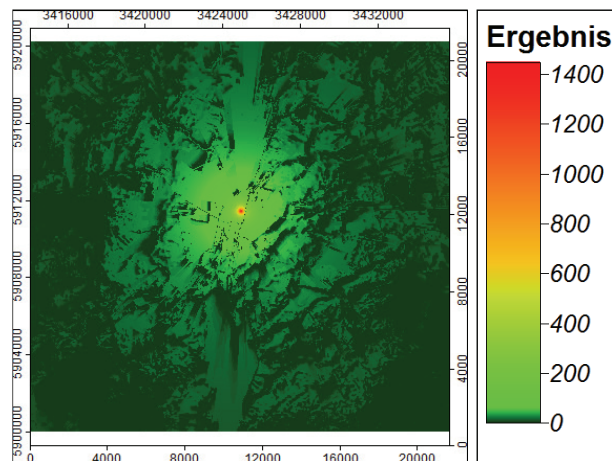


Abbildung 46: Ergebnis

Die Kombination der Betrachtungswinkel und der Sichtbarkeit liefert einen Ergebnisdatsatz, mit einem Maximalwert von 1455,71. Dieser Wert wird zwangsläufig in einer Entfernung von 10 m zur Anlage erreicht.

7.2 Betrachtung einer begrenzten Anlagenzahl

Der nächste Schritt ist die Betrachtung des kleinen WEG Lichterfelde ca. 6 km nördlich von Eberswalde (Barnim, Brandenburg) bei den Koordinaten 33U417196 und 5859049.



Abbildung 47: Lage WEG Lichterfelde [GE12]

Das WEG Lichterfelde besteht aus sechs WEA, welche sich durch den Typ sowie die Anlagenparameter unterscheiden.

Anlagentyp	Nabenhöhe	Rotordurchmesser
REpower MD70	85 m	70 m
Südwind S-77	85 m	77 m
Vestas V80	100 m	
REpower MD77	85 m	77 m
NEG Micon NM 52/900	74 m	52 m
Fuhrländer FL 1000	70 m	54 m

Tabelle 6: Anlagendaten WEG Lichterfelde

Das Ziel der Betrachtung eines kleinen WEG mit einer geringen Anzahl von WEA ist das Darstellen von Überlagerungen der berechneten Winkel sowie die Auswirkungen der Sichtbarkeit mehrerer Anlagen. Betrachtet wurde aus dem Grund der Übersichtlichkeit lediglich ein Gebiet mit einer Kantenlänge von ca. 4.5 km.

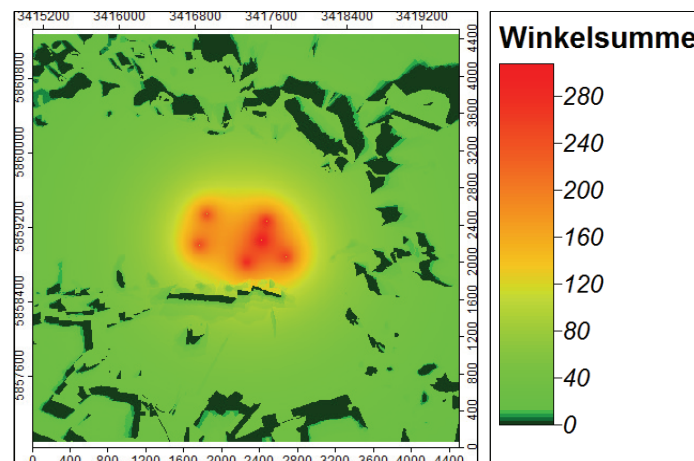


Abbildung 48: Summe der Winkel zu den Gesamthöhen der WEA im WEG Lichterfelde

In der Abbildung 50 wird neben den sechs Standorten der betrachteten WEA auch der gegenseitigen Einfluss der Anlagen deutlich. Die Winkelwerte überlagern sich in den Bereichen zwischen den WEA und führen dadurch zu massiv erhöhten Werten. Der Maximalwert der Winkelsumme beträgt 307 Grad. Mit zunehmender Entfernung zu den Anlagen nehmen die Winkelwerte wie erwartet stark ab, da die einzelnen Werte, aus welchen die Summen gebildet werden, selbst sehr gering sind.

Da eine einheitliche Farbskala verwendet wurde, treten die Werte im Außenbereich der Abbildung 50 nicht so deutlich in Erscheinung wie bei der Betrachtung der Einzelanlage. Der Grund dafür ist die Überlagerung der Werte im Zentrum des WEG und die damit verbundene Werteverteilung.

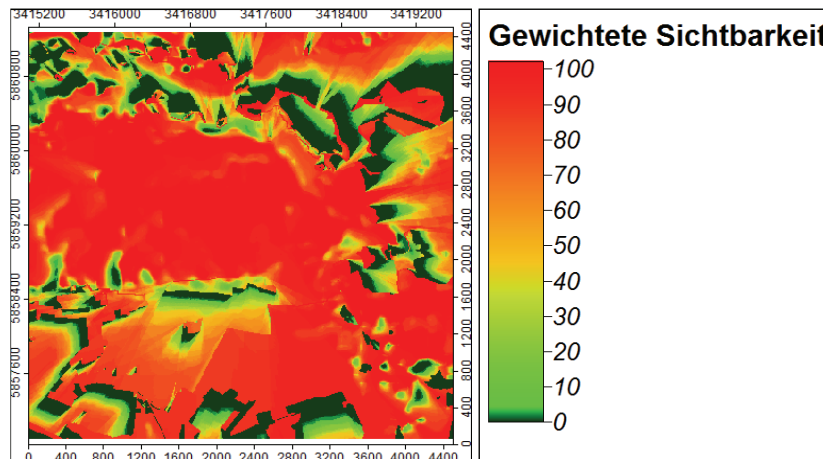


Abbildung 49: Gewichtete Sichtbarkeit der WEA im WEG Lichterfelde

Die Abbildung 51 macht die hohe Sichtbarkeit der betrachteten WEA deutlich. Der Maximalwert der gewichteten Sichtbarkeit beträgt für sechs WEA 102. Für einen Großteil der betrachteten Fläche werden Werte von über 80 erreicht. Die Ursache dafür liegt in der exponierten Lage der WEA auf einer Geländeerhöhung und der mangelnden modellierbaren Vegetation in diesem Bereich.

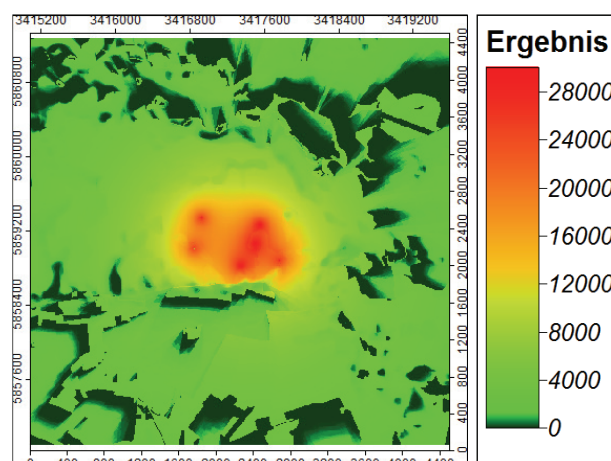


Abbildung 50: Ergebniswerte der WEA im WEG Lichterfelde

Nach der Verbindung der Winkelsummen und der gewichteten Sichtbarkeit ergeben sich maximale Ergebniswerte von bis zu 30.000 im Zentrum des WEG. Diese Werte

fallen mit zunehmender Entfernung zum Bereich der Maximalwerte stark ab. Die Werteverteilung, in Verbindung mit der Verwendung einer einheitlichen Farbskala, verhindert auch hier die deutliche Darstellung der Werteänderungen in den Außenbereichen der Abbildung.

7.3 Vielzahl von Windenergieanlagen

Da die Methodik unten Umständen auch auf große bzw. mehrere WEG angewendet werden muss, wird an dieser Stelle eine Betrachtung einer Vielzahl von WEG durchgeführt.

Dazu wurde eine Fläche von ca. 700 km² im Norden der Uckermark (Brandenburg), etwa 100 km nordnordöstlich von Berlin gelegen, untersucht.

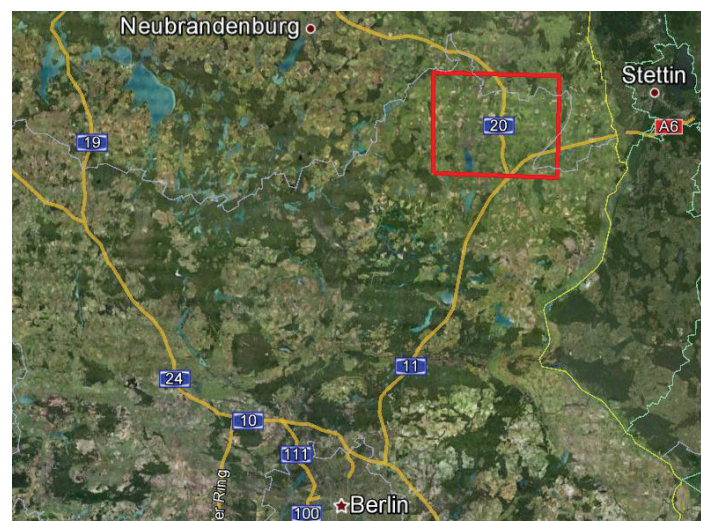


Abbildung 51: Lage des betrachteten Gebietes [GE12]

Der Grund dafür waren neben 230 installierten WEA, aufgeteilt in 6 WEG, auch die für die Region typische, leicht hügelige Landschaft und die nur spärlich vorhandenen modellierbaren Verschattungselemente in Form von Vegetation.

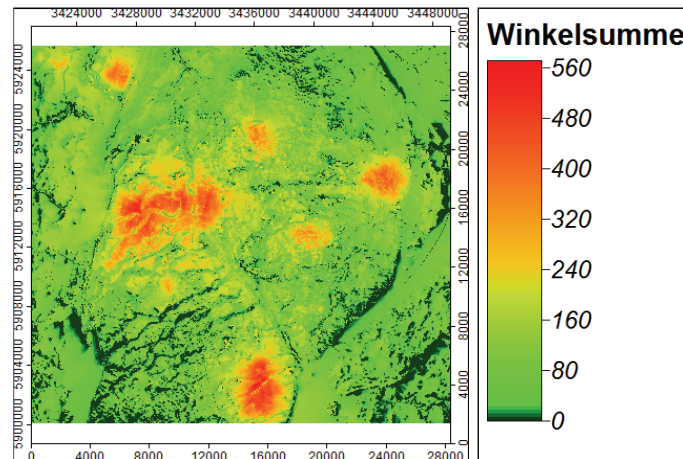


Abbildung 52: Summe der Winkel zu den Gesamthöhen der WEA im betrachteten Gebiet

Neben der Objekthöhe hat die Anzahl der betrachteten Objekte einen entscheidenden Einfluss auf die Summe der Winkel zu den betrachteten WEA, welche dann in den einzelnen Rasterzellen zugewiesen wird.

Durch die gegenseitige Beeinflussung durch benachbarte WEA, zeigt sich in der Abbildung 54 deutlich die Konzentration der WEA in den jeweiligen Eignungsgebieten. Der Wert der Winkelsumme gibt dabei einen ersten Überblick über die Anzahl der Anlagen in den Eignungsgebieten. Das flächenmäßig größte Eignungsgebiet Schenkenberg befindet sich mit seinem Zentrum etwa bei den Koordinaten 33U 430000 und 5915000 und umfasst 79 WEA. Im Vergleich dazu wurden im WEG Wallmow, mit seinem Mittelpunkt bei den Koordinaten 33U 440000 und 5912000 14 WEA installiert.

Aus der Ansicht des Ergebnislayers der Winkelsummen kann demnach eine Einschätzung über die Anzahl der Anlagen bzw. deren Höhe abgeleitet werden.

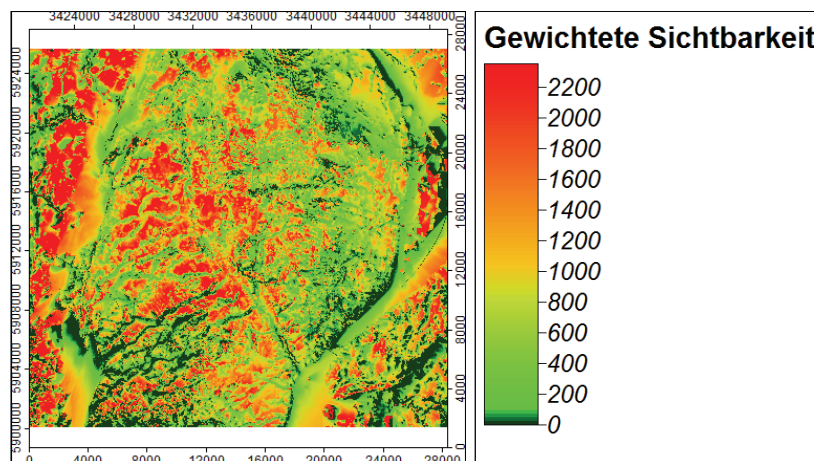


Abbildung 53: Gewichtete Sichtbarkeit aller betrachteter WEA

Die betrachtete Anlagenzahl von 230 WEA und der Maximalwert der gewichteten Sichtbarkeit einer Einzelanlage von 17 führt zu einem theoretischen Maximalwert der gesamten gewichteten Sichtbarkeit von 3910. Tatsächlich beträgt der Maximalwert jedoch 2378 und wird am westlichen Rand des Betrachtungsgebietes erreicht. Der Grund dafür ist eine Geländeerhebung, welche sich in Nord-Süd Richtung erstreckt. Im Bereich dieser Geländeerhebung sind jedoch keine WEA installiert. Die Ergebniswerte der gewichteten Sichtbarkeit werden hier also nur durch die hohe Sichtbarkeit entfernter WEA aufgrund des erhöhten Geländes hervorgerufen.

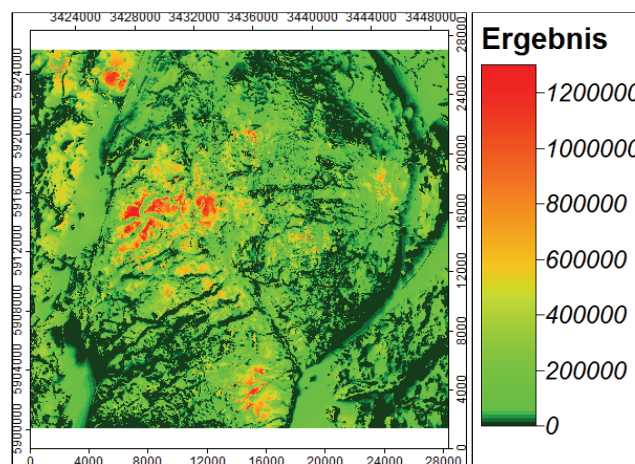


Abbildung 54: Darstellung der Ergebniswerte für das betrachtete Gebiet mit 230 WEA

Die Abbildung 56 macht deutlich, dass durch den Einfluss der Entfernung in Form der Winkelsumme die Werte der gewichteten Sichtbarkeit im Bereich der Geländeerhebung deutlich abgeschwächt werden. Im Bereich dieser Erhebung sind zwar viele Anlagen sichtbar aber durch die Entfernung zu den sichtbaren Anlagen reduzieren sich die Ergebniswerte auf einen Bereich zwischen 500.000 und 550.000. Werte in diesem Bereich finden sich auch in der Nähe der Ortschaften, welche direkt im Eignungsgebiet Schenkenberg liegen oder daran angrenzen.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Entfernung zu den WEA, welche einen Einfluss auf die jeweilige Rasterzelle ausüben, deutlich höher, aber die Anzahl der sichtbaren Betrachtungshöhen der WEA geringer ist. In der folgenden Tabelle werden zwei Rasterzellen und deren Einzelergebnisse sowie das Endergebnis gegenübergestellt.

	Rasterzelle im Bereich der Geländeerhebung	Rasterzelle in der Nähe der Ortschaft Schenkenberg
Winkelsumme in Grad	148,74	285,06
Gewichtete Sichtbarkeit	3340	1651
Ergebniswert	469.791,60	470.634,06

Tabelle 7: Gegenüberstellung zweier Ergebniswerte und deren Entstehung

Die Maximalwerte werden in den Bereichen zwischen den WEA erreicht, da hier der Einfluss der Entfernung zu den betrachteten WEA und die Werte der gewichteten Sichtbarkeit sehr hoch sind.

8 Die Grenzen der Modellierung

Damit eine Sichtbarkeitsanalyse durchgeführt werden kann, bedarf es immer einer Modellierung der Realität. Diese Modellierung kann jedoch nicht alle Einflüsse auf die Sichtbarkeit und damit auf die Wahrnehmung eines Objektes abbilden. Die Einflüsse auf die Sichtbarkeit eines Objektes können in vier Bereiche unterteilt werden, die Witterungseinflüsse, die Vegetationseinflüsse, sonstige Einflüsse der WEA und besondere geometrische Konstellationen.

8.1 Die Witterungseinflüsse

Zu den Witterungseinflüssen, welche die Sichtbarkeit und damit die Wahrnehmung einer WEA beeinflussen, zählen die Sichtweite, die Windrichtung, die Windstärke und der Wolkenhöhe.

Um den Einfluss der Witterungseinflüsse anschaulich darzustellen, wurden WEA in verschiedenen WEG betrachtet. Dabei wurden die Aufnahmen bei unterschiedlichen Bedingungen angefertigt, um deren Wirkung anschaulich wiederzugeben. Es wurde darauf geachtet, dass die WEA jeweils vom gleichen Standpunkt aus aufgenommen werden um perspektivische Verzerrungen zu vermeiden.

8.1.1 Die Sichtweite

Die Sichtweite beeinflusst in hohem Maße die Sichtbarkeit eines Objektes. Die modellhaften Berechnungen berücksichtigen die Sichtweite jedoch nicht. Dadurch fließt die Sichtweite nicht in die Berechnungen ein und wird als ideal angenommen. Dabei unterliegt gerade die Sichtweite großen Schwankungen. Die Schwankungen können durch eine ganze Reihe von Einflüssen, wie zum Beispiel Nebel, Regen, Dunst oder auch Smog hervorgerufen werden. Die folgende Abbildung stellt den Vergleich zwischen einer großen Sichtweite, also einer guten Sicht und einer geringen Sichtweite, also schlechter Sicht dar.

Dazu wurden WEA von einem Standpunkt aus einer Entfernung von 4.500 m bei unterschiedlichen Sichtweiten fotografiert und diese Aufnahmen in der Abbildung 57 gegenübergestellt.



Abbildung 55: Vergleich große Sichtweite und geringe Sichtweite

Durch eine geringere Sichtweite kommt es zu einer verringerten Sichtbarkeit und damit zwangsläufig zu einer verminderten Wahrnehmung des betrachteten Objektes. Es wäre natürlich denkbar, die Sichtweite bei der Sichtbarkeitsanalyse mit Hilfe einer Anpassung der Gewichtung der Betrachtungshöhen zu berücksichtigen. Dafür könnte die Summe der gewichteten Sichtbarkeiten, durch die Verwendung eines entfernungsabhängigen Faktors, verändert werden. Jedoch wäre das Ergebnis einer Analyse nur für diesen betrachteten Fall der Sichtweite gültig. Die naturgemäß starken Schwankungen der Sichtweite machen eine allgemeingültige Analyse unmöglich.

8.1.2 Die Windrichtung

Die Windrichtung bestimmt die Ausrichtung der WEA und damit die Sichtbarkeit. Befindet sich der Betrachter auf einer Linie mit der WEA und der Windrichtung, so ist für ihn eine größere Fläche des Rotors einer WEA sichtbar. Vergrößert sich der Winkel zwischen Betrachter, WEA und Windrichtung, so verringert sich die für den Betrachter sichtbare Fläche der WEA.

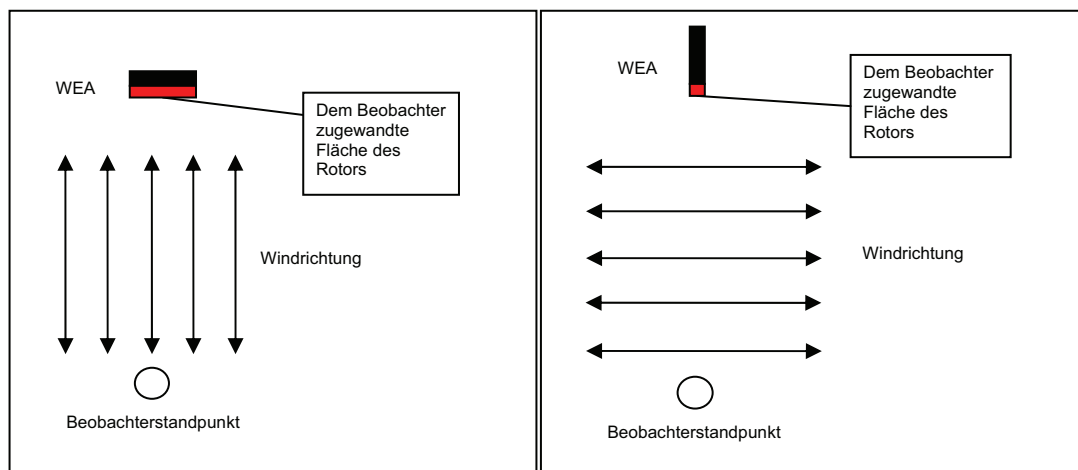


Abbildung 56: Schematische Darstellung des Einflusses der Windrichtung auf die Sichtbarkeit

Für eine Darstellung der Auswirkungen der Windrichtung wurden WEA von einem Standpunkt in einer Entfernung von ca. 1.500 m fotografiert und in der Abbildung 59 gegenübergestellt.



Abbildung 57: Vergleich der Ansicht bei unterschiedlichen Windrichtungen

Dabei ist die Veränderung der sichtbaren Fläche deutlich sichtbar. Desweiteren wird die Drehbewegung des Rotors bei einem Winkel von 90 Grad zwischen der

Windrichtung und der Sichtachse des Betrachters zur WEA weniger stark wahrgenommen. Diese Einflüsse der Windrichtung lassen sich mit Hilfe einer veränderten Wertigkeit der Betrachtungshöhen in die Analyse übernehmen. Jedoch unterliegt die Windrichtung wie auch die Sichtweite Schwankungen. Eine Analyse für eine Windrichtung wäre Situationsbezogen und würde keine allgemeingültigen Ergebnisse liefern.

8.1.3 Die Windstärke

Die Windstärke beeinflusst die Rotorgeschwindigkeit einer in Betrieb befindlichen WEA. Die Rotorgeschwindigkeit wird dabei durch die Konfiguration der WEA begrenzt und richtet sich nach dem Rotordurchmesser. Moderne WEA besitzen Rotoren mit einem Durchmesser von deutlich über 100 Meter.

Im Vergleich zu einer WEA mit stehendem Rotor, wird eine WEA mit bewegtem Rotor deutlich stärker wahrgenommen. Dabei steigt die Wahrnehmung mit der Rotorgeschwindigkeit. Die Rotorgeschwindigkeit wird in Umdrehungen pro Minute angegeben und durch die maximale Geschwindigkeit der Rotorspitzen begrenzt.

Diese liegt für Anlagen des Herstellers Enercon bei 77 m/s. [TG12] Der Rotorradius (r) als gegebene Größe beeinflusst den Umfang (U) des durch die Rotorspitzen und die Bewegung des Rotors gebildeten Kreises. Der Umfang lässt sich mit der Formel:

$$U = 2\pi r$$

berechnen. Die maximale Rotorspitzenengeschwindigkeit $V_{maxRotorspitze}$ von 77m/s bestimmt danach, die Zeit (t_{Umlauf}) welche für eine komplette Drehung des Rotors notwendig ist. Diese Umlaufzeit berechnet sich durch:

$$t_{Umlauf} = \frac{2\pi r}{V_{maxRotorspitze}}$$

Da die Rotorbewegung von WEA allgemein in U/min angegeben wird, ist es notwendig die Umlaufzeit einer Rotordrehung mit der Dauer einer Minute ins Verhältnis zu setzen. Das Ergebnis ist die maximale Anzahl der Rotordrehungen pro Minute (*Anzahl U/min*).

$$\text{Anzahl } U/\text{min} = \frac{60}{t_{\text{Umlauf}}}$$

Da die Rotorspitzen­geschwindigkeit begrenzt ist, verbleibt als variable Größe die Länge des Rotor­blattes. Daraus folgt, dass Anlagen mit größeren Blatt­längen eine geringe maximale Umdrehungs­zahl erreichen dürfen, bevor die Anlagen abgebremst werden. Folglich drehen sich die Rotoren von WEA mit geringeren Blatt­längen schneller und werden dadurch stärker vom Betrachter wahrgenommen.

Anlagentyp	Rotordurchmesser in m	Max. Anzahl U/min
E-48 / 800 kW	48	31
E-70 / 2.300 kW	71	21
E-92 / 2.350 kW	92	16
E-126 / 7.580 kW	127	12

Tabelle 8: Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Rotordurchmesser und der maximalen Drehzahl

8.1.4 Verschattung von Teilen einer Windenergieanlage

WEA werden in der ganzen Welt in den unterschiedlichsten Gebieten errichtet. Die höchstgelegene WEA der Welt wurde zum Beispiel auf einer Höhe von 4.100 m in den argentinischen Anden errichtet, und auch die vom Alfred Wegner Institut betriebene Antarktis Station Neumayer III betreibt als Teil der Energieversorgung einen WEA Prototyp der Firma ENERCON. Die Grundhöhe der WEA kann dafür verantwortlich sein, dass diese durch Witterungseinflüsse teilweise verschattet wird. Damit Teile einer WEA verdeckt werden, bedarf es aber nicht unbedingt einer großen Höhe über dem Meeresspiegel. Die Ursache dafür können ebenso tief hängende Wolkenformationen oder Nebelschichten sein. Das folgende Bild wurde in der nördlichen Uckermark aufgenommen und zeigt eine teilweise Verschattung des Rotors.



Abbildung 58: Darstellung einer teilweisen Verschattung einer WEA

Eine derartige teilweise Verschattung einer WEA ist jedoch oft nur von kurzer Dauer und tritt äußerst selten auf. Natürlich wäre auch hier eine Berücksichtigung durch eine veränderte Wertigkeit der Betrachtungshöhen möglich. Durch das seltene Auftreten und die Kürze der Dauer dieser teilweisen Verschattung, ist eine Modellierung jedoch nicht sinnvoll.

8.2 Weitere Vegetationseinflüsse

Neben der ganzjährig relevanten Vegetation, wie zum Beispiel Wälder oder Gehölzflächen, welche durch die Anordnung der Einzelformen unabhängig von jahreszeitlichen Einflüssen eine Verschattung hervorrufen, können auch weitere Vegetationseinflüsse die Sichtbarkeit von WEA beeinträchtigen.

Zu den weiteren Vegetationseinflüssen zählt zum Beispiel die Belaubung von Bäumen oder auch die Vegetation auf Feldern und Äckern. Diese Einflüsse variieren je nach Vegetationsform und Jahreszeit.

Handelt es sich bei dem Vegetationseinfluss um die Belaubung von einzelnen Bäumen und Sträuchern, so kann ein solcher Einfluss auf die Sichtbarkeit mit dieser Methodik nicht modelliert werden.



Abbildung 59: Darstellung eines nicht flächenhaften Vegetationseinflusses

Sollte es sich bei der Vegetation dagegen um eine flächenhafte Ausdehnung handeln, so ist es möglich diese Fläche mit einer einheitlichen Höhe bei der Erstellung der Datengrundlage zu berücksichtigen. Als flächenhaft kann unter anderem die Vegetation auf Feldern und Äckern bezeichnet werden. In der Abbildung 62 ist ein Kornfeld für die zusätzliche Verschattung verantwortlich.



Abbildung 60: Darstellung eines flächenhaften Vegetationseinflusses

Die Abbildung einer flächenhaften Vegetation erfordert eine weitere Recherche im Vorfeld von Berechnungen. Die Berechnungen müssten dann auf die jeweilige Vegetation angepasst werden und die Ergebnisse wären nur für den jeweiligen Stand der Vegetation gültig.

8.3 Sonstige Einflüsse einer Windenergieanlage

8.3.1 Farbgebung

Sonstige Einflüsse einer WEA, die einen Einfluss auf die Wahrnehmung haben, sind die Farben der WEA und deren Markierungen. Im Bereich der Farbgebung können sich die Hersteller von WEA innerhalb der gesetzlich vorgegebenen Grenzen zur Farbgebung frei entfalten. Dadurch kann jeder Hersteller die Vorgaben in seinem Sinne interpretieren und es kommt bei der Verwendung von verschiedenen Anlagentypen zu einem Mix von unterschiedlichen Anlagenfarben. Die Firma ENERCON, als Vorreiter auf dem Gebiet der Farbgebung für WEA, hat eine Grüntonabstufung für den Fuß von WEA entwickelt. Dabei werden zwei Grundfarben (Natural Color System (NCS) Farbe S 5040G50Y und RAL 9018) in unterschiedlichen Verhältnissen gemischt.


EC-E	20% NCS S 5040G50Y 80% RAL 9018	
EC-D	40% NCS S 5040G50Y 60% RAL 9018	
EC-C	60% NCS S 5040G50Y 40% RAL 9018	
EC-B	80% NCS S 5040G50Y 20% RAL 9018	
EC-A	100% NCS S 5040G50Y	

Abbildung 61: Gegenüberstellung der Farbgebung von WEA laut technischer Beschreibung [ENERCON12] und der Realität

Oberhalb dieser Grüntonabstufung werden die Anlagen mit der Farbe RAL 7038 beschichtet. Diese Farbe wird allgemein als dunkler wahrgenommen und die WEA bei einer größeren Entfernung zwischen Betrachter und WEA weniger stark wahrgenommen.

Aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Farbtöne für WEA ergibt sich bei der Betrachtung von mehreren WEA unterschiedlicher Hersteller auch eine unterschiedliche Wahrnehmung.



Abbildung 62: Unterschiedliche Wahrnehmung von WEA aufgrund der Farbgebung

8.3.2 Markierungen an Windenergieanlagen

WEA mit einer Bauhöhe von mehr als 100 m über Grund bedürfen, gemäß § 14 Luftverkehrsgesetz (LuftVG), der luftrechtlichen Zustimmung durch die Luftfahrtbehörde. Dabei werden Art und Umfang der Tag- und Nachtkennzeichnung im Rahmen des Genehmigungsverfahrens von der Luftfahrtbehörde festgelegt. [gii12]

Grundsätzlich sind aber WEA mit einer Gesamthöhe von mehr als 100 m über Grund mit Markierungen gekennzeichnet. Dabei sind die Rotorblätter von außen beginnend mit einem 6 m breitem, orangem Farbfeld und in einem Abstand von 6 m ein weiteres 6 m breites Farbfeld, ebenfalls in Orange, zu kennzeichnen. Befindet sich das Nabengehäuse einer WEA in einer Höhe von mehr als 150 m, wird zusätzlich eine Kennzeichnung des Gehäuses mit einem mindestens 2 m breitem orangen Streifen sowie die Anbringung eines 3 m hohen orangenen Farbrings, beginnend in einer Höhe von 40 ± 5 m über Grund, gefordert.

Die Gegenüberstellung zweier Aufnahmen von zur Veranschaulichung der unterschiedlichen visuellen Wirkung von WEA, mit und ohne Markierungen, ist durch die Höhendifferenz dieser Anlagen nicht tragbar. Die visuelle Wirkung würde bei gleicher Entfernung durch die unterschiedliche Gesamthöhe beeinflusst. Daher wird in der folgenden Abbildung die Aufnahme einer WEA ohne Markierungen, also mit einer Gesamthöhe von unter 100 m verwendet und einer bearbeiteten Kopie gegenübergestellt.



Abbildung 63: Darstellung der Wirkung von Markierungen an WEA

Damit diesem Umstand Rechnung getragen werden kann, wäre es denkbar, in einer Weiterentwicklung der Methodik die Gewichtung für WEA, mit einer Gesamthöhe von mehr als 100 m über Grund, entsprechend der erhöhten Sichtbarkeit anzupassen.

8.4 Besondere geometrische Konstellationen

Durch eine Sichtbarkeitsanalyse und deren Charakteristik einer Punkt zu Punkt Betrachtung, wird kein Zusammenhang zwischen den einzelnen Anlagen hergestellt. Jede Anlage wird einzeln betrachtet und die einzelnen Ergebnisse im Anschluss zu einem Endergebnis zusammengestellt.

Dadurch kann es zu besonderen geometrischen Konstellationen kommen. Diese liegt vor, wenn sich auf einer Sichtachse vom Betrachter zu einer WEA noch weitere WEA befinden. Sollte diese Konstellation auftreten, reduziert sich die visuelle Wahrnehmung der WEA.



Abbildung 64: Darstellung der Auswirkung einer besonderen geometrischen Konstellation

Das Ergebnis einer Berechnung für die in Abbildung 66 dargestellten WEA würde die gegenseitige Verschattung im Falle einer geometrischen Konstellation nicht berücksichtigen.

9 Zusammenfassung

Mit der entwickelten Methodik wurde ein Instrument geschaffen, welches es ermöglicht, die visuelle Wahrnehmung von Windenergieanlagen zu ermitteln. Die Basis für die Ermittlung der visuellen Wahrnehmung ist dabei eine Sichtbarkeitsanalyse.

Durch die Einteilung der Windenergieanlage in sechs Betrachtungshöhen und die anschließende gewichtete Sichtbarkeitsanalyse für diese Höhen ist es möglich, die spezielle Form einer Windenergieanlage abzubilden.

Da die visuelle Wahrnehmung eines Objektes wesentlich von der Entfernung zwischen dem Betrachter und dem Objekt abhängt, fließt der Einfluss der Entfernung in das Endergebnis ein. Dazu wird der Winkel zwischen dem betrachteten Standpunkt, dem Objektfußpunkt und der Objektgesamthöhe berechnet.

Das Endergebnis setzt sich aus den Ergebnissen der gewichteten Sichtbarkeitsanalyse und der berechneten Winkelwerte zusammen.

Mit dieser Methodik ist es möglich, die visuelle Wahrnehmung in einem Umkreis von 360° um den betrachteten Standpunkt herum zu ermitteln. Aber auch eine Betrachtung von ausgewählten Windenergieanlagen in einem bestimmten Gebiet ist so möglich.

Jedoch sind die Ergebniswerte nicht geeignet, um als Kriterium für die Abgrenzung von Windeignungsgebieten zu gelten. Der Grund dafür liegt in der massiven Erhöhung der Werte, in Bereichen mit einer hohen Anzahl von Windenergieanlagen, die der tatsächlichen Wahrnehmung folgt.

Die Einsatzgebiete liegen bei der Bürgerinformation und können sowohl bei der Errichtung neuer Windenergieanlagen als auch im Ersetzen von älteren Anlagen durch neue liegen. Dazu kann die Methodik in Verbindung mit einer Datenbank eingesetzt werden. Mit der Datenbank können für die berechneten Werte Vergleichsansichten verwaltet werden um dem Betroffenen so einen Eindruck über die zu erwartende visuelle Wahrnehmung zu geben.

Da aber auch diese Methodik auf der modellhaft abgebildeten Realität beruht, können einige Einflüsse auf die Sichtbarkeit einer Windenergieanlage nicht berücksichtigt werden. Dazu gehören zum Beispiel Witterungseinflüsse und Vegetationseinflüsse.

Insgesamt ist diese erweiterte Sichtbarkeitsanalyse geeignet, um die Information der Betroffenen zu verbessern. Dadurch kann möglicherweise die Akzeptanz im Vorfeld von Planungen und Errichtungen von Windenergieanlagen erhöht werden.

10. Quellenverzeichnis

- [bmu12] Hauptseite des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und
Reaktorsicherheit, <http://www.bmu.de>, Energiewende, Zugriff am 07.08.2012
- [ökostrom12] Hauptseite von Ökostrom.info, <http://www.ökostrom.info>, Windparks – Vorteile
und Aufbau, Zugriff am 13.07.2012
- [RB09] Grundlagen der Gestaltung, Roland Barth, Neu-Ulm, 2009
- [GR11] Windenergieanlagen und Landschaftsbild, Günther Ratzbor, 2011
- [enertrag12] Hauptseite Enertrag AG, <http://www.enertrag.com>, Enertrag Windkraftbonus,
Zugriff am 10.07.2012
- [re-ko12] Hauptseite der Repowering Infobörse, <http://www.repowering-kommunal.de>,
Visuelle Wirkungsanalyse von Windenergieanlagen im Repowering; Ohne
Jahrgangsangabe, Zugriff am 16.07.2012
- [HNEE12] Hauptseite der HNEE, www.hnee.de, Sichtbarkeit und
Visualisierung von Windkraftanlagen und Strommasten, Zugriff am 16.07.2012
- [atkis08] Hauptseite Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder
der Bundesrepublik Deutschland (AdV), <http://www.atkis.de>,
Zugriff am 20.07.2012
- [geobasis-bb12] Hauptseite der Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg
(LGB), <http://www.geobasis-bb.de>, Objektartenkatalog Zugriff am 21.07.2012
- [TG12] Tobias Graehn; Telefonische Auskunft; Enercon GmbH, 26.07.2012
- [ENERCON12] ENERCON GmbH; Technische Beschreibung Farbgebung von
ENERCON Windenergieanlagen, 11.07.2012
- [Conrad06] Dissertation, Olaf Conrad, 2006,
<http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2007/conrad/conrad.pdf>,
Zugriff am 28.07.2012
- [saga12] Hauptseite von SAGA, <http://www.saga-gis.org>
Zugriff am 09.07.2012
- [GE12] Google Earth, Zugriff am 15.07.2012
- [kreis-rueg12] Hauptseite des Landkreises Rügen, <http://www.kreisrueg.de>,
Zugriff am (20.07.2012)
- [FJGRJ09] Franz Josef Gruber; Rainer Joeckel, Formelsammlung für das
Vermessungswesen; 2009
- [gii12] Seite des Bundesministerium der Justiz, <http://www.gesetze-im-internet.de>,
Luftverkehrsgesetz

11. Abkürzungsverzeichnis

WEA	-	Windenergieanlage
WEG	-	Windeignungsgebiet
DGM	-	Digitales Geländemodell
DOM	-	Digitales Oberflächenmodell
DHHN92	-	Deutsches Haupthöhennetz 92
ETRS89	-	European Terrestrial Reference System 89
ATKIS	-	Automatisiertes Topographisches Kartographisches Informationssystem
HNEE	-	Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde
SAGA	-	System for Automated Geoscientific Analysis
VEG	-	Vegetationsmerkmal
OBJART	-	Objektart
RPG	-	Regionale Planungsgemeinschaft

12. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der Wirkzonen [re-ko12].....	10
Abbildung 2: Vergleich von Ergebnissen der Sichttraumanalyse [re-ko12]	10
Abbildung 3: Legende zur Ergebnisdarstellung der Sichttraumanalyse [re-ko12]	11
Abbildung 4: Schematische Darstellung der partiellen Sichtbarkeit [HNEE12].....	12
Abbildung 5: Abstand zur nächsten Anlage [HNEE12]	12
Abbildung 6: Abstand zur nächsten Anlage [HNEE12]	13
Abbildung 7: Absolute Sichtbarkeit [HNEE12].....	13
Abbildung 8: Anzahl sichtbarer Anlagen [HNEE12]	14
Abbildung 9: Ergebnis der Ermittlung von Teilsichtbarkeiten [HNEE12].....	14
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Methodik einer Sichtbarkeitsanalyse	16
Abbildung 11: Modell eines Digitalen Geländemodells [kreis-rueg12].....	18
Abbildung 12: Preisübersicht Laserscanrohdaten First Pulse [geobasis12]	19
Abbildung 13: Vergleich zweier im ATKIS kartierter Hecken	22
Abbildung 14: Vergleich zwischen Datenlage und Realität bei Baumreihen	23
Abbildung 15: Vergleich verschiedener Einzelbäume	23
Abbildung 16: Attributtabelle	24
Abbildung 17: Attributtabelle mit Höhenattribut nach der Zusammenfassung	25
Abbildung 18: Ausschnitt aus dem erzeugten GRID	25
Abbildung 20: Vergleich der Sichtbarkeit einer WEA	28
Abbildung 21:.....	29
Abbildung 22: Übersicht Betrachtungshöhen	29
Abbildung 23: Schematische Darstellung der Verteilung der Wertigkeiten.....	31
Abbildung 24: Beispielsituation für die Betrachtungshöhe Nr. 1	32
Abbildung 25: Beispielsituation für die Betrachtungshöhe Nr. 2	32
Abbildung 26: Beispielsituation für die Betrachtungshöhe Nr. 3	33
Abbildung 27: Beispielsituation für die Betrachtungshöhe Nr. 4	33
Abbildung 28: Beispielsituation für die Betrachtungshöhe Nr. 5	34
Abbildung 29: Beispielsituation für die Betrachtungshöhe Nr. 6	35
Abbildung 30: Darstellung der Entfernung auf die wahrnehmbare Objektgröße	36
Abbildung 31: Schematische Darstellung der Umsetzung der Winkelbeziehungen	37
Abbildung 32: Entwicklung der Winkelwerte	38
Abbildung 33: Darstellung der Berechnungsergebnisse	39
Abbildung 34: Darstellung der verwendeten Teilfläche des DGM.....	40
Abbildung 35: Darstellung der Gewichteten Sichtbarkeit	41
Abbildung 36: Winkelwerte der Rasterzellen.....	41
Abbildung 37: Endergebnis	42
Abbildung 38: Gegenüberstellung Sichtbarkeit – Winkelwerte - Endergebnis.....	42
Abbildung 39: Schematische Darstellung des Einflusses der Betrachtungshöhe.....	43
Abbildung 40: Einfluss der Beobachtungshöhe in der Realität	44

Abbildung 41: Schematische Darstellung des Aufbaus von SAGA.....	45
Abbildung 42: Eingabemaske des originalen Moduls zur Sichtbarkeitsanalyse	46
Abbildung 43: Gegenüberstellung der Eingabemasken.....	49
Abbildung 44: Standort Einzelanlage [GE12].....	53
Abbildung 45: Ergebnis der Winkelberechnung einer einzelnen WEA	53
Abbildung 46: Gewichtete Sichtbarkeit von sechs Betrachtungshöhen einer WEA.....	54
Abbildung 47: Ergebnis	55
Abbildung 48: Lage WEG Lichterfelde [GE12].....	55
Abbildung 49: Summe der Winkel zu den Gesamthöhen der WEA im WEG Lichterfelde.....	56
Abbildung 50: Gewichtete Sichtbarkeit der WEA im WEG Lichterfelde.....	57
Abbildung 51: Ergebniswerte der WEA im WEG Lichterfelde.....	57
Abbildung 52: Lage des betrachteten Gebietes [GE12].....	58
Abbildung 53: Summe der Winkel zu den Gesamthöhen der WEA im betrachteten Gebiet	59
Abbildung 54: Gewichtete Sichtbarkeit aller betrachteter WEA	59
Abbildung 55: Darstellung der Ergebniswerte für das betrachtete Gebiet mit 230 WEA.....	60
Abbildung 56: Vergleich große Sichtweite und geringe Sichtweite	62
Abbildung 58: Vergleich der Ansicht bei unterschiedlichen Windrichtungen	63
Abbildung 57: Schematische Darstellung des Einflusses der Windrichtung auf die Sichtbarkeit.....	63
Abbildung 59: Darstellung einer teilweisen Verschattung einer WEA.....	66
Abbildung 60: Darstellung eines nicht flächenhaften Vegetationseinflusses	67
Abbildung 61: Darstellung eines flächenhaften Vegetationseinflusses.....	67
Abbildung 62: Gegenüberstellung der Farbgebung von WEA laut technischer Beschreibung [ENERCON12] und der Realität	68
Abbildung 63: Unterschiedliche Wahrnehmung von WEA aufgrund der Farbgebung.....	69
Abbildung 64: Darstellung der Wirkung von Markierungen an WEA	70
Abbildung 65: Darstellung der Auswirkung einer besonderen geometrischen Konstellation.....	70

13. Ergänzung zum Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Aufnahmedatum	Rechtswert	Hochwert	Aufnahmerichtung
13 Links	04.08.2012	33U 427313	5915224	280°
13 Rechts	04.08.2012	33U 427313	5915224	100°
14	03.08.2012	33U 438742	5918073	200°
15 Links	03.08.2012	33U 438742	5918073	130°
15 Mitte	05.08.2012	33U 427400	5913532	280°
15 Rechts	07.08.2012	33U 417827	5864038	090°
21	21.07.2012	33U 443232	5915181	070°
35	11.04.2012	33U 417220	5860317	170°
51 Links	20.07.2012	33U 427558	5928516	280°
51 Rechts	18.07.2012	33U 427558	5928516	280°
53 Links	14.07.2012	33U 417081	5860093	160°
53 Rechts	05.07.2012	33U 417081	5860093	160°
54	06.07.2012	33U 431485	5897340	310°
55 Links	16.02.2012	33U 441257	5914931	200°
55 Rechts	03.08.2012	33U 441257	5914931	200°
56 Links	11.04.2012	33U 415679	5858555	060°
56 Rechts	25.07.2012	33U 415679	5858555	060°
57 Rechts	22.05.2012	33U 432728	5916475	250°
58	07.07.2012	33U 428423	5915125	090°
59	07.07.2012	33U 426941	5913749	080°
60 Links	07.07.2012	33U 427540	5915626	200°
60 Rechts	07.07.2012	33U 426941	5913749	020°

14. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Vegetationsformen und ObjektID [geobasis-bb12]	20
Tabelle 2: Übersicht der Funktionen des originalen Moduls	46
Tabelle 3: Übersicht zur Entwicklung der Rasterzellenanzahl	50
Tabelle 4: Übersicht Anzahl der zu verwaltenden Dateien	51
Tabelle 5: Anlagendaten Enercon E-66/15.6	53
Tabelle 6: Anlagendaten WEG Lichterfelde	56
Tabelle 7: Gegenüberstellung zweier Ergebniswerte und deren Entstehung	61
Tabelle 8: Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Rotordurchmesser und der maximalen Drehzahl	65

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelorarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Neubrandenburg, den 15.08.2012

Sven Klettke