

GIS-BASIERTE ANSÄTZE ZUR ENTFERNUNGSGEWICHTETEN BEWERTUNG DER EMPFINDLICHKEIT DES LANDSCHAFTSBILDS GEGENÜBER WINDENERGIEANLAGEN

Caroline Fischer, Michael Roth

Zusammenfassung: Zur Steuerung des Windkraftausbaus werden früh im Planungsprozess hochauflösende und valide Daten zur Empfindlichkeit des Landschaftsbilds benötigt. Die vorhabenspezifische Einsehbarkeit der Landschaft kann als Proxy für die Empfindlichkeit dienen und lässt sich mit Geoinformationssystemen (GIS) auf der Basis flächendeckend verfügbarer digitaler Daten berechnen. Bisher werden dazu jedoch kaum entfernungsabhängige Modelle eingesetzt. Dieser Beitrag beschreibt und vergleicht verschiedene GIS-basierte Ansätze zur entfernungs-gewichteten Bewertung der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds hinsichtlich des Rechenaufwands und ihrer Aussagekraft. Die neu entwickelten Ansätze mit kontinuierlich abnehmenden Entfernungsgewichten zeigen, dass effiziente Algorithmen vorliegen, die sowohl für die Standortfindung von Windparks als auch für die Bemessung von Ersatzgeldzahlungen nutzbar sind.

Schlüsselwörter: Geoinformationssystem, visuelle Empfindlichkeit, Bewertungsmodell, Windkraftausbau, Methodenvergleich

GIS-BASED APPROACHES TO ANALYSE DISTANCE DECAY EFFECTS IN VISUAL LANDSCAPE SENSITIVITY TOWARDS WIND TURBINES

Abstract: Spatial planning for wind power expansion needs high resolution and valid data on visual landscape sensitivity early in the planning process. With geographic information systems, the landscape intervisibility for specific projects can be calculated based on area-wide available digital datasets. Intervisibility can be used as a proxy for visual sensitivity. Up to now, methods incorporating a distance decay effect have rarely been used for this purpose. This article describes and compares different GIS-based approaches to analyse distance decay effects in visual landscape sensitivity analysis. They are compared regarding computation efforts and meaningfulness. The newly developed approaches with continually decreasing distance weights show that efficient algorithms exist, which can be used for siting of wind farms as well as determining compensation measures and/or payments.

Keywords: Geographic information system, visual sensitivity analysis, assessment model, wind power expansion, method comparison

Autoren

M. Sc. Caroline Fischer
Prof. Dr. Michael Roth
Hochschule für Wirtschaft und Umwelt
Nürtingen-Geislingen (HfWU)
Institut für Landschaft und Umwelt (ILU)
Schelmenwasen 4-8
D-72622 Nürtingen
E: caroline.fischer@hfwu.de
michael.roth@hfwu.de

1 EINFÜHRUNG

Der Ausbau erneuerbarer Energien ist ein fest verankertes Ziel der Europäischen Kommission und der Bundesregierung (z. B. Europäische Kommission o.J., BMU 2019). Die Notwendigkeit, im Sektor der Energiewirtschaft Maßnahmen zu ergreifen, um das aktualisierte Klimaschutzziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes zu erreichen, wird in diesem Gesetz betont und innerhalb des Klimaschutzprogramms des Bundes (BMU 2019) konkretisiert. Bis 2030 soll der Anteil von erneuerbarer Energie darüber hinaus laut Koalitionsvertrag 2021-2025 auf 80% des Bruttostromverbrauchs steigen (BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN o.J.). In Deutschland bieten Solar- und Windenergie die größten noch ungenutzten Potenziale (BfN 2019). Um diese zu realisieren, haben die Planungsbehörden den gesetzlichen Auftrag, der Windenergie innerhalb ihrer Planungsregion substantiell Raum zu verschaffen. So sind Gebiete speziell für die Windenergie auszuweisen (FA Wind 2016). Hierfür sieht der Koalitionsvertrag 2021-2025 2% der Landesfläche vor (BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN o.J.). Damit soll der Ausbau der Windenergie wieder verstärkt vorangetrieben werden, nachdem die Anzahl an neu gebauten Windenergieanlagen ab den frühen 2000er-Jahren stetig zunahm und 2017 deutlich einbrach (FA Wind 2020).

Trotz der vorgegebenen politischen Ausbauziele ist es im Zuge der Raumplanung oftmals schwierig, konkrete Standorte für den Bau von Windenergieanlagen auszuwählen und dabei eine breite öffentliche Akzeptanz der neuen Landschaftselemente sicherzustellen. Windenergieanlagen verändern das wahrgenommene Bild der Landschaft, indem sie die Landschaft dominieren können (Zusammenfassung weiterer Auswirkungen in Lima et al. 2013). Die Dominanz kann durch die Höhe, den technischen Charakter und die Rotorbewegung begründet werden (Breuer 2001). Heutige Anlagehöhen betragen 200 m und mehr. Windenergieanlagen beeinträchtigen also besonders visuelle Landschaftsfunktionen wie die Landschaftsbildqualität oder das Erholungspotenzial (Nohl 1993, 2001). Die Landschaftsveränderung kann unter Umständen zu einem Landschaftswandel von einer (mehr oder weniger) traditionellen Kulturlandschaft zu einer Energielandschaft führen.

Die Wahrnehmung des Landschaftsbilds und einer etwaigen Beeinträchtigung variiert u. a. abhängig von der Landschaftskonfiguration und den persönlichen Einstellungen bzw. Werten (Zube et al. 1982, Nohl 2001). Dabei ist allgemein anerkannt, dass die wahrgenommene visuelle Beeinträchtigung durch Windenergieanlagen mit der Entfernung zum Betrachter abnimmt (z. B. Breuer 2001, Bishop & Miller 2007, de Vries et al. 2012, Molnarova et al. 2012, Betakova et al. 2015). Dieser Umstand wird abnehmende Entfernungswirkung (engl. distance decay) genannt und in Abbildung 1 veranschaulicht. Weiter entfernte Windenergieanlagen nehmen eine geringere Fläche im Blickfeld ein und sind folglich weniger dominant (Zeinler 2020).

In der Literatur unterscheiden Brughmans et al. (2018) und Hildebrandt (2015) drei verschiedene Ansätze, um die abnehmende Entfernungswirkung abzubilden. Für die Umsetzung werden Entfernungsgewichte herangezogen:

- ▶ keine Abnahme der Entfernungswirkung (kein Entfernungsgewicht),
- ▶ stufenweise Abnahme der Entfernungswirkung (stufenweise Entfernungsgewichte),
- ▶ kontinuierliche Abnahme der Entfernungswirkung (kontinuierliche Entfernungsgewichte).

Den drei Ansätzen folgend, wird die Abnahme der Entfernungswirkung in Abbildung 2 grafisch dargestellt. Ein einheitliches/konstantes Entfernungsgewicht ent-

spricht keiner Abnahme der Entfernungswirkung. Bei der stufenweisen Abnahme der Entfernungswirkung werden von der Mitte ausgehend diskrete Distanzzonen abgegrenzt, die jeweils unterschiedliche Entfernungsgewichte besitzen. Der letzte Ansatz beschreibt die kontinuierliche Änderung des Entfernungsgewichts, um die kontinuierliche Abnahme der Entfernungswirkung abzubilden. Hierbei sind verschiedene Funktionen der Reduzierung möglich (bspw. linear, logarithmisch). Die Ansätze sind auf die Bewertung der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds übertragbar.

Die Empfindlichkeit des Landschaftsbilds bestimmt die visuelle Beeinträchtigung (vgl. Bachfischer 1978). Die Fähigkeit einer Landschaft, ästhetisch beeinträchtigende Objekte zu verschleiern, führt laut Roth & Bruns (2016, S. 52 f.) zu einer geringen Empfindlichkeit des Landschaftsbilds. Die Empfindlichkeit des Landschaftsbilds ist bisher wenig empirisch untersucht und nicht allgemeingültig definiert. Store et al. (2015) haben die Sichtbarkeit, potenzielle Nutzer und die Landschaftsbildqualität berücksichtigt. Gerhards (2003, S. 97) benennt den Landschaftscharakter als wichtiges Merkmal für die Empfindlichkeit des Landschaftsbilds. Er weist darauf hin, dass die visuelle Verletzlichkeit bzw. Einsehbarkeit insbesondere für die Regionalplanung von Bedeutung ist.

In der Praxis wurden Entfernungsgewichte lediglich in einigen wenigen Methoden integriert, die andere Ziele als die



Abbildung 1: Veranschaulichung der abnehmenden Entfernungswirkung (Foto: Caroline Fischer 2021)

Empfindlichkeit des Landschaftsbilds besaßen (z. B. Wagtendonk & Vermaat 2014, Gibbons 2015, Brughmans et al. 2018). Beispielsweise war es der primäre Fokus von Nohl (1993), eine Methode mit stufenweiser Abnahme zu entwickeln, welche die notwendige Fläche zur Kompensation für die Beeinträchtigungen des Landschaftsbilds berechnet. Es fehlte bis jetzt eine fokussierte und flächendeckende Anwendung von Entfernungsgewichten für das Landschaftsbild. Kürzlich entwickelten Fischer & Roth (2020) eine flächendeckende Einsehbarkeitsanalyse, die große Gebiete (bspw. Bundesländer) mit einer hohen Auflösung abdeckt, um die Empfindlichkeit des Landschaftsbilds anzunähern. Dieser Ansatz berücksichtigt aber nicht die abnehmende Entfernungswirkung.

Das Ziel dieses Beitrags war es, auf der Arbeit von Fischer & Roth (2020) aufbauend, Ansätze zu entwickeln, welche die abnehmende Entfernungswirkung berücksichtigen, also eine entfernungs-gewichtete Bewertung der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds ermöglichen. Der Fokus lag auf Windenergieanlagen. Konkreter sollten a) GIS-basierte Prozesse entwickelt werden, um jeden der drei Ansätze zur Abbildung der abnehmenden Entfernungswirkung umzusetzen, b) die resultierende Empfindlichkeit des Landschaftsbilds verglichen werden und c) die hinsichtlich des Verhältnisses von Rechenaufwand/-zeit und Aussagekraft effizienteste Methode bestimmt werden. Insgesamt werden vier GIS-Ansätze zur Umsetzung vorgestellt. Als Untersuchungsgebiet für diese explorative Studie zur entfernungs-gewichteten Empfindlichkeit des Landschaftsbilds diente ein Teil des Freistaats Thüringen.

Für Planungsbehörden sind Informationen zur Empfindlichkeit des Landschaftsbilds essenziell, um Standorte für den Windenergieausbau vor der konkreten Festlegung zu identifizieren und zu vergleichen. Hierdurch können die Belange des Landschaftsbilds bereits in frühen Planungsphasen berücksichtigt werden, indem durch fundierte, verantwortungsvolle Standortentscheidungen Beeinträchtigungen des Landschaftsbilds durch Windenergieanlagen vermieden und minimiert sowie empfindliche Gebiete geschützt werden. Gut platzierte Energieinfrastruktur könnte auch zu einer höheren öffentlichen Akzeptanz beitragen.

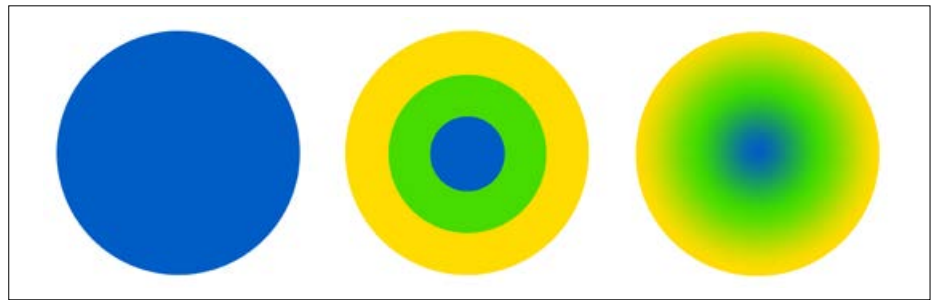


Abbildung 2: Grafische Darstellung der Ansätze zur Abbildung der abnehmenden Entfernungswirkung (nach Brughmans et al. 2018, S. 16, angepasst)

2 METHODE

Unter der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds wird ein Indikator verstanden, der die potenziell beeinträchtigte Fläche beschreibt, wenn ein Projekt (eine Windenergieanlage) auf einem bestimmten Standort realisiert werden würde. Dieser Indikator ist zunächst unabhängig von spezifischen Beobachtungspunkten, der Landschaftsbildqualität, dem Charakter der Landschaft und bereits existierender Vorbelastung. In der vorliegenden Studie dient allein die Sichtbarkeitshäufigkeit als Ergebnis der Einsehbarkeitsanalyse als Proxy für die Empfindlichkeit des Landschaftsbilds. Ein höherer Häufigkeitswert hat eine höhere Empfindlichkeit zur Folge.

Für die Einbindung der abnehmenden Entfernungswirkung in die Bewertung der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds wurden Entfernungsgewichte in die Einsehbarkeitsanalyse integriert. Hierfür werden vier GIS-basierte Vorgehensweisen vorgestellt.

Für die kontinuierliche Entfernungsgewichtung werden zwei Alternativen für unterschiedliche GIS-Programme (ArcMap, QGIS) entwickelt. Alle Ansätze sollen für große Gebiete anwendbar sein. Darüber hinaus war es wichtig zu wissen, wie sich die resultierende Empfindlichkeit des Landschaftsbilds zwischen den Ansätzen räumlich unterscheidet und welche Folgerungen ableitbar sind.

Die Hypothese war, dass die Empfindlichkeit des Landschaftsbilds ausgehend von dem Ansatz ohne Entfernungsgewicht am schnellsten und einfachsten zu berechnen ist. Weiterhin wurde vermutet, dass sich die Empfindlichkeit des Landschaftsbilds zwischen den Vorgehensweisen deutlich unterscheidet.

Zunächst ist es wichtig, zwischen einer Einsehbarkeits- und einer Sichtfeldanalyse zu unterscheiden. Es ist gängige Praxis, ein GIS für Sichtfeldanalysen heranzuziehen,

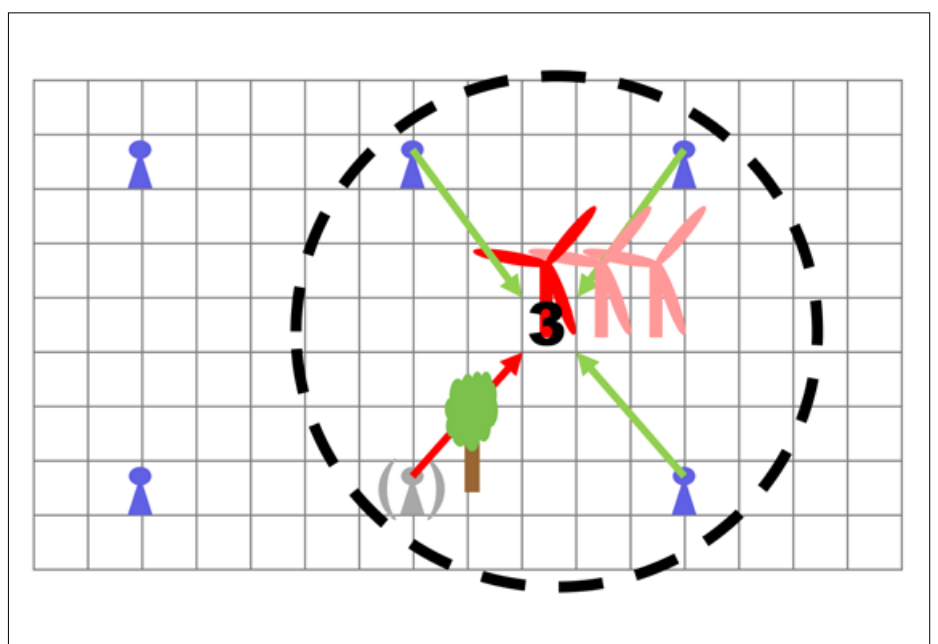


Abbildung 3: Veranschaulichung der Funktionsweise einer Einsehbarkeitsanalyse

um die von einem Projekt ausgehende visuelle Beeinträchtigung zu quantifizieren (z.B. Paul et al. 2004, Möller 2006, Wróżyński et al. 2016). In diesem Fall sind die Position und die Dimension der Windenergieanlage(n) bekannt. Um den Eingriff zu quantifizieren, wird der Sichtbereich ausgehend von der Rotorspitze berechnet, während potenzielle Betrachter auf jeder Zelle eines Gelände- bzw. Oberflächenmodells platziert werden. Demgegenüber besteht die Möglichkeit, eine Einsehbarkeitsanalyse zur Quantifizierung der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds gegenüber Eingriffen durch eine potenzielle Windenergieanlage einzusetzen (vgl. z. B. Fischer & Roth 2020). Hierfür werden die Rahmenbedingungen der Sichtfeldanalyse umgedreht (s. Abbildung 3). Die Sichtbeziehung wird nicht von der Windenergieanlage zu einem Betrachter, sondern von einem Betrachter zu der Windenergieanlage eruiert. Dabei ist die Position der Anlage nicht bekannt. Fiktive Beobachterpunkte (Beobachter/Personen) werden in der Landschaft verteilt. In der Einsehbarkeitsanalyse wird die Rotorspitze der potenziellen Windenergieanlage über der Mitte einer jeden Rasterzelle eines Oberflächenmodells platziert und anschließend die Anzahl an Beobachterpunkten in einem be-

stimmten Radius berechnet, welche die Spitze sehen können. Dieser Wert wird der Rasterzelle zugewiesen, über der die Windenergieanlage platziert ist. Er beschreibt die Sichtbarkeithäufigkeit und damit die Einsehbarkeit dieser Rasterzelle für den untersuchten Vorhabentyp (konkret: Windenergieanlage). Ob die gesamte Anlage oder nur ein Teil zu sehen ist, im Sinn unterschiedlicher visueller Dominanzwirkungen wie bei Zeinler 2020, wird nicht unterschieden. Durch eine Einteilung der Sichtbarkeithäufigkeit in Klassen wird die Empfindlichkeit bewertet. Mit diesem Ansatz ist es möglich, die Empfindlichkeit des Landschaftsbilds flächendeckend zu ermitteln und verschiedene Gebiete, in denen möglicherweise die Windenergie ausgebaut werden soll, zu vergleichen.

Es wurden die vier GIS-basierten Ansätze für einen 20 x 20 km großen Raumauschnitt getestet. Als Eingriffsobjekt wurden Windenergieanlagen mit einer Gesamthöhe von 200 m angenommen. Eine Übersicht der GIS-basierten Analysen mit sprechenden Namen, ihrer zugrunde liegenden Theorie und Umsetzung zeigt Tabelle 1.

Alle resultierenden Sichtbarkeithäufigkeiten wurden mittels Quantilsverteilung in sieben Stufen der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds reklassifiziert.

Das 20 x 20 km große Untersuchungsgebiet liegt südlich von Weimar in Thüringen (s. Abbildung 4). Aufgrund der zentralen Lage Thüringens in Deutschland werden Randeffekte, welche aus der abrupten Grenze von Daten resultieren, vermieden. Weiterhin besitzt der gewählte Raumauschnitt eine weite Amplitude von Relief, anthropogener Einflussnahme und Landnutzung. Die Geodaten sind zudem frei verfügbar. Weiterhin liegen die Ergebnisse von Fischer & Roth (2020) vor und können für Vergleiche genutzt werden.

Für die Berechnung wurde ArcMap (Version 10.6.1) mit dem Werkzeug „Sichtfeld 1“ („Viewshed 1“) genutzt. Für die Analyse „QGIS-Interpolation“ wurde QGIS (Version 3.10.1) verwendet (mehr dazu in Abschnitt 2.5). Die statistischen Analysen fanden in R (R Core Team 2020) statt.

In R wurde der Pearsons-Korrelationskoeffizient berechnet, um die resultierenden Sichtbarkeithäufigkeiten zu vergleichen. Weiterhin wurden die resultierenden Klassen der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds je Zelle miteinander verglichen. Dies erfolgte ebenfalls paarweise, indem jeweils das klassifizierte Raster eines Ansatzes von dem eines anderen Ansatzes subtrahiert wurde. Somit konnten Abweichungen der Wertstufen (Inversionen) ermit-

	Abnahme der Entfernungswirkung		
	1. Keine abnehmende Entfernungswirkung	2. Stufenweise Abnahme der Entfernungswirkung	3. Kontinuierliche Abnahme der Entfernungswirkung
Zugrunde liegender Ansatz	Konstante Analyse nach Fischer & Roth (2020)	Stufenweise Analyse nach Nohl (1993)	3a. Beobachter-Sichtfeld 3b. QGIS-Interpolation
GIS-Ansatz	Übernahme von Fischer & Roth (2020)	Anpassung von Fischer & Roth (2020)	3a. Summierte Sichtfeldanalyse basierend auf fiktiven Beobachtern 3b. Sichtlinien und Interpolation

Tabelle 1: Abbildung der abnehmenden Entfernungswirkung und zugehörige GIS-basierte Ansätze

	Ansatz	Zone	Entfernungsgewicht (Koeffizient)
Keine abnehmende Entfernungswirkung	1. Konstante Analyse nach Fischer & Roth (2020)	0 – 10.000 m	1
Stufenweise abnehmende Entfernungswirkung	2. Stufenweise Analyse nach Nohl (1993)	0 – 200 m	0,6
		200 – 1.500 m	0,3
		1.500 – 10.000 m	0,04
Kontinuierlich abnehmende Entfernungswirkung	3a. Beobachter-Sichtfeld	0 – 10.000 m	Lineare Abnahme von 1 bis 0
	3b. QGIS-Interpolation	0 – 10.000 m	Lineare Abnahme von 1 bis 0

Tabelle 2: Verwendete Entfernungsgewichte je Ansatz



Abbildung 4: Lage des Untersuchungsgebiets. Die Karte zeigt den Freistaat Thüringen (rote Kontur; ATKIS © GDI_Th, dl-de/by-2-0, 30.06.2020) und das 20 x 20 km große Untersuchungsgebiet (magentafarbenes Quadrat).

telt werden, was ein gängiger Ansatz zum Vergleich rasterbasierter Landschaftsbildbewertungen ist (vgl. Roth et al. 2021a).

2.1 GRUNDLAGEN ZUR BERÜCKSICHTIGUNG DER ENTFERNUNGSABHÄNGIGEN GEWICHTUNG

Die Grundlage der Einsehbarkeitsanalyse bilden die Beobachterpunkte (s. Abbildung 5), die fiktive Personen mit der in Deutschland durchschnittlichen Augenhöhe von 1,57 m (Jürgens 2004) repräsentieren. Indem jedem Beobachterpunkt ein mit der Entfernung zur Anlage bzw. Zelle abnehmendes Gewicht zugeordnet wird, kann die abnehmende Entfernungswirkung abgebildet werden. Die Punkte wurden in einem regulären Raster von 500 x 500 m über das gesamte Untersuchungsgebiet plus 10 km Puffer verteilt. Punkte, die sich innerhalb einer Landnutzung mit einer Vertikalausdehnung befanden, die größer als die Augenhöhe ist (Wald und Siedlung), werden von der Untersuchung ausgeschlossen. Ihr Sichtfeld ist eingeschränkt (s. Abbil-

dung 3). Die Beobachterpunkte wurden in allen Ansätzen verwendet.

In dem ArcMap-Werkzeug Sichtfeld 1 zur Berechnung der Einsehbarkeit war die Korrektur der Erdkrümmung aktiviert. Als zugrunde liegender Rasterdatensatz für alle Ansätze diente ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) mit einer Auflösung von 10 m (basierend auf dem DOM2 © GDI_Th: 2010-2013, zur Beschleunigung der Rechenzeit auf 10 m aggregiert von Fischer & Roth 2020). Bei dieser Auflösung werden kleine sichtverschattende Strukturen wie Gehölze noch abgebildet (Täuber & Roth 2011). Der verwendete Rasterdatensatz legt auch die Auflösung des Ergebnisses fest.

Ein anderer wichtiger Parameter der Einsehbarkeitsanalyse ist die maximale Analysedistanz. Sie entspricht der maximalen Sichtweite, bis zu welcher von einer visuellen Beeinträchtigung ausgegangen wird. Die Einsehbarkeit wird nur innerhalb dieser Grenze ermittelt. Danach wird angenommen, dass keine erhebliche visuelle

Beeinträchtigung durch eine Windenergieanlage hervorgerufen wird. Eine maximale Sichtweite von 10 km ist gängige Praxis in Deutschland (Täuber & Roth 2011). Dieser Analyseradius macht die Erweiterung des Untersuchungsraums notwendig. Andernfalls würde die Sichtbarkeithäufigkeit und damit die Empfindlichkeit in den Randbereichen unterschätzt, da in deren Umfeld weniger Beobachter wären.

Zur Umsetzung der abnehmenden Entfernungswirkung wurden unterschiedliche Entfernungsgewichte festgelegt (s. Tabelle 2 und Abbildung 6). Es wurde die kontinuierlich abnehmende Entfernungswirkung als lineare Funktion abgebildet. Das Entfernungsgewicht nimmt kontinuierlich und linear von 1 (Beobachter nah an Windenergieanlage) bis 0 (maximaler Analyseradius) ab (s. Abbildung 6).

2.2 KONSTANTE ANALYSE NACH FISCHER & ROTH (2020)

Die Methode der konstanten Analyse basiert auf dem Workflow von Fischer & Roth

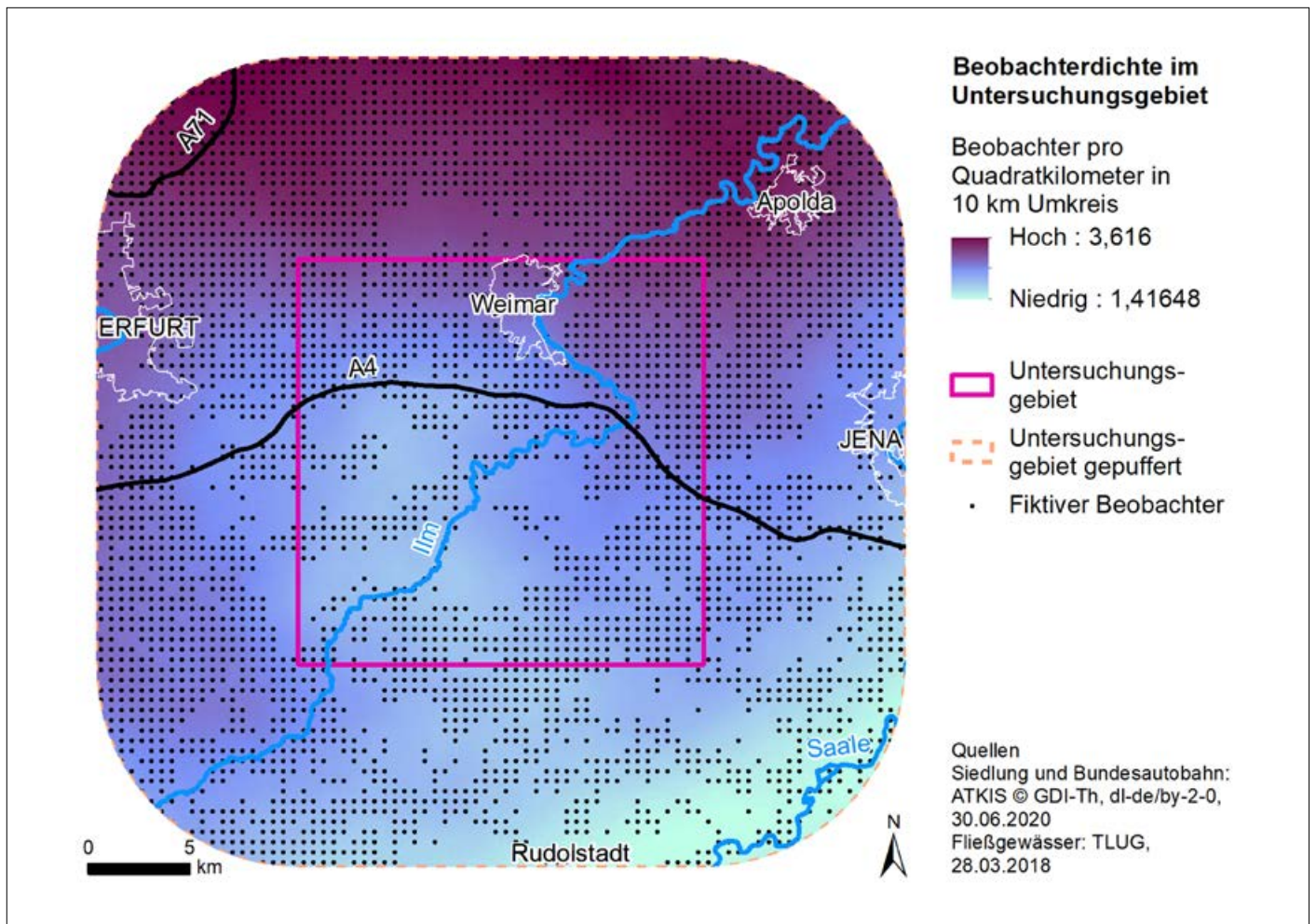


Abbildung 5: Verteilung der fiktiven Beobachter

(2020) und nutzt das ArcMap Tool „Sichtfeld 1“ (notwendige Angaben s. Tabelle 3). Die konstante Analyse folgt einem Alles-oder-Nichts-Verständnis ohne eine abnehmende Entfernungswirkung. Jeder Beobachter, welcher die Spitze einer Windenergieanlage sehen kann, wird gleich gewichtet.

Das Werkzeug „Sichtfeld 1“ addiert den OFFSETB-Wert zu jeder Zelle des DOM10, was zu Fehlern führt, wenn eine Zelle eine Landnutzungshöhe (Wald, Siedlung) besitzt. Die resultierende Summe impliziert höhere Windenergieanlagen. Der pauschale Höhenwert muss bei einer Einsehbarkeitsanalyse flächendeckend angepasst werden, da eine punktuelle Modifikation

des Höhenwerts wie bei einer Sichtbarkeitsanalyse nicht möglich ist. Um dieses Problem zu bewältigen, haben Fischer & Roth (2020) neun Landnutzungshöhenklassen mit 5 m Intervallen gebildet. Der Wert jeder Klasse wird von der originalen Windenergieanlagenhöhe (200 m) abgezogen. Für jede resultierende Höhe (angepasster OFFSETB-Wert) wird die Einsehbarkeit flächendeckend für das gesamte Untersuchungsgebiet berechnet. Die finale Sichtbarkeitshäufigkeit resultiert aus der Kombination der neun angepassten Ergebnisse, wobei der Wert der Sichtbarkeitshäufigkeit für jede Zelle aus dem angepassten Zwischenergebnis-Raster resultiert,

welches auf der Landnutzungshöhe und der zugehörigen Landnutzungshöhenklasse der Zelle basiert.

2.3 STUFENWEISE ANALYSE NACH NOHL (1993)

Die stufenweise Analyse unterscheidet die von Nohl (1993) definierten drei Entfernungszonen zwischen Beobachter und Windenergieanlage. Um die stufenweise Abnahme der Entfernungswirkung in die Einsehbarkeitsanalyse zu integrieren, wurde zunächst die Sichtbarkeitshäufigkeit innerhalb jeder Distanzzone wie in Abschnitt 2.2 berechnet. In der GIS-Analyse mit ArcMap wurden die Zonengrenzen als

Parameter	Spezifizierung	Wert [m]
OFFSETA	Augenhöhe der fiktiven Beobachter	1,57
OFFSETB	Höhe der potenziellen Windenergieanlagen	200
RADIUS2	Maximaler Analyseradius	10.000

Tabelle 3: Weitere Spezifizierung von Fischer & Roth 2020

minimaler (RADIUS1) und maximaler (RADIUS2) Analyseradius umgesetzt. Im Ergebnis lag für jede Zone die Anzahl an fiktiven Beobachtern, welche die potenzielle Windenergieanlage sehen können, vor. Durch eine Multiplikation dieser Werte mit den Entfernungsgewichten von Nohl (1993) wurde das stufenweise Entfernungsgewicht integriert. Anschließend wurden alle drei Werte addiert.

Die erste Zone endet nach Nohl (1993) bereits bei 200 m. Allerdings haben die fiktiven Beobachter 500 m Abstand zueinander. Als Folge besitzen manche Zellen bei einer Einsehbarkeitsanalyse keine Werte. Das Maximum liegt bei einem einsehenden Beobachter. Tests haben jedoch gezeigt, dass ein fiktiver Beobachter fast immer in der Lage ist, eine Windenergieanlage, die maximal 200 m von ihm entfernt steht, zu sehen. Aus diesem Grund wurde angenommen, dass ein Beobachter innerhalb von Zone 1 immer in der Lage wäre, eine potenzielle Windenergieanlage zu sehen. Daher wurde in diesem Teilraster die Sichtbarkeit flächendeckend auf den Wert 1 gesetzt.

2.4 BEOBACHTER-SICHTFELD-ANALYSE

Für die Abbildung der kontinuierlich abnehmenden Entfernungswirkung wurden zwei Ansätze entwickelt. Die Beobachter-Sichtfeld-Analyse nutzt den ModelBuilder in ArcMap. Es ist eine summierte Sichtfeldanalyse ausgehend von allen einbezogenen Beobachtern (siehe Abschnitt 2.1). Innerhalb des Modells wurde über einen Iterator jeder Beobachterpunkt separat ausgewählt. Dann erfolgte die Sichtfeldanalyse (ArcMap-Werkzeug „Sichtfeld 1“) mit denselben Werkzeugeinstellungen der konstanten Analyse (s. Tabelle 3). Das Ergebnis zeigt alle Zellen, bei denen bei Errichtung einer potenziellen Windenergieanlage die Spitze von einem ausgewählten Beobachter gesehen werden könnte. Zusätzlich wurde ausgehend von dem Beobachterpunkt die euklidische Entfernung als Luftlinie für jede Zelle (potenzielle Windenergieanlage) in einem Radius von 10 km (maximaler Analyseradius) mit einer Auflösung von 10 m (entsprechend der DOM-Auflösung) berechnet. Die Entfernungswerte wurden invertiert und normalisiert, sodass Werte zwischen 0 (weit weg vom Beobachter) und 1 (nah am Beobachter) resultierten. Sie repräsentieren die Entfernungsgewichte der kon-

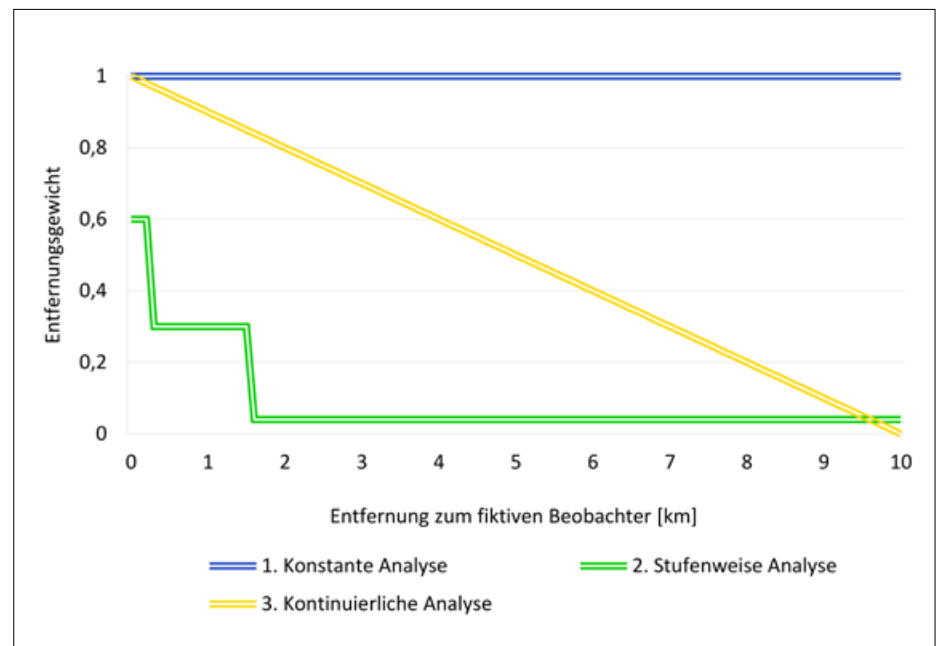


Abbildung 6: Grafische Veranschaulichung der Entfernungsgewichte je Ansatz

tinuierlich abnehmenden Entfernungswirkung. Anschließend wurde die sichtbare Fläche mit der invertierten euklidischen Entfernung verschnitten. So behielten nur Zellen, welche von dem selektierten Beobachter sichtbar sind, ihr Entfernungsgewicht. Die anderen Zellen wurden auf null gesetzt. Anschließend wurden die Raster mit den Entfernungsgewichten über alle Beobachter summiert, um die gewichtete Sichtbarkeitshäufigkeit für eine im Werkzeug „Sichtfeld 1“ festgelegte Untersuchungshöhe zu erhalten.

Die Verwendung derselben Parameter wie in der konstanten Analyse führte gleichermaßen zum Auftreten von Fehlern, die aus der Einsehbarkeitsanalyse auf Basis einer einzigen Höhe als OFFSETB-Wert resultieren. Dies wurde bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben. Daher wurde die oben beschriebene Methode mit angepassten Höhen (OFFSETB-Werten) wie in der konstanten Analyse angewandt, wodurch neun Sichtfeldanalysen je Beobachterpunkt berechnet wurden. Zum Schluss wurde die Sichtbarkeitshäufigkeit für jede Zelle ermittelt, indem der Wert, welcher der Landnutzungshöheklasse zugehörig ist, verwendet wurde.

2.5 QGIS-INTERPOLATION (INTERVISIBILITY NETWORK)

Es wurde außerdem ein alternativer GIS-basierter Ansatz entwickelt, der unabhängig von ArcGIS und dem Werkzeug

„Sichtfeld 1“ ist. Stattdessen kam QGIS und das Werkzeug „Intervisibility network“ von Cuckovic (2016) zum Einsatz. Dieses Werkzeug erzeugt Sichtlinien zwischen zwei Punktsets. Eines der Sets fungiert als Beobachter und das andere als Sichtziel. Die Berechnung basiert ebenfalls auf dem DOM10.

Die vorherigen Ansätze berechnen die Sichtbarkeitshäufigkeit für jede Zelle des DOM10 separat. Das ist mit dem Werkzeug „Intervisibility network“ nicht möglich. Stattdessen wurde eine Punkt-Feature-Klasse erzeugt, die in einem regelmäßigen Raster von 100 m angeordnet wurde. Die Punkte repräsentieren potenzielle, auf den Zellen platzierte Windenergieanlagen. Ihre Höhe wird ebenfalls zur Landnutzungshöhe hinzuaddiert, weswegen für jeden Punkt die Landnutzungshöhe der Zelle von der 200 m Anlagenhöhe abgezogen wurde, um die richtige Höhe zu erhalten. Anschließend zeichnete das Werkzeug Sichtlinien von jedem Punkt der potenziellen Windenergieanlage zu jedem fiktiven Beobachter innerhalb des maximalen Analyseradius von 10 km, wenn der Beobachter sichtbar ist.

Die berechneten Linienlängen wurden invertiert und normalisiert, um das Entfernungsgewicht zu erhalten. Im nächsten Schritt wurden alle Entfernungsgewichte pro Quellpunkt (potenzielle Windenergieanlage) summiert. So wurde die entfernungs-gewichtete Sichtbarkeitshäufigkeit er-

Ansatz	Zeit
1. Konstante Analyse	Ca. 28 h
2. Stufenweise Analyse	Ca. 40 h
3a. Beobachter-Sichtfeld	Ca. 177 h (> 7 Tage)
3b. QGIS-Interpolation	Ca. 13 h

Tabelle 4: Rechenzeit mit einer Workstation für das Untersuchungsgebiet je Ansatz

	2. Stufenweise Analyse	3a. QGIS-Interpolation	3b. Beobachter-Sichtfeld
1. Konstante Analyse	$r = 0,97$ $p \leq 0,001$	$r = 0,94$ $p \leq 0,001$	$r = 0,95$ $p \leq 0,001$
2. Stufenweise Analyse		$r = 0,97$ $p \leq 0,001$	$r = 0,97$ $p \leq 0,001$
3a. QGIS-Interpolation			$r = 0,99$ $p \leq 0,001$

Tabelle 5: Korrelationskoeffizienten nach Pearson für die Sichtbarkeitshäufigkeit

mittelt, also die Zahl an Beobachtern, die in der Lage wären, die Anlagenspitze zu sehen. Die Werte wurden interpoliert (Natürlicher Nachbar), um ein flächendeckendes Ergebnistraster mit einer Auflösung von 10 m zu erzielen.

3 ERGEBNISSE

Die für die Berechnung der Sichtbarkeits-häufigkeit benötigte Rechenzeit je Ansatz lag zwischen 13 h und 177 h (s. Tabelle 4). Es wurde eine Workstation mit folgenden Spezifikationen verwendet: Intel® Core™ i7-4790 CPU @ 3.60 GHz, 16 GB RAM, 64-Bit-Betriebssystem. Die Vorbereitungszeit der Daten wurde ebenso wie die weiteren Schritte zur Umwandlung in eine Empfindlichkeitsbewertung nicht einbezogen.

Die absoluten Werte der Sichtbarkeits-häufigkeit unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Vorgehensweisen stark. Die Werte aus den Methoden Beobachter-Sichtfeld und QGIS-Interpolation sind sich allerdings sehr ähnlich. Die Empfindlichkeit des Landschaftsbilds wird durch Klassifizierung ausgehend von einer Quantilverteilung verglichen (s. Abbildung 7).

Die Ergebnisse der stufenweisen Analyse sehen im Vergleich etwas größer aus. Trotzdem sind sich alle Ergebnisse ähnlich und mit leichten Abweichungen räumlich vergleichbar. Tabelle 5 fasst die berechneten Korrelationskoeffizienten für alle paar-

weisen Vergleiche zusammen. Alle Paare korrelieren positiv und statistisch höchst signifikant.

Die Ähnlichkeit der Ergebnisse wird auch bei einem Vergleich der Abweichungen der Wertstufen pro Zelle deutlich (s. Tabelle 6). Beim Vergleich aller klassifizierten Ergebnisse erhält jeweils mindestens die Hälfte der Zellen dieselbe Empfindlichkeitsklasse (keine Abweichung). Beim Vergleich der QGIS-Interpolation und der Beobachter-Sichtfeld-Analyse treten deutlich die geringsten Abweichungen auf. Eine Abweichung um zwei Wertstufen kommt im jeweiligen Vergleich nur in unter 10% der Zellen vor. Die stufenweise Analyse bildet nicht nur in der Theorie, sondern auch in der Praxis einen Übergang von der konstanten Analyse zu der kontinuierlichen Analyse (QGIS-Interpolation und Beobachter-Sichtfeld).

4 DISKUSSION

Es wurde gezeigt, dass es möglich ist, die stufenweise und die kontinuierliche Abnahme der Entfernungswirkung durch die Berechnung der Sichtbarkeitshäufigkeit als Proxy für die Bewertung der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds gegenüber Windenergieanlagen zu modellieren. Die zwei entwickelten GIS-basierten Ansätze zur Abbildung der kontinuierlich abnehmenden Entfernungswirkung sind ein Novum in der Landschaftsplanung.

Dabei sind die absoluten Werte der Sichtbarkeitshäufigkeit die Konsequenz der Dichte der fiktiven Beobachterpunkte und des verwendeten maximalen Analyseradius. Folglich hat die Sichtbarkeitshäufigkeit allein eine geringe Aussagekraft. Der Vergleich der klassifizierten Wertstufen zeigt in großen Teilen keine bzw. nur geringe Abweichungen der vergebenen Wertstufe. Das bedeutet, dass unabhängig von der Methode eine ähnliche Verteilung der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds im Untersuchungsraum erzielt wird. Räumliche Vergleiche würden also zu ähnlichen Ergebnissen führen.

Es gilt zu beachten, dass die Empfindlichkeit des Landschaftsbilds nur angenähert werden kann, in diesem Fall durch eine Einsehbarkeitsanalyse. Nichtsdestotrotz bieten Einsehbarkeitsanalysen einen validen, quantitativen Ansatz, um die Empfindlichkeit des Landschaftsbilds gegenüber Windenergieanlagen oder anderen Strukturen zu bewerten. Die Ergebnisse können zur Vermeidung bzw. Minimierung von Eingriffen in das Landschaftsbild beitragen, indem unterschiedliche Gebiete für die Entwicklung von Windenergie und ihre Empfindlichkeit miteinander verglichen werden können. So können Entscheidungen zur Standortfindung von Windenergieanlagen gestützt werden. Dies kann wiederum zu einer höheren öffentlichen Akzeptanz beitragen. Daneben sind weitere Aspekte wie politische Interessen, andere Auswirkungen

auf Natur und Landschaft, wie zum Beispiel auf Arten und die Wirtschaftlichkeit, ebenfalls zu berücksichtigen.

Welcher der drei Ansätze zur abnehmenden Entfernungswirkung (keine, stufenweise, kontinuierliche) und zur möglichen Beeinträchtigung des Landschaftsbilds am besten zur Realität passt, wurde in dieser Studie nicht betrachtet. Dass eine Abnahme der visuellen Beeinträchtigung mit zunehmender Entfernung einhergeht, zeigten verschiedene Studien (z. B. Breuer 2001, Bishop & Miller 2007, de Vries et al. 2012, Molnarova et al. 2012, Betakova et al. 2015). Die konstante Analyse liefert schnell Ergebnisse, die z. B. im Rahmen einer raumplanerischen Standortfindung gut verwendbar sind. Werden hingegen absolute Maße für die Empfindlichkeit benötigt, z. B. im Rahmen der Eingriffsregelung für die Bestimmung des Kompensationsumfangs oder für die Bemessung von Ersatzgeldern, bietet sich die Analyse mit kontinuierlich abnehmender Entfernungswirkung an.

Der explorative Ansatz fokussierte ein Untersuchungsgebiet mit einer Größe von 20 x 20 km. Die untersuchten GIS-basierten Ansätze sind auf größere Gebiete übertragbar, wenn ein parallel rechnendes Computernetzwerk genutzt wird. Das zeigten bereits Fischer & Roth (2020) mit der konstanten Analyse für den gesamten Freistaat Thüringen und Fischer (2018) mit einem ähnlichen Ansatz für Hochspannungsfreileitungen für ganz Baden-Württemberg.

Im Rahmen dieser und weiterer Untersuchungen ist der normalerweise verwendete

maximale Analyseradius zu hinterfragen. Auch wenn er in Deutschland üblicherweise auf 10 km festgelegt wird (Täuber & Roth 2011), kommen Roth & Gruehn (2014) zu dem Schluss, dass die 10 km nur der Minimalwert sind. Der Grenzwert von 10 km wurde in den 1990er- und frühen 2000er-Jahren für Windenergieanlagen festgelegt, die eine maximale Höhe von 100 m besaßen (z. B. Nohl 1993, Bishop 2002 nach Betakova et al. 2015) und seither, auch in Anbetracht von aktuellen Windenergieanlagenhöhen von 200 m, nicht mehr verändert. Der maximale Analyseradius variiert zudem abhängig von der Methode (knapper Überblick bei Ioannidis & Koutsoyiannis 2020). Bis jetzt existiert kein wissenschaftlich belegter Grenzwert für die visuelle Wirkung von Windenergieanlagen (Betakova et al. 2015). Gleichzeitig betont Scottish Natural Heritage (2017) in einer Orientierungshilfe zur Planung von Windparks, dass allgemeine Grenzwerte nicht mehr angemessen sind. Das wird durch variierende Sichtdistanzen aufgrund der Anlagenhöhe, Standortaspekten und Wetterbedingungen begründet. Nichtsdestotrotz ist ein Grenzwert, der für deutsche Landschaften und die dort herrschenden Wetterbedingungen passend ist, wünschenswert. Hildebrandt (2015) schlägt eine Distanz von 15 bis 16 km für deutliche visuelle Beeinträchtigungen vor. Der Vorschlag beruht auf Studien aus anderen Ländern (z. B. Sullivan et al. 2012). Ob die Bedingungen der Studien auf deutsche Landschaften übertragbar

sind, wäre empirisch zu überprüfen. Eine Untersuchung des Themas ist überfällig.

Weiterhin ist das Abgrenzen von Stufen visueller Beeinträchtigung zu prüfen, um die stufenweise Abnahme der Entfernungswirkung abzubilden. Betakova et al. (2015) fanden zu Nohl (1993) vergleichbare Grenzwerte. Wahrgenommene Verminderungen einer Beeinträchtigung durch Windenergieanlagen traten in Entfernungen von 1.500 m, 7.500 m und 10.000 m zum Beobachter auf (150 m Anlagenhöhe). Allerdings wurde die Studie mit einigen festgelegten Werten durchgeführt. Unklar ist zudem, wie Nohl (1993) die Entfernungsgewichte zuwies. Ihre Gültigkeit ist daher fragwürdig. In der Zukunft ist zu klären, ob es Zonen mit einer unterschiedlich wahrgenommenen Beeinträchtigung gibt und welche Entfernungsgewichte bei der Bewertung der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds zur Abbildung der Realität geeignet sind.

In dieser Studie wurde die kontinuierlich abnehmende Entfernungswirkung als lineare Funktion modelliert. Allerdings können andere mathematische Funktionen ebenso nützlich sein. Alternativen können eine Bruchfunktion (Wagtendonk & Vermaat 2014), eine Logarithmusfunktion oder eine Exponentialfunktion (z. B. Shang & Bishop 2000) sein. So lange keine wahrnehmungsbezogene empirische Studie ein tieferes Verständnis zu der abnehmenden Entfernungswirkung einer 200 m hohen oder noch höheren Windenergieanlage ermöglicht, sind alle Ansätze und Funktionen gleichsam geeignet.

	Abweichung der Wertstufen	2. Stufenweise Analyse	3a. QGIS-Interpolation	3b. Beobachter-Sichtfeld
1. Konstante Analyse	0	61 %	51 %	52 %
	± 1	36 %	41 %	41 %
	± 2	3 %	7 %	6 %
	± 3	–	1 %	1 %
2. Stufenweise Analyse	0		63 %	66 %
	± 1		35 %	32 %
	± 2		2 %	2 %
	± 3		< 1 %	< 1 %
3a. QGIS-Interpolation	0			81 %
	± 1			19 %
	± 2			< 1 %

Tabelle 6: Abweichung der Wertstufen der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds zwischen den Methoden

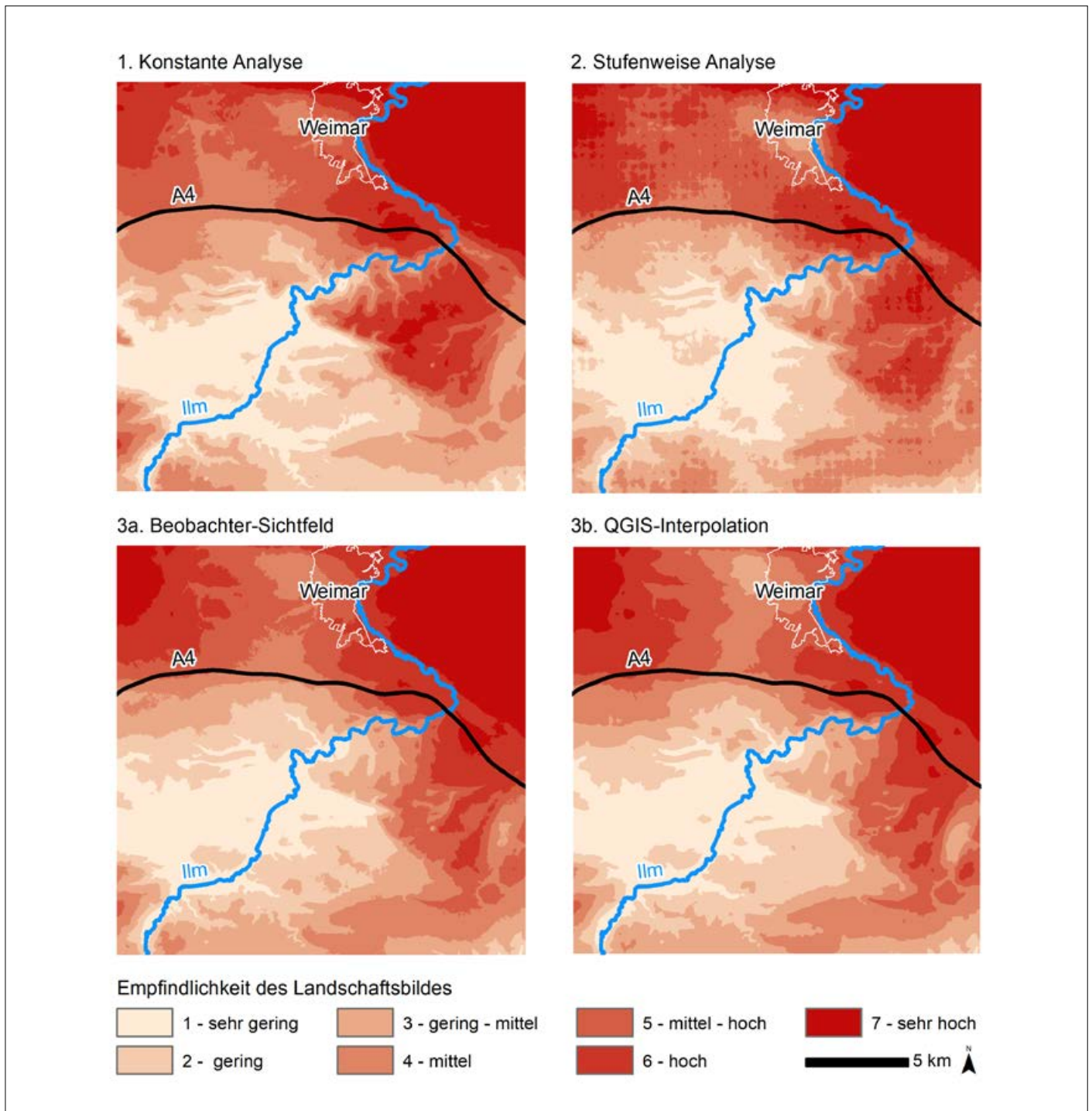


Abbildung 7: Vergleich der Empfindlichkeit des Landschaftsbildes

Darüber hinaus beeinflusst die Landschaftsbildqualität die Empfindlichkeit des Landschaftsbildes (Gerhards 2003, S. 97, Betakova et al. 2015, Store et al. 2015). Die Wahrnehmung der abnehmenden Entfernungswirkung ist ebenso wie die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes stärker in Gebieten mit einer hohen Landschaftsbildqualität. Gleichzeitig ist die abnehmende Entfernungswirkung in Landschaften mit einer geringen Landschaftsbildqualität nicht so stark ausgeprägt (Betakova et al.

2015). Wie dieser Zusammenhang in der Praxis angewendet werden kann, ist ebenfalls noch zu untersuchen. Flächendeckende Grundlagen zur Bewertung des Landschaftsbildes liegen dazu vor (z. B. Roth & Gruehn 2011, Roser 2013, Roth & Fischer 2019, Roth et al. 2021a/2021b).

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die Ergebnisse legen nahe, dass die abnehmende Entfernungswirkung die resultie-

rende Empfindlichkeit des Landschaftsbildes und ihre räumliche Verteilung zwar beeinflusst, aber hinsichtlich der Differenzierung in Quantilsklassen der Empfindlichkeit nicht zu grundsätzlich anderen Ergebnissen führt. Dies widerspricht der Hypothese divergierender Ergebnisse. Der einfachste Ansatz ist entsprechend der Hypothese die Anwendung der konstanten Analyse, um die Empfindlichkeit des Landschaftsbildes gegenüber Windenergieanlagen zu bewerten, bei gleichzeitig moderater Rechen-

zeit sowie hoher Auflösung. Die noch schnellere QGIS-Interpolation bewertet nicht jede Zelle einzeln, sondern interpoliert Werte. So wird zwar Zeit gespart, aber die Berechnung ist nicht so genau. Trotzdem ist die QGIS-Interpolation der Beobachter-Sichtfeld-Analyse als effizienteste Methode vorzuziehen, wenn die kontinuierlich abnehmende Entfernungswirkung berücksichtigt werden soll. Die QGIS-Interpolation benötigt nur einen Bruchteil der Rechenzeit der Beobachter-Sichtfeld-Analyse

und liefert gleichzeitig fast identische Ergebnisse.

Zur Beschleunigung der Rechenzeit kann die Übersetzung in ein Python-Skript getestet werden. Mit diesem sind auch andere Methoden der Distanzberechnung jenseits der euklidischen Distanz möglich.

Durch Ground-Truthing (Feldvergleich) kann zukünftig untersucht werden, welcher Ansatz zur Abbildung der abnehmenden Entfernungswirkung am besten mit der realen Wahrnehmung übereinstimmt. Eine fo-

tobasierte Online-Umfrage, die existierende Windparks zeigt, könnte wertvolle empirische Ergebnisse liefern, ebenso wie eine Vor-Ort-Befragung im Wirkungsbereich existierender Windkraftanlagen. Wenn Wissen zur realen Wahrnehmung der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds vorliegt, könnte eine allgemein anerkannte Methode zur Modellierung entwickelt werden.

Literatur

Bachfischer, R. (1978): Die ökologische Risikoanalyse. Eine Methode zur Integration natürlichen Umweltfaktoren in die Raumplanung; operationalisiert und dargestellt am Beispiel der Bayerischen Planungsregion 7 (Industrieregion Mittelfranken). Dissertation, Fachbereich Architektur, Technische Universität München.

Betakova, V.; Vojar, J.; Sklenicka, P. (2015): Wind turbines location: How many and how far? In: *Applied Energy*, 151, S. 23-31.

BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2019): Erneuerbare Energien Report. Die Energiewende naturverträglich gestalten. Bonn.

Bishop, I.; Miller, D. (2007): Visual assessment of off-shore wind turbines: The influence of distance, contrast, movement and social variables. In: *Renewable Energy*, 32, S. 814-831.

BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.) (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Berlin.

Breuer, W. (2001): Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen für Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes. Vorschläge für Maßnahmen bei Errichtung von Windkraftanlagen. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 8 (33), S. 237-245.

Bughmans, T.; van Garderen, M.; Gillings, M.

(2018): Introducing visual neighbourhood configurations for total viewsheds. In: *Journal of Archaeological Science*, 96, S. 14-25.

BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN (o. J.): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. <https://cms.gruene.de/uploads/documents/Koalitionsvertrag-SPD-GRUENE-FDP-2021-2025.pdf>, Zugriff 11/2021.

Cuckovic, Z. (2016): Advanced viewshed analysis: a Quantum GIS plug-in for the analysis of visual landscapes. In: *Journal of Open Source Software*, 4 (1), S. 32.

De Vries, S.; de Groot, M.; Boers, J. (2012): Eyesores in sight: Quantifying the impact of man-made elements on the scenic beauty of Dutch landscapes. In: *Landscape and Urban Planning*, 105 (1-2), S. 118-127.

Europäische Kommission (o. J.): Klima- und energiepolitischer Rahmen bis 2030. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_de, Zugriff 07/2021.

FA Wind – Fachagentur zur Förderung eines natur- und umweltverträglichen Ausbaus der Windenergie an Land (Hrsg.) (2016): Entwicklung der Rechtsprechung zur raumordnerischen Steuerung der Windenergienutzung. Berlin.

FA Wind – Fachagentur Windenergie an Land (Hrsg.) (2020): Analyse der Ausbausituation der

Windenergie an Land im 1. Halbjahr 2020. Berlin.

Fischer, C. (2018): GIS-basierte Einsehbarkeitsanalyse zur flächendeckenden Bewertung der Empfindlichkeit des Landschaftsbilds gegenüber oberirdischen Höchstspannungsleitungen. In: *UVP-report* 32 (3), S. 129-134.

Fischer, C.; Roth, M. (2020): Empfindlichkeit des Landschaftsbildes. Bewertung durch großräumige Einsehbarkeitsanalysen. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 52 (6), S. 280-287.

Gerhards, I. (2003): Die Bedeutung der landschaftlichen Eigenart für die Landschaftsbildbewertung. In: *Cultura*, Nr. 33. Verlag des Instituts für Landespflege der Universität Freiburg.

Gibbons, S. (2015): Gone with the wind: Valuing the visual impacts of wind turbines through house prices. In: *Journal of Environmental Economics and Management*, 72, S. 177-196.

Hildebrandt, S. (2015): Methoden der Sichtbarkeitsanalyse von Windenergieanlagen. Theorie und Praxis. In: *UVP-report*, 29 (2), S. 66-69.

Ioannidis, R.; Koutsoyiannis, D. (2020): A review of land use, visibility and public perception of renewable energy in the context of landscape impact. In: *Applied Energy*, 276, 115367.

Jürgens, H. (2004): Erhebung anthropometri-

scher Maße zur Aktualisierung der DIN 33 402 – Teil 2. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschungsbericht, Fb 1023. Wirtschaftsverlag NW. Bremerhaven.

Lima, F.; Ferreira, P.; Vieira, F. (2013): Strategic impact management of wind power projects. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, S. 277-290.

Möller, B. (2006): Changing wind-power landscapes: regional assessment of visual impact on land use and population in Northern Jutland, Denmark. In: *Applied Energy*, 83, S. 477-494.

Molnarova, K.; Sklenicka, P.; Stiborek, J.; Svobodova, K.; Salek, M.; Brabec, E. (2012): Visual preferences for wind turbines: Location, numbers and respondent characteristic. In: *Applied Energy*, 92, S. 269-278.

Nohl, W. (1993): Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes durch mastenartige Eingriffe. Materialien für die naturschutzfachliche Bewertung und Kompensationsermittlung. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen. Kirchheim b. München.

Nohl W. (2001): Landschaftsplanung. Ästhetische und rekreative Aspekte. Konzepte, Begründungen und Verfahrensweisen auf der Ebene des Landschaftsplans. Patzer, Berlin.

Paul, H.-U.; Uther, P.; Neuhoff, M.; Winkler-Hartenstein, K.; Schmidkunz, H.; Grossnick, J. (2004): GIS-gestütztes Verfahren zur Bewertung visueller Eingriffe durch Hochspannungsfreileitungen. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 35 (5), S. 139-144.

R Core Team (2020): R. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

Roser, F. (2013): Ist die Schönheit der Landschaft berechenbar? Bereitstellung einer landesweiten Planungsgrundlage für das Schutzgut Landschaftsbild in Baden-Württemberg. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 45 (9), S. 265-270.

Roth, M.; Bruns, E. (2016): Landschaftsbildbewertung in Deutschland – Stand von Wissenschaft und Praxis. BfN-Skripten 439

Roth, M.; Fischer, C. (2019): Indikatorbasierte GIS-operationalisierte Landschaftsbildbewertung für den Freistaat Thüringen. In: *AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik*, 5-2019, S. 403-416.

Roth, M.; Gruehn, D. (2011): Flächendeckende Landschaftsbildanalyse und -bewertung als Beitrag zum Gutachtlichen Landschaftsprogramm sowie zur Fortschreibung des Moorschutzkonzeptes (Hauptstudie). LLP-report 024. TU Dortmund, Fakultät Raumplanung, Lehrstuhl LLP.

Roth, M.; Gruehn, D. (2014): Digital Participatory Landscape Planning for Renewable Energy – Interactive Visual Landscape Assessment as Basis for the Geodesign of Wind Parks in Germany. In: Wissen Hayek, U.; Fricker, P.; Buhmann, E. (Eds.): *Peer Reviewed Proceedings of Digital Landscape Architecture 2014 at ETH Zurich*. Wichmann, Berlin/Offenbach, S. 84-94.

Roth, M.; Hildebrandt, S.; Walz, U.; Wende, W. (2021a): Large-Area Empirically Based Visual Landscape Quality Assessment for Spatial Planning – A Validation Approach by Method Triangulation. In: *Sustainability*, 13 (4), 1891.

Roth, M.; Hildebrandt, S.; Roser, F.; Schwarzv. Raumer, H.-G.; Borsdorff, M.; Peters, W.; Weingarten, E.; Thylmann, M.; Bruns, E. (2021b): Entwicklung eines Bewertungsmodells zum Landschaftsbild beim Stromnetzausbau. BfN-Skript 597.

Scottish Natural Heritage (2017): *Siting and designing wind farms in the landscape. Guidance.*

Shang, H.; Bishop, I. (2000): Visual thresholds for detection, recognition and in landscape settings. In: *Journal of Environmental Psychology*, 20, S. 125-140.

Store, R.; Karjalainen, E.; Haara, A.; Leskinen, P.; Nivala, V. (2015): Producing a sensitivity assessment method for visual forest landscapes. In: *Landscape and Urban Planning*, 144, S. 128-141.

Sullivan, R.; Kirchner, L.; Lathi, T.; Roché, S.; Beckmann, K.; Cantwell, B.; Richmond, P. (2012): Wind turbine visibility and visual impact threshold distances in western landscapes. In: 37th Annual NAEP Conference on Science, Politics and Policy: Environmental Nexus, National Association of Environmental Professionals, 21.-24. Mai 2012, Portland, Oregon, S. 897-942.

Täuber, M.-A.; Roth, M. (2011): GIS-basierte

Sichtbarkeitsanalysen. Ein Vergleich von digitalen Gelände- und Landschaftsmodellen als Eingangsdaten von Sichtbarkeitsanalysen. In: *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)*, 136 (5), S. 293-301.

Wagtendonk, A.; Vermaat, J. (2014): Visual perception of cluttering in landscapes: Developing a low resolution GIS-evaluation method. In: *Landscape and Urban Planning*, 124, S. 85-92.

Wróżyński, R.; Sojka, M.; Pyszny, K. (2016): The application of GIS and 3D graphic software to visual impact assessment of wind turbines. In: *Renewable Energy*, 96, S. 625-635.

Zeinler, K. (2020): Fuzzy-Viewshed-Analyse auf Basis des vertikalen Sehwinkels zur Bestimmung der visuellen Dominanz von Windkraftanlagen. In: *gis.Science*, 4/2020, S. 163-173.

Zube, E.; Sell, J.; Taylor, J. (1982): Landscape perception: research, application and theory. In: *Landscape Planning*, 9, S. 1-33.