

Standortalternativen für die Windenergie – Berechnung des Ertragspotenzials auf Offenland- und Waldstandorten in Bayern

Nikolas Ludwig · Stephan Bosch

Eingegangen: 11. Oktober 2013 / Angenommen: 9. Mai 2014 / Online publiziert: 7. Juni 2014
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Zusammenfassung Die Berücksichtigung alternativer Standorte für erneuerbare Energien darf nicht erst eine Reaktion auf die schwindende Akzeptanz der Energiewende sein. Sie sollte vielmehr am Beginn jeder Standortplanung stehen und dadurch einen transparenten, demokratischen Aushandlungsprozess zur nachhaltigen Flächennutzung ermöglichen. Standortalternativen können sich zum einen daraus ergeben, dass ein Standortsuchraum durch Minimierung bzw. Maximierung von Restriktionskriterien sukzessive erweitert bzw. eingeschränkt wird. Zum anderen lässt sich ein Standortsuchraum um eine bislang nicht ins Standortkalkül miteinbezogene Flächenkategorie erweitern. Beide Aspekte werden im Folgenden aufgegriffen, wenn es darum geht, räumliche Korridore zur Umsetzung der bayerischen Windenergiewende zu erarbeiten. Die Raummustermuster, die sich aus den GIS-gestützten Standortanalysen für Windenergieanlagen ergeben, können der Raumordnung als Grundlage zur Ausweisung von Ausschluss-, Vorbehalt- und Vorranggebieten dienen. Allein ein einheitliches, auf Potenzialanalysen basierendes Vorgehen der regionalen Planungsverbände kann einen Flickenteppich von Energiekonzepten verhindern und Standortplanungsprozessen den Weg hin zu einer ausgewogenen Raumentwicklung weisen. Daher besteht das Ziel des Beitrags darin, die windenergetische Eignung von Offenland- und Waldstandorten

zu prüfen und jene räumlichen Muster der Windenergie zu identifizieren, die nicht nur den quantitativen Vorgaben des bayerischen Windenergieerlasses, sondern darüber hinaus dem qualitativen Anspruch einer größtmöglichen sozial-ökologischen Verträglichkeit Rechnung tragen.

Schlüsselwörter Standortplanung · Windenergie · Erneuerbare Energien · Wald · Offenland · Energiekonzept · Flächennutzungskonflikte · Bayern

Alternative Sites for Wind Power: Calculation of the Output Potential from Sites in Open Landscape and Forest Territory in Bavaria, Germany

Abstract The consideration of alternative sites for renewable energies should not only be a reaction to dwindling acceptance of the transformation of the energy system. Rather it should be incorporated at the beginning of any site planning process and thereby enable transparent, democratic negotiations about sustainable land use. On the one hand, alternative sites can result from successively expanding or limiting the search area for sites by mini- or maximizing restriction criteria. On the other hand, a certain search area may be extended by considering a category of space not previously included in the site calculation process. Both aspects will be discussed in the following attempt to develop spatial corridors for the implementation of the transformation of the Bavarian wind energy system. The spatial patterns resulting from the GIS-based site analysis for wind power plants may serve as a basis for the allocation of exclusion, restriction, and priority areas in regional planning. Simply standardizing procedures among the various regional planning associations based on potential analysis may prevent a patchwork of energy strategies and may

Dr. S. Bosch, Dipl.-Geogr. (✉)
Lehrstuhl für Humangeographie, Universität Augsburg,
Alter Postweg 118,
86159 Augsburg, Deutschland
E-Mail: stephan.bosch@geo.uni-augsburg.de

N. Ludwig, Dipl.-Geogr.
BayWa r.e. renewable energy GmbH,
Herzog-Heinrich-Straße 13,
80336 München, Deutschland
E-Mail: nikolas.ludwig@baywa-re.com

guide site planning processes towards a balanced spatial development. It is the main goal of this study to investigate the suitability concerning usage for wind power of sites on both open landscapes as well as in forest territories. Thereby those spatial patterns of wind power are being identified that not only meet the specifications of the “bavarian wind decree”, but furthermore satisfy the qualitative demand for a maximum socio-ecological compatibility.

Keywords Site planning · Wind energy · Renewable energies · Forest · Open landscape · Energy concept · Land use conflict · Bavaria

1 Hintergrund

1.1 Energiewende als nationales Pilotprojekt

In der deutschen Gesellschaft besteht grundsätzlich Einigkeit darüber, den Ausbau von erneuerbaren Energien zu Lasten der noch dominierenden fossilen und nuklearen Kraftwerkskapazitäten voranzutreiben. Zwölf Jahre nach Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) konnten die dezentral angeordneten Wind-, Biomasse-, Photovoltaik- und Wasserkraftanlagen bereits 22% (136 TWh) der Bruttostromerzeugung decken (vgl. Agentur für Erneuerbare Energien 2013). Jenseits dieser dynamischen Entwicklung besteht die Hoffnung, dass, wenn die anstehenden Probleme beim Ausbau der Stromnetze und bei der Sicherung einer grund- und spitzenlastfähigen Stromversorgung überwunden sind, die Energiewende Grundlage für einen wirtschaftlichen Aufschwung sein kann (vgl. Bundesregierung 2011). Jedoch ist zu betonen, dass einerseits der Netzausbau nur mäßig vorankommt (Tenbohlen/Probst/Wajant 2014: 114), andererseits vielversprechende Speichertechnologien erst am Beginn des Produktlebenszyklus stehen. Nitsch/Pregger/Scholz et al. (2010: 78) rechnen beispielsweise erst für das Jahr 2040 mit der Marktfähigkeit von erneuerbarem Methan, jenem chemischen Energiespeicher, der mittels *Power-to-Gas*-Anlagen gewonnen wird und eine raum-zeitliche Entkopplung von Energieangebot und -nachfrage erlaubt (vgl. Rieke 2011). Demgegenüber werden die bewährten Reservekraftwerke, die angesichts des zunehmenden Anteils intermittierender Energiequellen am Energiemix immer wichtiger für die Stabilisierung der Stromversorgung werden, früher als erwartet zum Marktaustritt gezwungen. Speziell Gaskraftwerke leiden unter den sinkenden Börsenpreisen für Strom (vgl. EEX 2013). Dabei ist es gerade die stetig anwachsende Solareinspeisung, die zur mittäglichen Spitzenlastzeit den Börsenpreis drückt und die konventionellen Kraftwerke im Netz verdrängt (vgl. Heide 2013).

Zweifelsohne handelt es sich bei der Energiewende um ein risikobehaftetes nationales Pilotprojekt. Die ener-

giepolitischen und energiewirtschaftlichen Maßnahmen Deutschlands werden mit großem Interesse von Schwellenländern wie Brasilien, China und Südafrika beobachtet und stoßen dabei auf mehr Verständnis, als dies im Inland der Fall ist (Konrad-Adenauer-Stiftung 2013: 9). Auf europäischer Ebene hat sich Deutschland hingegen energiepolitisch isoliert, denn der Rückbau der nuklearen Kraftwerkskapazitäten bis zum Jahr 2022 steht konträr zur Strategie vieler Nachbarstaaten, die den Ausbau von Atomkraftwerken sogar forcieren werden (Briese/Hoemske 2010: 16 f.). Die Etablierung einer emissionsarmen und ressourcenschonenden Energiewirtschaft auf internationaler Ebene hängt damit auch vom Erfolg des deutschen Weges ab (vgl. Konrad-Adenauer-Stiftung 2013). In der Tat kann sich der Vorbildcharakter nur dann entfalten, wenn die Energiewende ökonomisch, ökologisch und sozial gelingt. Dies ist nicht sichergestellt, denn starke Kritik am planwirtschaftlichen Charakter des EEG (vgl. Frondel/Schmidt/aus dem Moore 2011), schlechte Ökobilanzen von Technologien (vgl. Bosch 2012), Technisierung gewachsener Kulturlandschaften (vgl. Scheidler 2010) sowie damit einhergehende Bürgerproteste (vgl. Weiss 2013) offenbaren die Schwachstellen des Energiekonzeptes.

1.2 Bedeutung der Standortfrage

Aus standorttheoretischer Perspektive stellt sich die Frage, wie es speziell bei der Windenergie dazu kommen konnte, dass dieser einst mit Begeisterung wahrgenommene Technologiepfad¹ mittlerweile als landschaftlicher Fremdkörper mit Verunstaltungspotenzial (vgl. Scheidler 2010), weniger als Element eines nachhaltigen Gesellschaftssystems (vgl. BMU 2011) wahrgenommen wird. Da der Ausbau der Windenergie stark durch Vorgaben der Raumordnung gesteuert wird, muss die Fehlersuche bei den regionalen Planungsverbänden ansetzen: Aufgrund der Auswirkungen auf das Landschaftsbild, des Flächenbedarfes und der Anlagentgröße handelt es sich bei der Errichtung von Windenergieanlagen um überörtlich raumbedeutsame Projekte. Ziel der Raumordnung ist deshalb die Konzentration von Windenergieanlagen an raumverträglichen Standorten mit Möglichkeiten zur Netzeinspeisung, um einer Zersiedelung der Landschaft vorzubeugen. In Abstimmung mit konkurrierenden Flächennutzungen sind die regionalen Planungsverbände deshalb dazu aufgefordert, Vorrang-, Vorbehals- und Ausschlussgebiete für Windenergieanlagen als Bestandteil eines Regionalplans festzulegen (Bayerische Staatsregierung 2013: 68 ff.). Einig/Heilmann/Zaspel (2011: 34 ff.)

¹Vgl. [http://www.erneuerbare-energien.de/detailansicht/artikel/forsaumfrage-mehrheit-der-bundesbuenger-ist-fuer-ausbau-erneuerbarer-energien-bei-unverminderten-foerderung/?tx_ttnews\[backPid\]=222&cHash=d11cef845cf1c2742d63c884e50b090](http://www.erneuerbare-energien.de/detailansicht/artikel/forsaumfrage-mehrheit-der-bundesbuenger-ist-fuer-ausbau-erneuerbarer-energien-bei-unverminderten-foerderung/?tx_ttnews[backPid]=222&cHash=d11cef845cf1c2742d63c884e50b090) (28.02.2014).

konnten nachweisen, dass die Methoden zur Festlegung von Vorrang-, Vorbehals- und Ausschlussgebieten selbst zehn Jahre nach Einführung des EEG keiner einheitlichen Logik folgten. Speziell bayerische Planungsverbände kamen dem im Landesentwicklungsprogramm (LEP) formulierten Auftrag (Bayerische Staatsregierung 2013: 69 f.), der Windenergie in ausreichendem Maße Raum zu verschaffen, nicht nach. Aufgrund des Energiekonzeptes „Energie Innovativ“ (Bayerische Staatsregierung 2011) hat sich die Situation in Bayern jedoch maßgeblich verändert, denn 16 der 18 regionalen Planungsverbände berücksichtigen bereits die Belange der Windenergie (beispielhaft die „Zehnte Fortschreibung des Regionalplans der Region Südostoberbayern“, die die Grundlage zur Ausweisung von 62 Vorrang- und 9 Vorbehaltsgebieten bildet; vgl. Regionaler Planungsverband Südostoberbayern 2013).

Ein mittlerweile einheitlicheres Vorgehen der regionalen Planungsverbände kann jedoch nicht verhindern, dass sich der Ausbau der Windenergie auf den nicht beplanten Flächen einer an objektiven Standortfaktoren ausgerichteten Planung entzieht. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Errichtung von Windenergieanlagen im Außenbereich einer Gemeinde prinzipiell möglich ist, wenn dem Privilegierungstatbestand nicht § 35 Abs. 3 BauGB (Beeinträchtigung öffentlicher Belange) entgegensteht. Diese standortplanerische Freiheit kann dabei von sämtlichen Akteuren in Anspruch genommen werden. Hierzu ist zu erwähnen, dass es sich bei der Standortwahl für Windenergieanlagen um relativ kleine Unternehmungen handelt, die zum Teil von sogenannten unabhängigen Stromerzeugern, das heißt einzelnen Privatpersonen, kleineren Bürgerinitiativen, gewerblichen Eigenversorgern oder Landwirten, getätigten werden (vgl. Klagge/Brocke 2013). Darüber hinaus weisen Becker/Gailing/Naumann (2012: 43) darauf hin, dass Kommunen die Strategie verfolgen, – durch Rückkauf veräußerter Anteile sowie Neugründung von Unternehmen – die Energieversorgung wieder verstärkt in die eigenen Hände zu nehmen. Derartige Unternehmungen zeichnen sich eben dadurch aus, dass Standortsuchräume von vornherein auf den lokalen oder regionalen Aktionsraum beschränkt werden. Von alternativen, ökonomisch und sozialökologisch besseren Standortoptionen außerhalb des jeweiligen Aktionsraumes oder – im Falle von Kommunen – außerhalb der eigenen Flächennutzungsplanung wird dabei in der Regel abgesehen, nicht zuletzt da die unabhängigen Erzeuger über einen guten Informationsstand hinsichtlich der Ausstattung mit Standortfaktoren in der unmittelbaren Umgebung verfügen und direkten Einfluss auf die Gestaltung der Flächennutzungsplanung nehmen können (z. B. Festlegung von Konzentrationszonen). Schmude (1994: 78) betont, dass es aufgrund der limitierenden Faktoren Information, Geld und Zeit nicht möglich ist, alle Standortalternativen ins Planungskalkül miteinzubeziehen. Selbst innerhalb des Standortsuchraums

geht es eher um eine vereinfachende, flächenbezogene Bewertung von Standortfaktoren, als um die Identifizierung des Standortoptimums (vgl. Smith 1971), das heißt, man gibt sich mit der Ermittlung von räumlichen Gewinnzonen zufrieden und ist nicht zwangsläufig an Gewinnmaximierung oder sozialökologischer Optimierung interessiert. Innerhalb dieser *Margins* besitzen standortplanerische Entscheidungen eine gewisse Flexibilität (Dicken/Lloyd 2013: 83 ff.), die gegebenenfalls auch zur Willkür ausarten kann und die räumliche Ordnung entstellt. Die Errichtung von Windenergieanlagen in räumlicher Nähe zu den Anlagenbetreibern lässt sich auch dadurch erklären, dass – wie Klandt (1984: 59) aufzeigt – bei kleineren Unternehmungen das „mikrosoziale Umfeld“ Einfluss auf die Wahl des Standortes haben kann. Die Standorte der Windenergieanlagen und der räumliche Wirkungsbereich der Menschen, die diese Projekte vorangetrieben haben, sind oftmals kongruent).² Subjektive Wertvorstellungen und persönliche Präferenzen, aber auch Nachahmungseffekte (Schätzl 2001: 60, 63) sowie suboptimale unternehmerische Entscheidungen (vgl. Pred 1967) bezüglich der Frage, welcher Standort für die Windenergieanlage geeignet ist, können ihrerseits zu einem unausgewogenen Standortmuster führen. Des Weiteren macht Schöbel-Rutschmann (2012: 22) auf den Widerspruch aufmerksam, dass eine Standortplanung, die den Ausbau der Windenergie auf vorbelastete Standorte, wie Konversionsflächen, Autobahntrassen und Schienenwege, zurückdrängt, nicht dem Auftrag des Raumordnungsgesetzes zur Schaffung gleichwertiger Lebensverhältnisse entsprechen kann. Der Ausbau von Windenergieanlagen kann aus landschaftsarchitektonischer Sicht auch in schönen Landschaften erfolgreich vorangetrieben werden, und zwar dann, wenn in der Anordnung und Formation der Anlagen ein gelingendes Natur-Kultur-Verhältnis sichtbar wird (Schöbel-Rutschmann 2012: 96 ff.).

Wird der Ausbau durch größere Unternehmen, wie beispielsweise Stadtwerke oder Regionalversorger vorangetrieben, deren Bedeutung für den Regenerativmarkt innerhalb der letzten Jahre stark angewachsen ist (vgl. Klagge/Brocke 2013), ist davon auszugehen, dass bei der Wahl eines Standortes der Faktor Macht von Bedeutung sein kann. Standortfaktoren sind nach Bathelt/Glückler (2002: 173) keine festgelegten Größen, sondern Variablen ständig wiederkehrender Aushandlungsprozesse. Das Streben nach Wachstum nötigt Unternehmen dazu, die Kontrolle über die wesentlichen Ressourcen zu erlangen. Die Nutzung der Ressource Raum wird dabei unternehmensspezifischen Zielen untergeordnet. Das gesamtgesellschaftliche Interesse einer ausgewogenen Raumentwicklung rückt so ins Abseits und prägt dabei das Image der Windenergie in einer Weise, die die

²Vgl. die Aktivität der Gemeinde Wildpoldsried unter <http://www.wildpoldsried.de/index.shtml?windkraft> (03.03.2014).

Standortakquise zukünftiger Projekte erschwert. Aufgrund des immer größeren Einflusses von spezialisierten Projektentwicklern, die höchst professionell und ausgestattet mit hervorragenden Informationsverarbeitungskapazitäten geeignete Windstandorte innerhalb sehr großer Standortschräume identifizieren, ist davon auszugehen, dass sich die gesamtwirtschaftliche Flächenakquise zumindest in Richtung ökonomisches Optimum bewegen wird.

Es bedarf jedoch auch einer sozialökologischen Einbettung von Technologien. Nach Bosch (2012: 146 ff.) hängt der Erfolg einer Standortentscheidung nicht mehr primär von den unmittelbar ökonomisch relevanten natürlichen Standortfaktoren ab, vielmehr steht die sozialökologische Einbettung einer Technologie im Vordergrund. Dieser Ansatz ist der Annahme geschuldet, dass vor dem Hintergrund technologischer Optimierung und industrieller Reife natürliche Standortfaktoren als raumdifferenzierende Größe an Bedeutung verlieren werden. An ihre Stelle treten verstärkt schwieriger zu quantifizierende Aspekte, die sich kumulativ im Standortfaktor Akzeptanz widerspiegeln. Die mittelbare ökonomische Relevanz dieses Faktors ist jedoch nicht zu unterschätzen, denn ein positives Image erneuerbarer Energien könnte die gesamtwirtschaftliche Flächenakquise für regenerative Technologien erheblich erleichtern. Dabei geht es nicht darum, einen maximal möglichen Ausbau anzustreben, nur um dadurch den regenerativen Anteil an der Stromversorgung sukzessive zu erhöhen. Eine intelligente Umstellung der Energiewirtschaft auf dezentrale Versorgungsstrukturen ist vordergründig darauf angewiesen, den Bürgern Alternativen einer verantwortungsbewussten Standortakquise zu vermitteln. Dies gilt im Speziellen für jene Regionen, die bereits stark durch konkurrierende Flächennutzungen (z. B. Tourismus, Naturschutz, Denkmalschutz, Militär) beplant sind und deren Bewohner äußerst sensibel auf Veränderungen im landschaftlichen Gefüge reagieren.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund der Ereignisse in Fukushima und der darauf basierenden Strategie der Bundesregierung, alle Atomkraftwerke bis zum Jahr 2022 abzuschalten, hat der stark von der Kernenergie abhängige Freistaat Bayern eine „Windenergewende“ initiiert. Nach einer großen Euphorie im Jahr 2011 – das Jahr, in dem der bayerische Windenergieerlass erschien und Genehmigungsverfahren eine Vereinfachung erfuhren – wurde die Windbranche durch Aussagen der Landesregierung verunsichert, die eine Vergrößerung von Abstandsfächern zu Siedlungskörpern beinhalteten. Anfang Februar 2014 wurde schließlich der Regelabstand zwischen Windrädern und Wohnsiedlungen im Rahmen eines Kabinettsbeschlusses auf zwei Kilometer festgelegt.

Gemäß den derzeit bestehenden technologischen Voraussetzungen entspricht dies in etwa der zehnfachen Gesamthöhe einer Windenergieanlage. Ist die Mehrheit der Bürger einer Kommune jedoch dazu bereit, geringere Abstandsfächern zu akzeptieren, so kann die Windenergiebranche nach wie vor das auf Abstandsfächern von 800 m bezogene, größere Standortpotenzial erschließen (relative Privilegierung) (Scharmitzky/Szymanski/Sebald 2014: 33). Auch wenn sich diese hitzigen Diskussionen, die zu einer großen Verunsicherung der Windindustrie beigetragen haben, wieder beruhigt haben, wurde doch deutlich, dass die Standortfrage die Achillesferse der Energiewende ist. Angesichts des ambitionierten bayerischen Energiekonzepts „Energie Innovativ“, das eine Steigerung des Anteils der Windenergie am bayerischen Stromverbrauch auf 10% bis zum Jahr 2021 vorsieht und hierzu den Ausbau von bis zu 1.500 zusätzlichen Windenergieanlagen fordert (Bayerische Staatsregierung 2011: 13), gilt es, die räumlichen Dimensionen dieses Vorhabens zu begreifen. Zweifelsohne liefert das vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit zur Verfügung gestellte Online-Informationssystem „Gebietskulisse Windkraft“ (StMUG 2013) – eine bayernweite Umweltplanungshilfe für Gemeinden – wesentliche Einblicke in die räumlichen Grenzen und Möglichkeiten einer Windenergewende (vgl. LfU 2012a). Das Informationssystem visualisiert im Maßstab 1:100.000, auf welchen Flächen Windenergieanlagen voraussichtlich (grün), im Einzelfall (gelb und orange) bzw. nicht (rot) möglich sind. Letztlich bestätigt diese Klassifizierung die Annahme des Bundesverbandes Windenergie (vgl. IWES 2011), dass 2% der Landesfläche ohne Weiteres für den Ausbau der Windenergie geeignet und auch zugängig sind (vgl. Sebald 2012). Schätzungen gehen jedoch davon aus, dass für die Umsetzung des bayerischen Energiekonzeptes bereits 0,2% der Landesfläche ausreichen würden (vgl. StMUG 2013). Doch Einig/Heilmann/Zaspel (2011: 35) konstatieren, dass seitens der regionalen Planungsverbände nur 0,05% der Landesfläche als Raumordnungsgebiete für die Windenergie ausgewiesen wurden.

Entsprechend den Forderungen des Bundesverbandes Windenergie und den Ergebnissen der „Gebietskulisse Windkraft“, dem Ausbau der Windenergie 2% der bayerischen Landesfläche zur Verfügung zu stellen, erwächst folgendes Problem: Die Diskrepanz zwischen dem großen Standortpotenzial von 2% auf der einen und dem relativ geringen Ausbauvorhaben von 0,2% auf der anderen Seite erhöht zwar die für die Projektentwicklung notwendige Planungsflexibilität. Sie birgt jedoch das Risiko eines ineffizienten Ausbaus, wenn es nicht gelingt, die optimalen Standorte innerhalb des zulässigen räumlichen Korridors zu identifizieren und diesen gegebenenfalls adäquate Standortalternativen zur Seite zu stellen. Folglich besteht die Herausforderung darin, jene Raummuster der 1.500 auszu-

bauenden Anlagen zu ermitteln, die sowohl ökonomisch als auch sozialökologisch sinnvoll sind. Dieser konkretisierende Aspekt, der im Rahmen der „Gebietskulisse Windkraft“ keinerlei Erwähnung findet, ist von entscheidender Bedeutung, wenn es darum geht, dem Vorwurf einer unsensiblen Integration von Windenergieanlagen in den ländlichen Raum entgegenzutreten (vgl. Nohl 2010). Nicht zuletzt stellt es sich als schwierig dar, den Bürgern derartige Eingriffe in gewachsene Landschaftsbilder zu vermitteln und die Angst vor einer übermäßigen Technisierung des ländlichen Raumes zu entkräften (Bosch/Peyke 2011: 109 f.), auch wenn Leibenath/Otto (2012: 128) in den politischen Diskussionen generell einen starken Pro-Windenergie-Diskurs erkennen. In der vorliegenden Untersuchung wird angenommen, dass die Energiewende erst dann auf größere Akzeptanz stoßen wird, wenn es auf den geeigneten und beplanbaren Flächen jeweils zu einer verantwortungsbewussten Abwägung hinsichtlich des räumlichen Kosten-Nutzen-Verhältnisses einer Standortentscheidung kommt.

Neben einer größeren Sensibilität des Ausbaus von Windenergieanlagen gegenüber regionalen und lokalen landschaftlichen sowie kulturellen Besonderheiten gilt es, der Energiebranche neue, alternative Standortoptionen zu eröffnen. Eine Strategie der Konfliktminimierung könnte darin bestehen, den Fokus der Windbranche weg vom stark genutzten Offenland hin zu bislang wenig beachteten Waldstandorten zu rücken. Die Unterscheidung dieser Raumkatagorien fehlt in der „Gebietskulisse Windkraft“ gänzlich und bedarf daher einer genaueren Betrachtung, denn Länder wie Rheinland-Pfalz haben diese Standortoption bereits seit Langem aufgegriffen (vgl. Tobias/Jung/Fallen et al. 2003). Es gibt sowohl aus ökonomischer als auch aus sozialer und ökologischer Sicht gute Gründe dafür, Waldstandorte in das Kalkül von Energiekonzepten miteinzubeziehen. Aus ökonomischer Sicht ist zu betonen, dass Wälder generell höher und damit exponierter als benachbarte Offenlandflächen liegen. Folglich ist dort mit größeren Windhöufigkeiten und höheren Erträgen zu rechnen. Die größere soziale Verträglichkeit der Nutzung von Waldstandorten liegt darin begründet, dass Waldareale in der Regel weiter von Siedlungen entfernt sind und Konflikten mit Anwohnern so vorgebeugt werden kann. Schließlich besteht der ökologische Vorteil darin, dass bedrohte Vogelarten – wie die Greifvögel Rotmilan und Wiesenweihe, die bevorzugt im Offenland jagen – außerhalb des Einflussbereiches der Windenergieanlagen wären (vgl. NABU 2006).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, die grundsätzliche Eignung von Offenland- und Waldstandorten für die Windenergienutzung – unter ökonomischen und sozialökologischen Gesichtspunkten – zu prüfen. Darüber hinaus wird aufzuzeigen sein, welche räumlichen Muster der Windenergie sowohl den quantitativen Vorgaben des bayerischen Windenergieerlasses als auch dem qualitativen Anspruch

einer größtmöglichen sozialökologischen Verträglichkeit entsprechen.

3 Methodik

3.1 Konzeptioneller Ansatz

Mittels einer GIS-gestützten Potenzialanalyse für den Untersuchungsraum Bayern werden im Folgenden drei Szenarien erstellt, die das Ertragspotenzial der Windenergie in Abhängigkeit von unterschiedlich starken räumlichen Restriktionen aufzeigen und so einen räumlichen Korridor für eine realistische Umsetzung des bayerischen Energiekonzeptes eröffnen. In Szenario 1 werden hierzu lediglich die rechtlich eindeutig definierten Restriktionsgebiete als Ausschlussflächen für die Windenergienutzung deklariert. Szenario 2 schließt darüber hinaus jene Flächen für die Windenergie aus, bei denen es in der Planungspraxis zu einer Einzelfallentscheidung kommen würde. Szenario 3 reduziert den Standortsuchraum schließlich auf jene Flächen, die einen aus ökologischer und sozialer Sicht völlig unbedenklichen Ausbau der Windenergie garantieren würden. Auf den jeweils verbleibenden Flächen wird die Wirtschaftlichkeit zu prüfen sein. Dabei werden alle restriktionsfreien Areale mit Windenergieanlagen bestückt sowie deren Ertragspotential anhand von Winddaten des Deutschen Wetterdienstes berechnet. Anschließend gilt es, die 1.500 ertragreichsten Standorte zu selektieren und das Verhältnis von Offenland- und Waldstandorten zu beschreiben.

3.2 Standortalternative Wald

Sicherlich gibt es Bedenken gegenüber der Strategie, Waldstandorte in die Planungen zur Energiewende miteinzubeziehen, denn der Wald steht symbolisch für eine intakte sowie unberührte Natur und bedient darüber hinaus zahlreiche gesellschaftliche Funktionen, wie Erholung, Forstwirtschaft und Jagd (vgl. Ratzbor 2010; Riegert/Fleer 2010). Darüber hinaus regte der Wald von jeher die Phantasie der Menschen an. Besonders in der Romantik wurde der deutsche Wald in zahllosen Gedichten, Opern und Märchen thematisiert und konnte durch diese Überlieferungen seine mystische Wirkung bis heute bewahren (Arens 2010: 300 ff.). Eine Technisierung dieses geheimnisvollen Ortes durch Windenergieanlagen läuft folglich Gefahr, als unsensibel zu gelten. Laut Wippermann/Wippermann (2010: 25 ff.) gehen 10% der Deutschen ab einem Alter von 20 Jahren mehrmals pro Woche und 13% einmal pro Woche in den Wald. Demgegenüber gehen 16% nie und 37% nur sehr selten dorthin. Bei den meisten Waldbesuchen stehen Freizeitaktivitäten im Vordergrund. Der Wald ist für viele ein Ort der Erholung und Entspannung. So nutzen ihn 55%

zum Spazierengehen, 42 % um die Natur zu erleben und zu beobachten. Der Wald ist demnach ein bedeutender Lebens- und Ausgleichsraum und des Weiteren ein Ort, der von 77 % der Deutschen mit „Natur“ assoziiert wird.

Aufgrund der großen Anzahl von Waldflächen in Bayern, die durchschnittlich von weniger als einem Besucher pro Tag und Hektar besucht werden (Koller 2013), kann gefolgert werden, dass es bei den meisten Waldstandorten kaum zu Konflikten zwischen Windenergieanlagen und Erholungs- sowie Freizeitfunktion kommen wird. Werden die in den Waldfunktionsplänen gekennzeichneten Waldbereiche, die von der Bevölkerung besonders stark genutzt werden, von der Windenergienutzung ausgenommen, ist die soziale Eignung von Waldflächen als Standort für Windenergieanlagen gewährleistet. Durch die Konzentration von Windenergieanlagen auf Areale, die bereits forstwirtschaftlich intensiv genutzt werden – dadurch verkehrsinfrastrukturell gut erschlossen bzw. erreichbar sind – und somit eine geringe Erholungsfunktion aufweisen, lassen sich darüber hinaus Konflikte minimieren (vgl. Bayerische Staatsforsten 2012).

3.3 Technologisch-räumliche Rahmenbedingungen

Im Rahmen der Szenarien wird vom Ausbau einer getriebelosen Schwachwindanlage (SWT-2.3-113) mit einer Nabenhöhe von 142,5 m, einem Rotordurchmesser von 113 m und einer Leistung von 2,3 MW ausgegangen. Bei der Anordnung der Windenergieanlagen muss darauf geachtet werden, dass die notwendigen Abstände, die sowohl für die Minimierung der Abschattungsverluste als auch für die Standsicherheit der Anlagen gelten, eingehalten werden. Die Windenergieanlagen dürfen in Waldgebieten in Hauptwindrichtung nicht näher als 791 m zueinander stehen, im Offenland nicht näher als 565 m. Es werden 225° als Hauptwindrichtung angenommen. Ausschlaggebend für die Festlegung dieser Abstände sind Empfehlungen des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg (UMBWL 2011). In Nebenwindrichtung sind geringere Abstände möglich. Damit ergeben sich ellipsenförmige Abstandsflächen. Da Ellipsen in Geoinformations-

systemen (GIS) nicht automatisiert erstellt werden können, müssen die Polygone alternativ mit Kreisen gefüllt werden. Während die Beplanung für gleichmäßige Rechtecke problemlos erscheint, ist diese für unregelmäßige Polygone komplex (vgl. Abb. 1).

Ein Algorithmus, der unregelmäßige Polygone automatisiert mit der maximal möglichen Anzahl von Kreisen füllt, ist in ArcGIS nicht verfügbar. Es wird daher ein alternativer Lösungsweg vorgeschlagen: Einzel- und Mehrfachstandorte werden unabhängig voneinander betrachtet. Die Polygone werden deshalb zunächst in Flächen aufgeteilt, auf denen einerseits maximal eine Windenergieanlage, andererseits mehr als eine Windenergieanlage platziert werden kann. Entscheidend ist dabei der Flächenbedarf einer Windenergieanlage. Der benötigte Abstand von 791 m in Hauptwindrichtung (vgl. Abb. 1 rechts, Diagonale c) impliziert einen Abstand in Nebenwindrichtung von 560 m (vgl. Abb. 1 rechts, Horizontale a). Dieser kann bei einer angenommenen quadratischen Fläche mit dem Satz des Pythagoras berechnet werden:

Dabei gilt: $a = b$

$$a^2 + b^2 = c^2$$

$$a^2 + b^2 = 791^2 \text{ m}^2$$

$$a = \sqrt{\frac{625681}{2}} = 559,32 \text{ m}$$

Daraus resultiert ein Abstandsflächenbedarf von $560 \times 560 \text{ m}$ und somit von $31,36 \text{ ha}$ pro Windenergieanlage. Waldflächen, für die

$$A < 62,72 \text{ ha} (= 2 \times 31,36 \text{ ha})$$

gilt, sind somit nur für eine Windenergieanlage geeignet.

Die Einhaltung der Abstände wird jedoch nicht nur durch die absolute Flächengröße, sondern auch durch deren Form bestimmt. Tatsächlich ist es möglich, unter Berück-

Abb. 1 Windenergieanlagen auf unregelmäßigen und rechtwinkligen Polygonen (WEA Windenergieanlage)

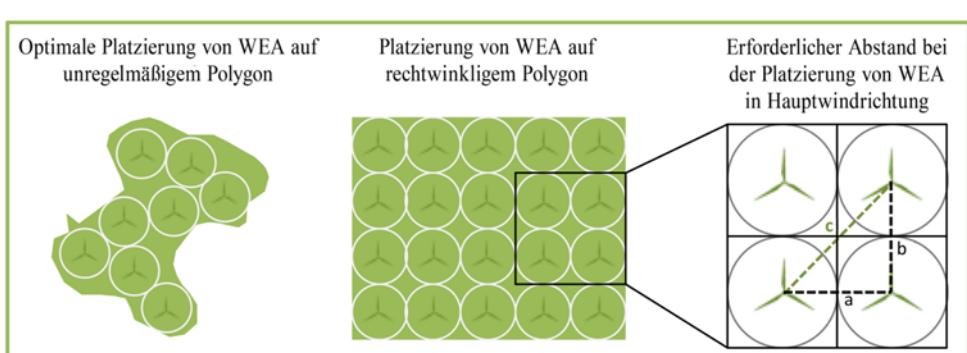
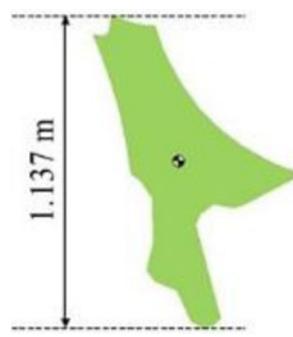


Abb. 2 Unregelmäßiges Polygon-Feature ($< 62,72 \text{ ha}$), mit Zentroid als Windenergieanlage

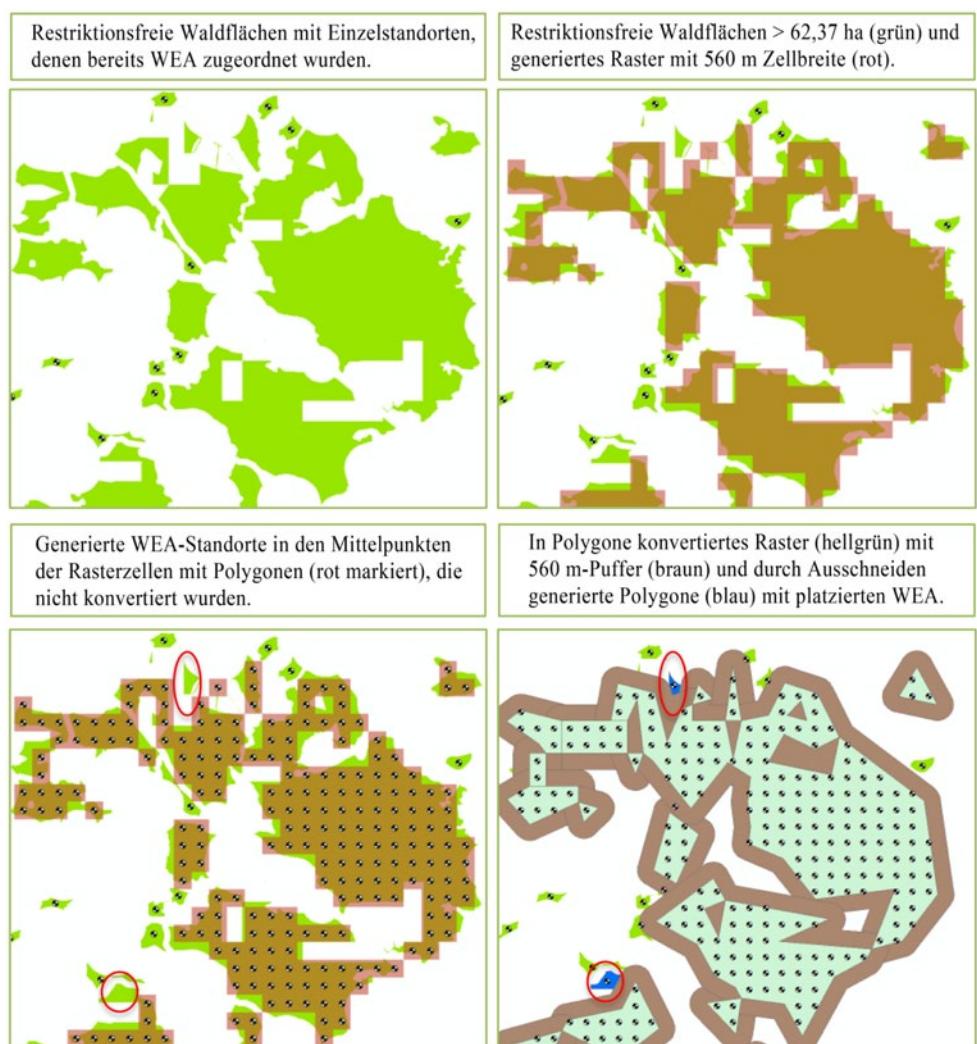


sichtigung der Mindestabstände auch auf kleineren Flächen mehr als eine Windenergieanlage zu errichten, wie Abb. 2 beispielhaft zeigt: Die Gesamtfläche des Polygons ist zwar kleiner als 62,72 ha, dennoch könnten aufgrund der länglichen Form zwei Windenergieanlagen in ausreichendem Abstand zueinander aufgestellt werden. In der vorliegenden Untersuchung wird von dieser Möglichkeit abgesehen und für alle Polygone, die Einzelstandorte mit einer Fläche von unter 62,72 ha darstellen, werden sogenannte Zentroide

erstellt. Dies bedeutet, es wird nur eine Windenergieanlage und diese im Schwerpunkt des Polygons platziert (vgl. Abb. 3, links oben).

Im nächsten Schritt werden auf allen Flächen, die größer als 62,72 ha sind, mindestens zwei Windenergieanlagen positioniert. Für diese Flächen muss jedoch eine andere als die bei den Einzelstandorten angewandte Lösung gefunden werden, da sich mit der Zentroid-Methode eben nur eine Windenergieanlage pro Polygon realisieren lässt. Deshalb werden die Polygone in ein Raster konvertiert (vgl. Abb. 3, rechts oben), wobei im Mittelpunkt jeder Rasterzelle ein Punkt-Feature generiert wird. Wird dabei die Seitenlänge der Rasterzellen auf 560 m festgelegt, sind die Punkte, welche die Windenergieanlage symbolisieren, in der Diagonale 791 m voneinander entfernt. Bedingt durch die Form der Polygone ist es möglich, dass schmale Polygonabschnitte nicht in Rasterzellen konvertiert und somit an diesen Stellen keine Windenergieanlagen platziert werden (vgl. Abb. 3, links unten). Um diese Bereiche zu lokalisieren, wird das generierte Raster wieder in Polygone konvertiert und mit

Abb. 3 Platzierung von Windenergieanlagen (WEA Windenergieanlage)



560 m gepuffert. Hierdurch können alle Bereiche der restriktionsfreien Waldfläche, die von dem erzeugten Puffer überdeckt sind, ausgeschnitten werden. Schließlich erhält man alle Polygon-Teilbereiche, die im vorangegangenen Schritt aufgrund ihrer Form nicht in Rasterzellen umgewandelt wurden. Diesen Flächen kann nun erneut über die Zentroid-Methode eine Windenergieanlage zugeordnet werden (vgl. Abb. 3, rechts unten).

3.4 Berechnung des Ertragspotenzials

Windgeschwindigkeit und Turbulenzverhalten von Luftströmungen werden durch die Oberflächenrauigkeit, Hindernisse sowie die Orographie beeinflusst. Waldflächen wirken sich daher anders auf Luftströmungen aus, als dies beim Offenland der Fall ist. Daher ist zu bewerten, inwieweit die Barriere Wald die Windhöufigkeit verändert. Die atmosphärische Grenzschicht – die untere Schicht der Troposphäre – reicht von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 600 bis 2.000 m. Oberhalb dieses Bereichs wird die Windgeschwindigkeit nicht mehr durch das Relief bestimmt; man spricht in diesem Zusammenhang vom „geostrophischen Wind“. Die atmosphärische Grenzschicht lässt sich in die Laminare Unterschicht, Prandtl-Schicht und Ekman-Schicht unterteilen. Die Strömungsverhältnisse innerhalb der Prandtl-Schicht (20 bis 60 m über Grund) werden von der Reibung an der Erdoberfläche dominiert. Je höher eine Windenergieanlage ist, desto kleiner ist der Anteil, der sich in der Prandtl-Schicht befindet und desto größer ist der Anteil, der sich in der darüber liegenden Ekman-Schicht befindet. In dieser wird der Wind zunehmend reibungsfrei und die Windgeschwindigkeiten werden höher (Hau 2003: 515 ff.). Dabei ist zu beachten, dass, je größer die Rauigkeit einer Oberfläche ist, desto größer ist der Gradient, mit dem die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe ansteigt (vgl. Abb. 4).

Die Rauigkeit der Oberfläche wird mithilfe von Rauigkeitsklassen kategorisiert. Je niedriger die Klasse einer Oberfläche, desto geringer ist der Einfluss auf die Luftströmung. Dementsprechend haben Wasserflächen die Rauigkeitsklasse 0, offenes landwirtschaftlich genutztes Gelände die Klasse 1 und kleinere Städte oder Waldgebiete die Rauigkeitsklasse 3 (Hau 2003: 526 ff.). Durch die Rauigkeit von Waldflächen entstehen starke Luftverwirbelungen. Diese reduzieren die Windgeschwindigkeit und können neben dem Ertrag auch die Standsicherheit der Windenergieanlage beeinflussen. Da der Einfluss des Geländes mit zunehmender Höhe abnimmt, empfiehlt das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UMBWL 2011: 19), dass sich die untere Rotorblattspitze mindestens in der doppelten Waldhöhe befinden sollte. Unter der Prämissen von 30 m Waldhöhe, müsste sich die Rotorblattspitze folglich in mindestens 60 m Höhe befinden. Bei einer Windenergieanlage mit 55 m Rotorblattlänge

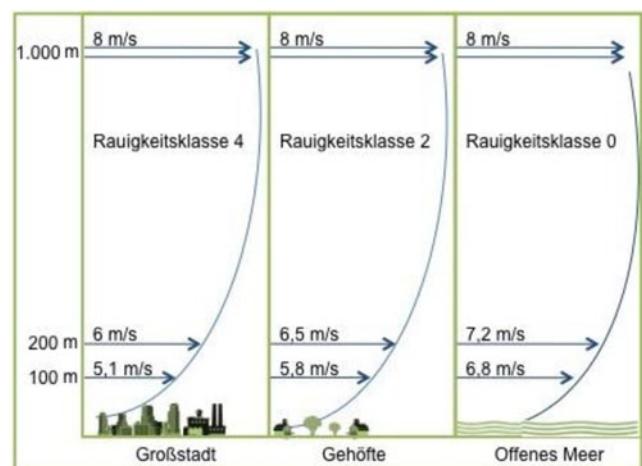


Abb. 4 Windhöufigkeit bei unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten
(Quelle: Eigene Darstellung nach Gleis (2012: 1))

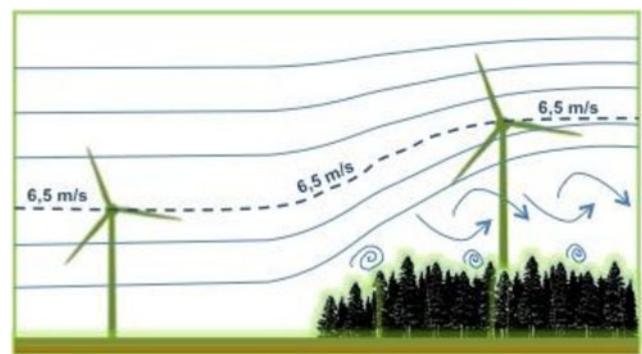


Abb. 5 Entwicklung des Windprofils im Wald (Quelle: Eigene Darstellung nach UMBWL (2011: 20))

ergibt sich so eine minimale Nabenhöhe von 115 m. Aktuelle Windenergieanlagen-Modelle weisen bereits Nabenhöhen von über 140 m auf, das heißt, der jüngste technologische Fortschritt hat die Standortoption Wald überhaupt erst möglich gemacht. Da die Turbulenzen am Waldrand stärker sind, wird für diese Areale die dreifache Waldhöhe für die untere Rotorblattspitze empfohlen. Dies würde bei einer Waldhöhe von 30 m und einem Rotorradius von 55 m eine Nabenhöhe von 145 m voraussetzen. Im Vergleich zu konventionellen Standorten im Offenland müssen Windenergieanlagen im Wald eine höhere Nabenhöhe aufweisen, um die Anhebung der Strömung und die damit verbundene Reduktion der Windgeschwindigkeit ausgleichen zu können (vgl. Abb. 5). Im Schnitt ist dabei von einer Anhebung der Nabenhöhe um zwei Drittel der Baumhöhe auszugehen. Bei 30 m Waldhöhe müsste die Nabenhöhe somit um 20 m angehoben werden (UMBWL 2011: 20).

Um jeder Windenergieanlage einen Ertrag zuweisen zu können, werden den Punkt-Features Winddaten angehängt. Als Datenbasis dient hierbei eine Windkarte des Deutschen Wetterdienstes, auf der die mittlere jährliche

Windgeschwindigkeit in 80 m Höhe dargestellt ist (Rasterweite 1 km). Da die Windgeschwindigkeiten auf 142,5 m Nabenhöhe extrapoliert werden müssen, wird die Angabe einer von der Geländeoberfläche abhängigen Rauigkeitslänge benötigt (vgl. Gleis 2012). Schließlich erhält man eine Windkarte, die für jede Rasterzelle Informationen über die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in 80 m und 142,5 m Höhe sowie die entsprechenden jährlichen Stromerträge enthält. Aufgrund der unterschiedlichen Abstandsflächen werden Windenergieanlagen auf Offenland- und auf Waldstandorten unabhängig voneinander platziert. Es ist daher möglich, dass Offenland- und Wald-Windenergieanlagen zu nah aneinander positioniert werden und in der Planungspraxis nur eine der beiden Anlagen zulässig wäre. Ein Algorithmus, der diese Flächenkonkurrenz erkennt und allein die jeweils ertragreichere Windenergieanlage selektiert, ist nicht verfügbar. Von einer manuellen Bereinigung wird aufgrund der großen Datenmenge abgesehen. Die Summe der Offenland- und Walderträge entspricht damit nicht ganz dem tatsächlichen Gesamtertragspotenzial. Die Erträge werden aufgrund dieser Ungenauigkeit um einen Unsicherheitsabschlag von 10% reduziert.

3.5 Wirtschaftlichkeit

Als Schwellenwert für die Wirtschaftlichkeit einer Windenergieanlage wird die 60%-Marke des festgelegten Referenzertrages angewendet. Nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz von 2009 waren Anlagen, die weniger als 60 % des Referenzertrages lieferten, von der Vergütung ausgenommen. Der Referenzertrag wird für jeden Windenergieanlagen-Typ für fünf Betriebsjahre berechnet. Seit der EEG-Novelle 2012 dient der Referenzertrag nur noch zur Berechnung des Zeitraums, innerhalb dessen die erhöhte Anfangsvergütung bezahlt wird. Da der Referenzertrag ein „Gütemaß bezüglich der Qualität von Standorten für die Windenergienutzung“ (Eichhorn/Bovet 2010: 96) ist, wird er als Schwellenwert für die Kategorisierung von wirtschaftlichen Standorten herangezogen. Der Referenzertrag für den festgelegten Windenergieanlagen-Typ liegt für fünf Betriebsjahre bei 47.500.000 kWh. Für ein Jahr liegt der Schwellenwert von 60% damit bei 5.700.000 kWh. Dieser Ertrag wird in Bayern annäherungsweise bei 5,2 m/s auf 80 m und 5,86 m/s auf 142,5 m Nabenhöhe erreicht (Meyer 2013). Durch die Interpolation der Ertragskarte konnte ein generalisierter Schwellenwert von 5,75 m/s ermittelt werden. Unterhalb dieser Windhöufigkeit unterschreiten die berechneten Erträge den Referenzertrag. Alle rechtlichen Eignungsräume, die eine mittlere jährliche Windgeschwindigkeit von 5,75 m/s auf 142,5 m Höhe über Grund unterschreiten, werden daher als unwirtschaftlich definiert und ausgeschlossen.

4 GIS-gestützte Potenzialanalyse

4.1 Szenario 1: Maximaler Ausbau der Windenergie

4.1.1 Planerisch-rechtliche Eignung

In Szenario 1 werden nur die rechtlich eindeutig festgelegten Ausschlussflächen für Windenergieanlagen von der Fläche Bayerns abgezogen (vgl. Abb. 6). Auf den verbleibenden Flächen werden die maximal mögliche Anzahl von Wind-

Ausschlusskriterium	Angewandter Puffer	Rechtliche Grundlage	Verwendete Datengrundlage
VERKEHR & INFRASTRUKTUR			
Autobahnen	150 m	FStrG	OpenStreetMap
Hauptstraßen	100 m	FStrG	OpenStreetMap
Bahnstrecken	150 m	RVDI	OpenStreetMap
Flughäfen und Flugplätze	Bauschutzbereich	LuftVG	OpenStreetMap
Stromleitungen	100 m	RVDI	OpenStreetMap
Umspannwerke & Photovoltaik-Anlagen	100 m	BauGB	OpenStreetMap
DWD-Wetterradar	5.000 m	DWD-G	DWD
Erdbebenmessnetz	2.000 m	LfU	LMU
Flugsicherungseinrichtungen	1.000; 2.000; 3.000; 15.000 m	LuftVG	Bayerischer Winderlass
BAUFLÄCHEN			
Geschlossene Wohnbauflächen	800 m	Winderlass	OpenStreetMap/ CORINE
Streusiedlungen < 10 ha	500 m	Winderlass	OpenStreetMap
Industrie- und Gewerbe	300 m	Winderlass	OpenStreetMap
NATURSCHUTZ			
Nationalparks	60 m	BNatSchG	LfU
Naturschutzgebiete	60 m	BNatSchG	LfU
Geschützte Biotope	60 m	BNatSchG	LfU
Vogelschutzgebiete	60 m	BNatSchG	LfU
Naturwaldreservate	60 m	BayWaldG	LWF
Gewässer	60 m	LfU	OpenStreetMap
SONSTIGE			
Vorranggebiete Rohstoffabbau	60 m	LEP	LEP
Erholungslandschaft Alpen (C)	60 m	LEP	LEP
Militärische Nachtfliegstrecken	Höhenabhängig	Winderlass	MIL-AIP
Erholungswald Stufe 1	60 m	BayWaldG	LWF
Trinkwasserschutzgebiete	-	LfU	LfU
Heilquellschutzgebiete	-	LfU	LfU

DWD = Deutscher Wetterdienst

FStrG = Bundesfernstraßengesetz

RVDI = Regionalverband Donau-Iller

LuftVG = Luftverkehrsgegesetz

BauGB = Baugesetzbuch

DWD-G = Gesetz über den deutschen Wetterdienst

LfU = Bayerisches Landesamt für Umwelt

LMU = Ludwig-Maximilians-Universität München

BNatSchG = Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz)

BayWaldG = Waldgesetz für Bayern

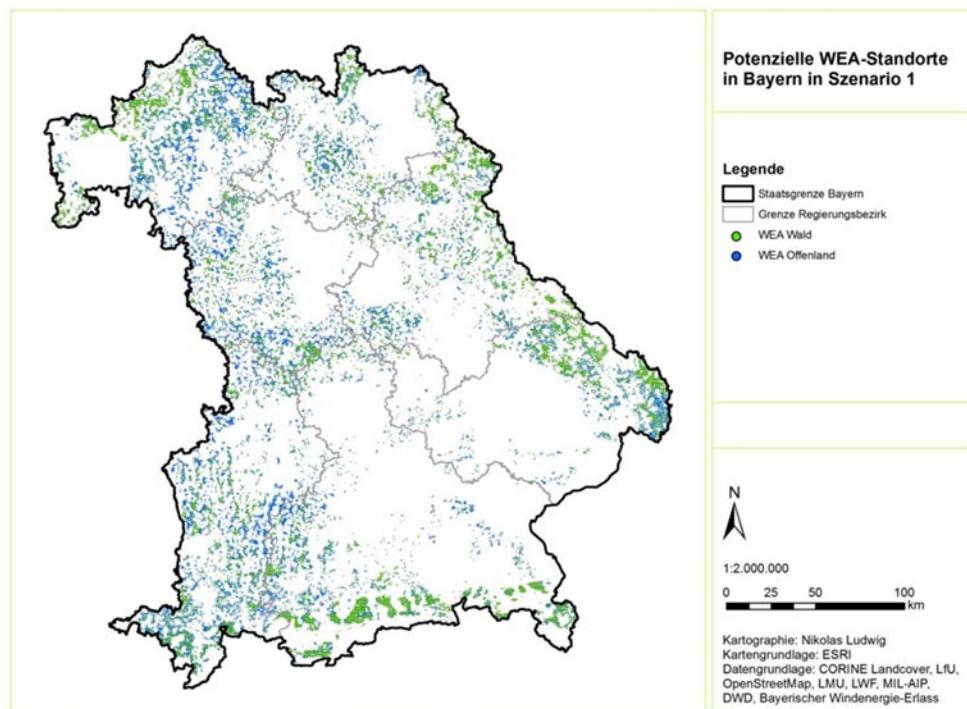
LWF = Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft

LEP = Landesentwicklungsprogramm Bayern

MIL-AIP = Militärisches Luftfahrtbuch

Abb. 6 Restriktionskriterien Szenario 1

Abb. 7 Potenzielle Standorte von Windenergieanlagen (Szenario 1)



energieanlagen platziert sowie deren Erträge berechnet. Für die Windenergie verbleiben nach Abzug der rechtlich eindeutigen Restriktionsflächen 1,24 Mio. ha bzw. 17,6% der Staatsfläche Bayerns. Davon entfallen 812.540 ha auf Wald-, 428.300 ha auf Offenlandflächen. Diese Flächen sind allerdings nicht ausnahmslos für Windenergieanlagen geeignet. Durch die Verschneidung der Restriktionsgebiete sind Polygonsplitter von nur wenigen Quadratmetern Größe entstanden. Im Wald sollten die Flächen jedoch eine Mindestgröße aufweisen, damit im Zuge von Rodungsarbeiten der Eingriff relativ zur jeweiligen Eignungsfläche nicht zu groß wird. Die erforderliche Mindestgröße eines Polygons im Wald wird daher auf die achtfache Größe der durchschnittlichen Rodungsfläche von 0,5 ha, also auf 4 ha festgelegt. Windenergieanlagen im Offenland beanspruchen eine restriktionsfreie Fläche, die der Größe ihres Fundamentes entspricht. Da häufig die vom Rotor überstrichene Fläche als Basis für Abstandskriterien herangezogen wird und darüber hinaus Flächen für die Erschließung sowie Montage- bzw. Krantellflächen benötigt werden, wird das Minimum für Windenergieanlagen im Offenland auf einen Hektar festgelegt. Alle Polygone, die nicht die entsprechende Mindestgröße erreichen, werden ausgeschlossen. Bei den Waldflächen betrifft dies 6.640 ha, im Offenland 3.600 ha. Damit verbleiben 805.900 ha Wald- und 424.700 ha Offenlandfläche.

4.1.2 Standort- und Ertragspotenzial

Das immense Standortpotenzial im Wald wird durch den Umstand relativiert, dass die Abstandsflächen dort, mit

31 ha/Windenergieanlage, größer als im Offenland (16 ha/Windenergieanlage) sind. Im Offenland lassen sich mit 26.500 Windenergieanlagen 500 mehr als im Wald errichten. Eine weitere Reduktion ergibt sich durch den Ausschluss unwirtschaftlicher Standorte. Der Flächenumfang der Waldstandorte geht dabei von 805.900 ha zurück auf 514.000 ha (-36,2%), die Offenlandstandorte verringern sich von 424.700 ha auf 281.700 ha (-33,7%). Somit sind 11,3% der bayerischen Staatsfläche unter planerisch-rechtlichen, wie auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten für die Windenergienutzung geeignet. Werden zusätzlich noch Bauschutzbereiche der Flughäfen und Flugplätze sowie Korridore der militärischen Tiefflugzone beachtet, innerhalb derer eine Bauhöhenbegrenzung von deutlich unter 200 m besteht, sind in Szenario 1 nur mehr 11% geeignet. Mit 501.000 ha ist der Großteil dieser Flächen bewaldet. Im Offenland verringert sich das Standortpotenzial hierdurch auf 274.000 ha (vgl. Abb. 7). In Szenario 1 verbleiben im Wald schließlich 17.454 restriktionsfreie und wirtschaftliche Windenergieanlagen-Standorte. Da jede dieser Anlagen durchschnittlich 7.060 MWh pro Jahr erzeugt, liegt das summierte Standortpotenzial bei 123 TWh. Dies entspricht 143% der Stromerzeugung Bayerns. Mit 6.629 MWh liegt der durchschnittliche Ertrag eines Offenlandstandortes etwas niedriger. Aufgrund der größeren maximalen Anzahl von Windenergieanlagen im Offenland (23.171) fällt der potenzielle Gesamtertrag – mit 153 TWh – höher aus und entspricht 178% der Stromerzeugung Bayerns (vgl. Abb. 8).

	Wald	Offenland
Anzahl Windenergieanlagen	17.454	23.171
Mittlere Windgeschwindigkeit auf 142,4 m	6,4 m/s	6,2 m/s
Summe Ertrag -10% (MWh)	123.210.000	153.540.000
Anteil Stromerzeugung Bayern	143%	178%
Mittelwert Ertrag -10% (MWh)	7.060	6.629
Anteil an den 1.500 ertragreichsten Standorten in Bayern	56%	44%

Abb. 8 Potenzial von Wald- und Offenlandstandorten (Szenario 1)

4.2 Szenario 2: Ausschluss Einzelfallentscheidung

4.2.1 Planerisch-rechtliche Eignung

Szenario 2 baut methodisch auf Szenario 1 (Eignungsfläche Wald: 501.000 ha; Offenland: 274.000 ha) auf. Die Standortpotenziale werden zusätzlich um die in Abb. 9 genannten Restriktionsflächen reduziert. Dabei handelt es sich um Bereiche, die nach der „Gebietskulisse Windkraft“ aufgrund ihrer sozialen und ökologischen Bedeutung sensibel zu behandeln sind. Diese Gebiete sind aus rechtlicher Sicht keine definitiven Ausschlussgebiete, sondern bedürfen im Rahmen des Genehmigungsverfahrens einer Einzelfallbetrachtung (vgl. LfU 2012a). An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich die naturschutzrechtlichen Gebietskategorien zum Teil überlappen und die Summe aus den einzelnen Res-

triktionsflächen größer ist als die Gesamtgröße des auszuschließenden Gebietes.

Die Gebietskategorie „Erholungslandschaft Alpen Zone A + B“ würde zwar auch einer Einzelfallbetrachtung unterstehen, sie wird jedoch zu Beginn von Szenario 2 kategorisch ausgeschlossen. Diese Handhabung ist dadurch zu erklären, dass es sich um einen bedeutenden Tourismusraum handelt, dessen Bürger große Vorbehalte gegenüber einer Technisierung durch Windenergieanlagen haben (vgl. Sponsel 2009). Nicht zuletzt haben die betroffenen Planungsregionen Allgäu, Oberland und Südostoberbayern den Großteil dieser Flächen als Ausschlussgebiete ausgewiesen. Die Eignungsflächen im Wald bzw. Offenland werden durch diese Entscheidung auf den Referenzwert von 405.000 ha bzw. 242.000 ha reduziert. Die Wirtschaftlichkeit der Standorte wurde bereits in Szenario 1 sichergestellt und kann daher im Folgenden entfallen.

4.2.2 Standort- und Ertragspotenzial

Gravierende Auswirkungen auf den Umfang des Standortpotenzials sind vom rechtlichen Umgang mit Landschaftsschutzgebieten zu erwarten. Diese nehmen in Bayern mit 2,12 Mio. ha 30 % der Landesfläche ein. Da Windenergieanlagen mindestens einen Rotorradius (60 m) von jeder Gebietsabgrenzung entfernt sein sollen, vergrößert sich die Restriktionsfläche der Landschaftsschutzgebiete auf 2,31 Mio. ha (33 % der Landesfläche). Von dem Referenzwert im Wald würden bei Ausschluss der Landschaftsschutzgebiete nur mehr 145.000 ha (–64,2 %) verbleiben. Fauna-Flora-Habitat-Gebiete (FFH) nehmen in Bayern eine Fläche von insgesamt 645.000 ha ein. Bei einem 60 m-Puffer vergrößert sich diese auf 812.000 ha bzw. 11,5 % der Staatsfläche. Dürften Windenergieanlagen im Wald FFH-Gebiete nicht tangieren, würde sich die Referenzfläche um 34.000 ha (–8,3 %) verringern. Bei den Biosphärenreservaten fällt die Flächenreduktion etwas geringer aus. Die Biosphärenreservate Berchtesgaden und Rhön erstrecken sich über eine Fläche von 20.900 ha. Etwa 14.000 ha (–3,3 %) müssten im Falle des Ausschlusses dieser Gebietskategorie vom Referenzwert der Waldeignungsgebiete abgezogen werden. Würden alle Waldflächen, die nach der Waldfunktionskartierung die Funktion Erholung (Stufe 1 und 2), Sichtschutz, Bodenschutz, Lebensraumschutz und Lawinenschutz erfüllen, zu Ausschlussgebieten bestimmt, verringerte sich die Waldeignungsfläche um 112.000 ha (–27,6 %).

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU 2012b) hat neben den Vogelschutzgebieten auch Gebiete ausgewiesen, die eine besondere Funktion für Vögel haben. Dazu zählen Vogelzugkorridore bzw. Gebiete mit Vogelzugverdichtungen sowie wichtige Gebiete für Wiesenbrüter und Wasservögel. Die summierte Fläche dieser Gebiete beträgt über 1 Mio. ha. Trotz der großen Gesamtfläche wären die Auswirkungen auf

Ausschlusskriterium	Angewandter Puffer	Rechtliche Grundlage	Verwendete Datengrundlage
NATURSCHUTZ			
Landschaftsschutzgebiete	60 m	BNatSchG	LfU
FFH-Gebiete	60 m	BNatSchG	LfU
Biosphärenreservate	60 m	BNatSchG	LfU
Vogelzugkorridore	60 m	Winderlass	LfU
Vogelzugverdichtungen	60 m	Winderlass	LfU
Wiesenbrütergebiete	60 m	Winderlass	LfU
Wasservogelgebiete	60 m	Winderlass	LfU
SONSTIGE			
Schutzwald (Sichtschutz, Bodenschutz, Lebensraumschutz, Erholungswald Stufe 2)	-	BayWaldG	LWF
Erholungslandschaft Alpen (A + B)	-	LEP	LEP
Trinkwasserschutzgebiete Zone I & II	-	LfU	LfU
Bauensembles & Baudenkämäler Bodendenkmäler	800 m 50 m	DSchG	BLfD

Abb. 9 Restriktionskriterien Szenario 2 (WEA Windenergieanlage)

Waldstandorte, mit einer Flächenreduktion von 30.000 ha ($-7,3\%$), gering. Die Zonen I und II der Gebietsabgrenzung Trinkwasserschutzgebiete sind ebenfalls sensibel zu behandelnde Gebiete, deren Eignung für Windenergieanlagen im Einzelfall zu prüfen ist. Die bayernweit 102.000 ha Fläche dieser Kategorie wirken sich minimal auf den Bestand der Windeignungsflächen aus. Der Referenzwert würde hierdurch um 11.000 ha ($-2,6\%$) reduziert werden.

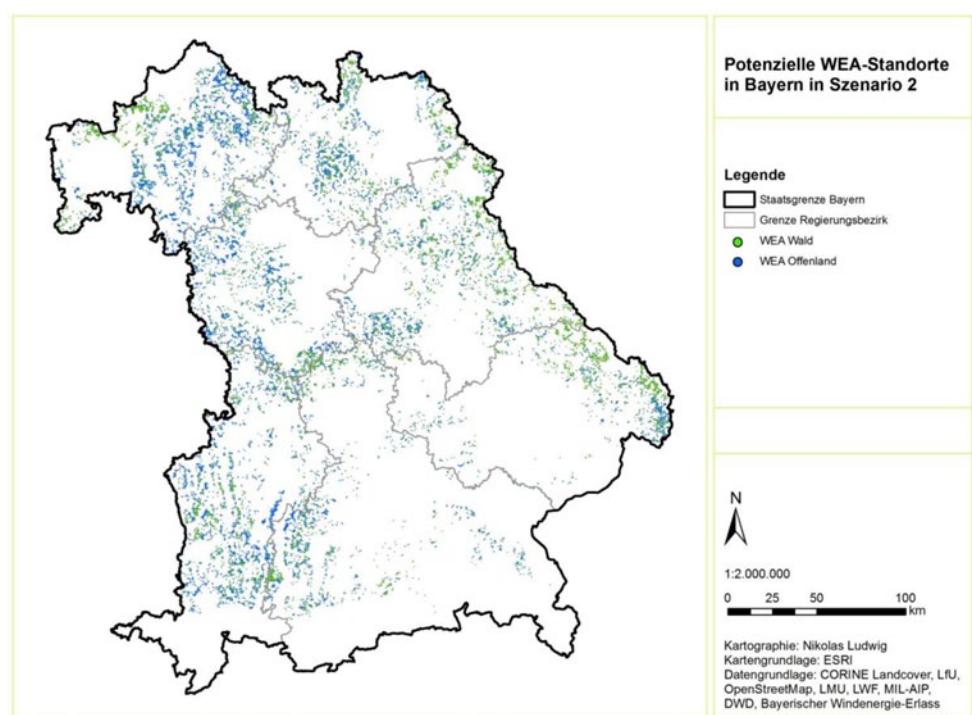
Die Restriktionen aus Szenario 2 wirken sich auf Offenlandflächen deutlich geringer aus. Den größten Einfluss haben auch hier die Landschaftsschutzgebiete, mit einer Flächenreduktion von 54.000 ha ($-22,4\%$). An zweiter Stelle liegen die Gebiete für Vogelschutz, die den Referenzwert um 34.000 ha (-14%) verringern würden. FFH-Gebiete und Biosphärenreservate wirken sich mit einer Reduktion von 4.000 ha ($-1,9\%$) bzw. 2.000 ha (-1%) marginal aus. Die Zonen I und II der Gebietsabgrenzung Trinkwasserschutzgebiete verursachen eine Verringerung der Eignungsfläche um nur 0,8%.

Bei der Planung sind auch die Belange des Denkmalschutzes zu berücksichtigen. Zu den schützenswerten Baudenkältern und Bauensembles zählen historische Befestigungsanlagen, Burgen, Schlösser, Kirchen oder Klöster (vgl. BLfD 2012). Nach dem bayerischen Windenergieerlass soll die Umgebung dieser Denkmäler von Windenergieanlagen freigehalten werden. Die Abstandsregelungen hängen dabei vom Schutzgut sowie von den lokalen Gegebenheiten ab (StMI/StMWFK/StMF et al. 2011: 53). Im Rahmen dieser Untersuchung wird jedoch ein pauschaler Mindestab-

stand zu den gut 25.000 eingetragenen Baudenkältern und Bauensembles von 800 m festgelegt. Dieser Wert orientiert sich am Abstand für geschlossene Wohngebiete. Des Weiteren fallen Bodendenkmäler, beispielsweise historische Überreste von Siedlungen, Bauwerken oder Grabhügeln, unter die schützenswerten Kulturdenkmäler. Auch diese Gebiete schließen Windenergieanlagen nicht generell aus, jedoch sind aufwendige archäologische Untersuchungen und Grabungsarbeiten notwendig. Bodendenkmäler werden mit einem Puffer von 50 m versehen, um eine Beeinflussung bei der Fundamentierung von Windenergieanlagen zu vermeiden. Der Referenzwert geeigneter Waldgebiete verringert sich durch die Belange des Denkmalschutzes um 41.000 ha ($-10,2\%$), im Offenland ist mit einer Reduktion von 37.000 ha ($-15,5\%$) zu rechnen.

Insgesamt wird die Fläche der geeigneten Waldstandorte durch die Restriktionen aus Szenario 2 von 405.000 ha auf 130.000 ha ($-67,9\%$), die der Offenlandstandorte von 242.000 ha auf 153.000 ha ($-36,6\%$) reduziert. Es wird deutlich, dass sich in Folge der Restriktionen aus Szenario 2 neben dem Flächenpotenzial (vgl. Abb. 10) auch der durchschnittliche Ertrag je Standort verringert (vgl. Abb. 11). Dabei geht der potenzielle Gesamtertrag im Wald von 123 TWh zurück auf 29 TWh. Dies entspricht rund einem Drittel des bayerischen Strombedarfs. Das Potenzial im Offenland sinkt von 154 TWh auf 77 TWh (88,6% des bayerischen Strombedarfs). Die größte Wirkung geht von den Landschaftsschutzgebieten aus, denn ohne deren Einbeziehung würde sich der Gesamtstromertrag nur auf die Werte von 52 TWh (Wald)

Abb. 10 Potenzielle Standorte von Windenergieanlagen (Szenario 2)



	Wald	Offenland
Restriktionsfreie Fläche nach Szenario 2	227.800ha (3,2%)	179.900ha (2,5 %)
Anzahl möglicher Windenergieanlagen	8.019	15.265
Mittlere Windgeschwindigkeit auf 142,4 m	6,11 m/s	6,06m/s
Summe Ertrag -10% (MWh)	52.183.053	95.151.535
Anteil Stromerzeugung Bayern	60,5%	110 %
Mittelwert Ertrag -10 % (MWh)	6.510	6.233
Anteil an den 1.500 ertragreichsten Standorten in Bayern	48 %	52 %

Abb. 11 Potenzial von Wald- und Offenlandstandorten (Szenario 2)

und 95 TWh (Offenland) verringern. Die Entscheidung der Bayerischen Staatsregierung, Windenergieanlagen in Landschaftsschutzgebieten als genehmigungsfähig zu deklarieren, ist damit ein wichtiges Kriterium für das Gelingen der Energiewende. Mit dieser Entscheidung dürfen Windenergieanlagen aber nicht ohne Weiteres in Landschaftsschutzgebieten errichtet werden. Die Genehmigungsfähigkeit wird in einer Einzelfallentscheidung zu beurteilen sein.

Die vorliegende Analyse verdeutlicht das große Energiepotenzial, das die bayerischen Landschaftsschutzgebiete aufgrund ihres Umfanges und ihrer exponierten Lage bieten. So ginge im Falle des Ausschlusses dieser Gebietskategorie nicht nur die absolute Zahl der Standorte auf 4.648 im Wald und 12.153 im Offenland zurück. Auch würde sich der durchschnittliche Ertrag pro Windenergieanlage im Wald von 6.507 auf 6.220 MWh, im Offenland von 6.233 auf 6.195 MWh verringern. Aufgrund der bislang unklaren Handhabung der Zonierungskonzepte und der Empfehlung von Zimmermann (2011: 42), Flächen, die sich für die Errichtung von Windenergieanlagen eignen, aus den Landschaftsschutzgebieten herauszunehmen, bleiben die Landschaftsschutzgebiete in der vorliegenden Untersuchung dem Standortpotenzial erhalten. Nach Abzug der Restriktionskriterien aus Szenario 2 verbleiben im Wald daher 228.000 ha (3,2 % der Landesfläche), im Offenland 180.000 ha (2,5 %). Damit könnten 8.019 bzw. 15.265 Windenergieanlagen errichtet werden, die 60,5 % bzw. 110 % der bayerischen Stromerzeugung decken würden (vgl. Abb. 11).

4.3 Szenario 3: Sozialökologisch verträglicher Ausbau

4.3.1 Planerisch-rechtliche Eignung

In Szenario 3 wird ausgehend von den Ergebnissen aus Szenario 2 die größtmögliche sozialökologische Verträglichkeit des Ausbaus angestrebt. Daher werden alle Raumkategorien, bei denen Konflikte zu erwarten sind, als Ausschluss-

Ausschlusskriterium	Angewandter Puffer	Rechtliche Grundlage	Verwendete Datengrundlage
Artenschutzkartierung gefährdeter Vogel- und Fledermausarten	1.000 m / 500 m	-	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Laubwaldgebiete	-	-	Corine Landcover
Waldrandbereiche	200 m	-	Corine Landcover
Wander- und Radwege	200 m	-	Bayerisches Vermessungsamt

Abb. 12 Restriktionskriterien Szenario 3

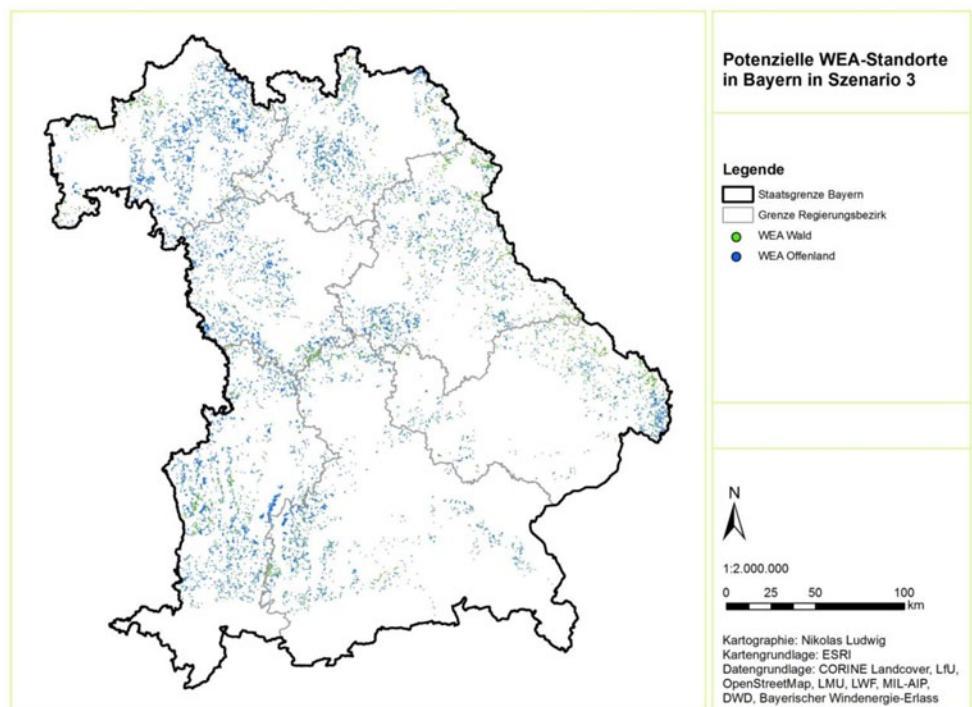
gebiete deklariert. Hierfür wird die Artenschutzkartierung (ASK) des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU 2012b) herangezogen. Sämtliche Kartierungen von Arten, die durch Windenergieanlagen gefährdet sind, werden mit einem Puffer von 1.000 m (Vögel) bzw. 500 m (Fledermäuse) versehen. Darüber hinaus werden besonders sensible Laubwaldgebiete sowie alle Waldrandbereiche (mit einer Tiefe von 200 m) als Ausschlusskriterium behandelt. Für die Erhöhung der sozialen Verträglichkeit sollen Windenergieanlagen-Standorte mindestens 200 m von gekennzeichneten Wander- und Radwegen entfernt sein (vgl. Abb. 12).

4.3.2 Standort- und Ertragspotenzial

Die Eignungsgebiete im Wald (228.000 ha) und Offenland (180.000 ha) werden am stärksten durch die Puffer der Rad- und Wanderwege minimiert. Im Wald kommt es zu einer Flächenreduktion von 88.000 ha (-38,7%), im Offenland sind es 58.000 ha (-32,4%). Der Ausschluss von Waldrandbereichen verringert die Eignungsfläche im Wald um 85.000 ha (-37,4%). Die Puffer der Vogel- und Fledermauskartierungen wirken sich absolut gesehen im Wald, mit einer Reduktion von 15.000 ha, schwächer aus als im Offenland (-17.000 ha). Unter Berücksichtigung aller Restriktionskriterien aus Szenario 3 verbleiben 71.800 ha Waldfläche. Dies entspricht einem Prozent der bayerischen Landesfläche. Demgegenüber sind die geeigneten Flächen im Offenland erstmals größer als die Waldflächen. 110.700 ha bzw. 1,6 % der Landesfläche verbleiben hier der Windenergienutzung (vgl. Abb. 13). Im Vergleich zu Szenario 2 haben sich die Eignungsflächen um 68,5 % (Wald) bzw. 38,5 % (Offenland) verringert.

Auf Waldstandorten könnten nach den Berechnungen aus Szenario 3 nur noch 4.077 Windenergieanlagen errichtet werden und bei durchschnittlich 6.512 MWh je Anlage 26,6 TWh Strom erzeugen (vgl. Abb. 14). Dies entspricht 34,1 % der bayerischen Stromproduktion. Im Vergleich zum vorhergehenden Szenario hat sich damit sowohl die Anzahl der möglichen Windenergieanlagen im Wald, als auch ihr Gesamtertrag halbiert. Die Anzahl der Offenlandstandorte verringert sich im Vergleich zu Szenario 2 um ein Viertel

Abb. 13 Potentielle Standorte von Windenergieanlagen (Szenario 3) (WEA Windenergieanlage)



	Wald	Offenland
Restriktionsfreie Fläche nach Szenario 3	71.800ha (1 %)	110.700ha (1,6 %)
Anzahl möglicher Windenergieanlagen	4.000	11.400
Mittlere Windgeschwindigkeit auf 142,4 m	6,14 m/s	6,04 m/s
Summe Ertrag -10% (MWh)	26.547.346	71.302.674
Anteil Stromerzeugung Bayern	34,1 %	91,7 %
Mittelwert Ertrag -10 % (MWh)	6.512	6.287
Anteil an den 1.500 ertragreichsten Standorten in Bayern	51 %	49 %

Abb. 14 Potenzial von Wald- und Offenlandstandorten (Szenario 3)

auf insgesamt 11.337 Windenergieanlagen. Damit ließen sich 91,7 % der bayerischen Stromerzeugung decken.

5 Zusammenfassung

Szenario 1 spiegelt das maximal mögliche Standortpotenzial der Windenergie in Bayern wider. Vor diesem Hintergrund könnte mehr als das Dreifache der bayerischen Stromerzeugung, von derzeit 86,3 TWh, gedeckt werden. Standorte im Wald könnten dabei 45 % zum Gesamtpotenzial beitragen. Bezogen auf die Empfehlung des bayerischen Energiekonzeptes, den Zubau auf 1.500 Windenergieanlagen

zu beschränken, ließen sich immerhin 20 % des Bedarfes decken (bis 2021 10 % angestrebt). Von den 1.500 ertragreichsten Windenergieanlagen befinden sich 56 % im Wald. Die vermehrte Nutzung von Waldstandorten würde auch zu höheren Erträgen pro Anlage führen und die Gesamtzahl der Windenergieanlagen, die zum Erreichen der energiepolitischen Ziele notwendig wären, verringern.

Aus sozialökologischer Sicht könnte ein Ausbau entsprechend den Annahmen von Szenario 1 als überdimensioniert erscheinen. Deshalb wurden die Restriktionskriterien in Szenario 2 verschärft. Hierdurch verringerte sich die restriktionsfreie Fläche im Wald auf 228.000 ha, im Offenland auf 180.000 ha. Dies bedeutet, dass im Vergleich zu Szenario 1 mehr als die Hälfte (–55 %) der Eignungsflächen im Wald und ein Drittel (–34 %) im Offenland wegfallen. Die verbleibenden Waldflächen bieten somit ein maximales Standortpotenzial von 8.019 Windenergieanlagen. Fast doppelt so viele ließen sich im Offenland errichten. Dieses Potenzial wäre ausreichend, um 60,5 % (Waldstandorte) bzw. 110 % (Offenlandstandorte) der bayerischen Stromproduktion zu decken. Die Ziele der Bayerischen Staatsregierung könnten so, trotz der stärkeren Restriktionen, um ein Vielfaches übertroffen werden. Die Effizienz der Standorte ist jedoch, gemessen am durchschnittlichen Ertrag pro Windenergieanlage, gesunken. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist es empfehlenswert, die Restriktionen nicht pauschal durchzusetzen, sondern Einzelfallentscheidungen den Vorrang zu geben.

Szenario 3 verdeutlicht, dass die Summe aus Wald- und Offenlandstandorten selbst bei einem äußerst sensiblen Ausbau dem Strombedarf Bayerns entsprechen könnte.

Szenario	Wald			Offenland		
	Anzahl WEA	Anteil Fläche Bayerns	Anteil Stromproduktion Bayern	Anzahl WEA	Anteil Fläche Bayerns	Anteil Stromproduktion Bayern
Szenario 1	17.454	7,1%	143%	23.171	3,9%	178%
Szenario 2	8.019	3,2%	60,5%	15.265	2,5%	110%
Szenario 3	4.077	1%	34,1%	11.337	1,6%	91,7%

Abb. 15 Übersicht Szenarien (WEA Windenergieanlage)

Waldstandorte können dabei einen wichtigen Beitrag zur regenerativen Energieversorgung leisten. Bei einem Standortpotenzial von insgesamt 15.414 Windenergieanlagen fällt ein Viertel auf Waldflächen, deren durchschnittlicher Ertrag mehr als 200 MWh über dem der Offenlandstandorte liegt. Dies bedeutet, dass eine Windenergieanlage im Wald pro Jahr etwa 60 Haushalte mehr versorgen kann. Der Anteil der Waldstandorte an den zusätzlichen 1.500 Anlagen, die im bayerischen Energiekonzept gefordert werden, liegt bei Zugrundelegung der ertragreichsten Standorte bei 51% (vgl. Abb. 13).

Als Fazit kann festgehalten werden, dass die bayerischen Wälder nicht nur hervorragend für die Errichtung von Windkraftanlagen geeignet sind, sondern darüber hinaus über ein großes, ungenutztes Energiepotenzial verfügen. Die Einbindung dieser Standortalternative ist damit ein wichtiger Baustein zur Umsetzung einer effizienten und sozialökologisch verträglichen Energiewende. Abbildung 15 gewährt abschließend einen Überblick über die Szenarien, die einen räumlichen Korridor für den geforderten Ausbau der Windenergie in Bayern aufzeigen.

Literatur

- Agentur für Erneuerbare Energien (2013): Strommix in Deutschland 2012. <http://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/strommix-in-deutschland-2013> (28.02.2014).
- Arens, D. (2010): Der deutsche Wald. Köln.
- Bathelt, H.; Glückler, J. (2002): Wirtschaftsgeographie. Ökonomische Beziehungen in räumlicher Perspektive. Stuttgart.
- Bayerische Staatsforstern (2012): Windenergie aus dem Staatswald. http://www.baysf.de/de/home/unternehmen_wald/regenerative_energien/wind.html (03.03.2014).
- Bayerische Staatsregierung (2011): Bayerisches Energiekonzept „Energie innovativ“. München.
- Bayerische Staatsregierung (2013): Landesentwicklungsprogramm Bayern. München.
- Becker, S.; Gailing, L.; Naumann, M. (2012): Neue Akteurslandschaften der Energiewende. Aktuelle Entwicklungen in Brandenburg. In: RaumPlanung 162 (3), 42–46.
- BLfD – Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (2012): Bayern-Viewer-denkmal. <http://www.blfd.bayern.de/denkmaulerfassung/denkmalliste/bayernviewer/index.php> (30.04.2014).
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011): Erneuerbare Energien. Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft. Berlin.
- Bosch, S. (2012): Erfassung und Bewertung des Einflusses der Ressource Raum im Rahmen der Förderung von Erneuerbaren Energien sowie Ableitung eines ganzheitlichen Ansatzes zur optimalen Integration von regenerativen Technologien in den ländlichen Raum. Augsburg.
- Bosch, S.; Peyke, G. (2011): Gegenwind für die Erneuerbaren – Räumliche Neuorientierung der Wind-, Solar- und Bioenergie vor dem Hintergrund einer verringerten Akzeptanz sowie zunehmender Flächennutzungskonflikte im ländlichen Raum. In: Raumforschung und Raumordnung 69 (2), 105–118.
- Briese, D.; Hoemske, T. (2010): Kernkraftwerke: Der Markt für Service, Retrofit, Neu- und Rückbau in Europa bis 2030. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 60 (9), 16–18.
- Bundesregierung (2011): Der Weg zur Energie der Zukunft – sicher, bezahlbar und umweltfreundlich. Eckpunktepapier der Bundesregierung zur Energiewende. Berlin.
- Dicken, P.; Lloyd, P. E. (1999): Standort und Raum – Theoretische Perspektiven in der Wirtschaftsgeographie. Stuttgart.
- EEX – European Energy Exchange (2013): Handelsdaten Erdgas. <http://www.eex.com/de/marktdaten/marktdaten-download/produktinhalte/handelsdaten> (28.02.2014).
- Eichhorn, M.; Bovet, J. (2010): Ermittlung des potenziellen Eignungsraumes für die Windenergienutzung unter physischen und rechtlichen Gesichtspunkten. In: Drechsler, M.; Ohl, C.; Meyerhoff, J.; Monsees, J. (Hrsg.): Ein Verfahren zur optimalen räumlichen Allokation von Windenergieanlagen. Marburg, 79–91.
- Einig, K.; Heilmann, J.; Zaspel, B. (2011): Wie viel Platz die Windkraft braucht. In: Neue Energien 21 (8), 34–37.
- Frondel, M.; Schmidt, C. M.; aus dem Moore, N. (2011): Explodierende Kosten: Auswirkungen der Photovoltaikförderung in Deutschland. In: BWK – Das Energie-Fachmagazin 62 (3), 63–66.
- Gleis, S. (2012): Rauhigkeitsklassen. <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/windenergie/wind-basiswissen/rauhigkeitsklassen.html> (04.03.2014).
- Hau, E. (2003): Windkraftanlagen – Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. Berlin.
- Heide, D. (2013): Diese Kraftwerke sind nicht mehr rentabel. <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/niedriger-strompreis-diese-kraftwerke-sind-nicht-mehr-rentabel/8476810.html#image> (30.04.2014).
- IWES – Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (2011): Studie zum Potenzial der Windenergienutzung an Land. Kassel.
- Klagge, B.; Brocke, T. (2013): Energiewende vor Ort. Dezentrale Stromerzeugung und die Rolle von Stadtwerken und Regionalversorgern. In: Geographische Rundschau 65 (1), 12–18.
- Klandt, H. (1984): Aktivität und Erfolg des Unternehmungsgründers. Eine empirische Analyse unter Einbeziehung des mikrosozialen Umfeldes. Bergisch Gladbach. = Gründung, Innovation und Beratung 1.
- Koller, C. (2013): Nutzung von Waldflächen. Expertengespräch am 4. April 2013, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Freising.
- Konrad-Adenauer-Stiftung (2013): Wahrnehmung der deutschen Energiewende in Schwellenländern. Ergebnisse einer qualitativen Expertenbefragung in Brasilien, China und Südafrika. Sankt Augustin, Berlin.
- LfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt (2012a): Erläuterungen zur Gebietskulisse Windkraft als Umweltplanungshilfe für Kommunen. Augsburg.
- LfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt (2012b): Arteninformationen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. Augsburg. <http://www.lfu.bayern.de/natur/sap/arteninformationen/> (04.03.2014).

- Leibnath, M.; Otto, A. (2012): Diskursive Konstituierung von Kulturlandschaft am Beispiel politischer Windenergiediskurse in Deutschland. In: Raumforschung und Raumordnung 70 (2), 119–131.
- Meyer, C. (2013): Referenzbericht. Expertengespräch am 7. Juni 2013, BayWa renewable energy. München.
- NABU – Naturschutzbund Deutschland (2006): Leitfaden Erneuerbare Energien. Konflikte lösen und vermeiden. Bonn/Berlin.
- Nitsch, J.; Pregger, T.; Scholz, Y.; Naegler, T.; Sterner, M.; Gerhardt, N.; von Oehsen, A.; Pape, C; Saint-Drenan, Y.-M.; Wenzel, B. (2010): Leitstudie 2010. Langfristzenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Stuttgart, Kassel, Teltow.
- Nohl, W. (2010): Landschaftsästhetische Auswirkungen von Windkraftanlagen. In: Schönere Heimat – Erbe und Auftrag 99 (1), 3–12.
- Pred, A. R. (1967): Behavior and Location: Foundations for a Geographic and Dynamic Location Theory: Part 1. Lund.
- Ratzbor, G. (2010): Windkraft im Wald – Wildnis ade? Zur Auswirkung von Windrädern auf das Ökosystem Wald. <http://www.dnr.de/downloads/windkraft-im-wald-23-08-10.pdf> (04.03.2014).
- Regionaler Planungsverband Südostoberbayern (2013): Zehnte Fortschreibung des Regionalplans der Region Südostoberbayern, Teilstudie Windkraft. <https://www.region-suedostoberbayern.bayern.de/regplan/Fortschreibungen/10.Fortschreibung/forts10.htm> (28.02.2014).
- Riegert, C.; Fleer, I. (2010): Der Wald als Psychotop im Spannungsfeld multifunktionaler Landnutzung – das Fallbeispiel Ostalb. In: Reeh, T.; Ströhlein, G.; Bader, A. (Hrsg.): Kulturlandschaft verstehen. Göttingen, 143–160. = Göttinger Schriften zu Landschaftsinterpretation und Tourismus 5.
- Rieke, S. (2011): Windstrom wird in Methan gespeichert. In: Biogas Journal (14) 1, 89–93.
- Schätzl, L. (2001): Wirtschaftsgeographie 1: Theorie. Paderborn.
- Scharnitzky, R.; Szymanski, M.; Sebald, C. (2014): Kabinett zieht den Stecker. In: Süddeutsche Zeitung vom 5. Februar 2014, 33.
- Scheidler, A. (2010): Verunstaltung des Landschaftsbildes durch Windkraftanlagen. In: Natur und Recht 32 (8), 525–530.
- Schmude, J. (1994): Geförderte Unternehmensgründungen in Baden-Württemberg: Eine Analyse der regionalen Unterschiede des Existenzgründungsgeschehens am Beispiel des Eigenkapitalhilfe-Programms (1979 bis 1989). Stuttgart. = Erdkundliches Wissen 114.
- Schöbel-Rutschmann, S. (2012): Windenergie und Landschaftsästhetik. Zur landschaftsgerechten Anordnung von Windfarmen. Berlin.
- Sebald, C. (2012): Wo die Brise weht – Umweltministerium legt Karte mit möglichen Standorten von Windrädern vor. In: Süddeutsche Zeitung vom 2. Februar 2012, 50.
- Smith, D. M. (1971): Industrial Location: An Economic Geographical Analysis. New York.
- Sponsel, W. (2009): Jede Region hat ihre Stärken. Warum das Allgäu keine weiteren Windräder braucht. Buchenberg.
- StMI – Bayerisches Staatsministerium des Innern; StMWFK – Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst; StMF – Bayerisches Staatsministerium der Finanzen; StMWIVT – Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie; StMUG – Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit; StMELF – Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2011): Hinweise zur Planung und Genehmigung von Windkraftanlagen (WKA). München.
- StMUG – Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (2013): Gebietskulisse Windkraft. <http://www.energieatlas.bayern.de/kommunen/gebietskulisse.html> (04.03.2014).
- Tenbohlen, S.; Probst, A.; Wajant, P. (2014): Elektrische Energieversorgung der Zukunft – Neuer Strom in alten Netzen? In: Bührke, T.; Wengenmayr, R. (Hrsg.): Erneuerbare Energie – Konzepte für die Energiewende. Weinheim, 112–119.
- Tobias, K.; Jung, C.; Fallen, M.; Puga, J.-F. (2003): Hinweise zur Planung von Windenergieanlagen auf Waldstandorten. Kaiserslautern.
- UMBWL – Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2011): Windatlas Baden-Württemberg. Stuttgart.
- Weiss, G. (2013): Das Klima retten – aber nicht vor der eigenen Tür? In: Geographische Rundschau 65 (1), 44–49.
- Wippermann, C.; Wippermann, K. (2010): Mensch und Wald. Einstellungen der Deutschen zum Wald und zur nachhaltigen Waldwirtschaft. Bielefeld.
- Zimmermann, J.-R. (2011): 50 % plus – Strom aus Landwind. In: neue energie 21 (4), 37–42.