

# Studie zum Potenzial der Windenergienutzung an Land - Kurzfassung

Autoren

- Dr. Stefan Bofinger
- Doron Callies
- Michael Scheibe
- Yves-Marie Saint-Drenan
- Dr. Kurt Rohrig

Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) Abteilung  
Energiewirtschaft und Netzbetrieb  
Königstor 59, 34119 Kassel

Kassel, März 2011

Im Auftrag von



**Bundesverband  
WindEnergie e.V.**



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Datengrundlage und Methodik</b>	<b>8</b>
3.1	Übersicht über die Methodik	8
3.2	Datengrundlage	8
3.2.1	Bestimmung von nutzbaren Flächen	9
3.3	Anlagenplatzierung	10
3.4	Ertragsberechnung	11
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>12</b>
4.1	Nutzbare Flächen in Deutschland	12
4.2	Ergebnisse pro Bundesland	13
4.2.1	Bewertung der Ergebnisse zu den berechneten Flächen	15
4.3	Installierte Leistung und Erträge	16
4.3.1	Nutzung von zwei (einem) Prozent der deutschen Fläche	18
4.3.2	Ergebnisse pro Bundesland	18
<b>5</b>	<b>Belastbarkeit der Ergebnisse</b>	<b>20</b>
5.1	Einfluss der Pufferung auf die verfügbaren Flächen	20
5.2	Vergleich mit heutigen Windparks	22
5.3	Zusammenfassung	26
<b>6</b>	<b>Gesamt-Zusammenfassung</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>28</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise	8
Abbildung 2: Platzierung	10
Abbildung 3: Löschung aller Freiflächen im innerhalb des vorgegebenen Abstands	10
Abbildung 4: Platzierung der nächsten WEA am Standort mit den besten Windbedingungen	11
Abbildung 5: Platzierung der WEA endet wenn verfügbaren Flächen besetzt sind.	11
Abbildung 6: Karte der nutzbaren Flächen in Deutschland	12
Abbildung 7: Anteil der nutzbaren Fläche an der Gesamtfläche in Prozent	13
Abbildung 8: Nutzbare Fläche in km <sup>2</sup> nach Bundesland	14
Abbildung 9: Anteil der nutzbaren Fläche an der Landesfläche	15
Abbildung 10: Nutzbare Flächen in den Bundesländern für verschiedene Szenarien in km <sup>2</sup>	16
Abbildung 11: Verteilung von Flächen für gute Standorte und Schwachwindstandorte in Deutschland auf Basis der DWD Daten	17
Abbildung 12: Auswirkung der Pufferung aller Layer auf die potenziell nutzbaren Flächen	21
Abbildung 13: Auswirkung der Reduktion (-50 %) der einzelnen Pufferungen auf die nutzbaren Flächen	22
Abbildung 14: Heutiger Stand der Anlagen in Nordwestdeutschland (Schwarz) und berechnete nutzbare Flächen	23
Abbildung 15: Heutiger Stand der Anlagen in einer Nordwestdeutschen Region (Schwarz) und berechnete nutzbare Flächen	23
Abbildung 16: Heutige WEA in den verschiedenen Flächenkategorien	24
Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung des Abstand von heutigen WEA zu Ortschaften. In rot der für die Studie angesetzte Puffer.	25

## 1 Zusammenfassung

Um den Klimawandel aufzuhalten, ist es der anerkannte Konsens die erneuerbaren Energien schnellstmöglich auszubauen. Verschiedene Studien beschäftigten sich mit möglichen Szenarien des Ausbaus der EE, insbesondere der Windenergie. Mit der vorliegenden Studie wird ein Branchenszenario des Bundesverbands WindEnergie e.V. (BWE) basierend auf der Nutzung von geeigneten Flächen mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen (GIS) auf Plausibilität geprüft. Dieses wurde unter den vom Auftraggeber vorgegebenen Annahmen dass 2% der Fläche Deutschlands für die Windenergienutzung zur Verfügung stehen, plausibilisiert. Andere Studien wie die dena Netzstudie [dena 2005, dena 2010] stellen die Szenarienentwicklung sowie Potentialanalyse auf den heute existierenden Vorrang- und Eignungsflächen ab. Im Gegensatz hierzu wurde in dieser Studie ein Potential auf Basis von GIS-Daten ermittelt. Dabei wurden Ausschlussflächen und nutzbare Flächen anhand der Bodenbedeckung sowie geographischen Merkmalen wie Siedlungsflächen, Infrastrukturdaten (Straßen, Bahnlinien usw.) bestimmt, um bestehende Abstandregelungen geeignet abzubilden ggf. mit geeigneten Puffern zu versehen. Diese Ergebnisse vernachlässigen Aspekte wie Geländeneigung, lokale Restriktionen, Besitzverhältnisse und weitere Effekte.

Die wesentlichen Ergebnisse der Studie sind:

- Insgesamt kann das 2% Ziel als realistisch angesehen werden
- In Deutschland stehen auf Basis der Geodaten knapp 8% der Landfläche außerhalb von Wäldern und Schutzgebieten für die Windenergienutzung zur Verfügung
- Unter Einbeziehung von Wäldern und zusätzlich Schutzgebieten ergeben sich 12,3% bzw. 22,4% nutzbare Fläche
- Bei Nutzung von 2% der Fläche jedes Bundeslands ergeben sich 198 GW installierbare Leistung
- Das Flächenpotential ist in ganz Deutschland vorhanden und beschränkt sich nicht auf die schon heute genutzten nördlichen Bundesländer
- Die Erträge liegen zwischen 1600 Volllaststunden (Flächen mit geringeren Erträgen wurden ausgeschlossen) und 4996, im Mittel 2071 Volllaststunden.
- Daraus ergeben sich 390 TWh (potenzieller Energieertrag)
- Das sind 65% des deutschen Bruttostromverbrauchs von 603 TWh im Jahr 2010

Eine wirtschaftliche Bewertung der Standorte, die Frage der Netzintegration sowie der Lastdeckung/Kapazitätskredit von Windkraft wurden im Rahmen dieser Studie nicht untersucht. Die Energieerträge berücksichtigen keine lokalen Effekte wie Abschattung, Orographie, Hindernisse und Topologie und dienen so zum Vergleich der Regionen untereinander. Die Pauschalisierung sowie die Auflösung der Winddaten verstärken diese Einschränkung.

Die vorliegende Kurzfassung der Studie fasst die wichtigsten Ergebnisse zusammen. Details zu Daten, Methodik, Sensitivitätsanalysen sowie Validierungsergebnisse sind der Langfassung der Studie zu entnehmen.

## 2 Einleitung

Vor dem Hintergrund der sich weiter verschärfenden Klimaproblematik sowie dem Diskurs über die friedliche Nutzung von Kernenergie rücken die erneuerbaren Energien (EE) immer weiter in den Fokus der politischen Debatte. Unbestreitbar werden sie in Zukunft eine der Grundsäulen der modernen Energieversorgung darstellen. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Fragestellung wo die notwendigen Erzeugungskapazitäten aufgebaut werden können, immer weiter an Bedeutung.

Nachdem in den letzten Jahren die Offshore-Windenergienutzung mit umfangreicher Begleitforschung in Deutschland ihren Anfang fand, widmet sich die vorliegende Studie explizit der Onshore-Windenergienutzung und den noch vorhanden Potentialen.

Vom Auftraggeber (BWE Bundesverband Windenergie e.V.) wurden hierfür verschiedene Rahmenbedingungen wie die Abstandregelungen zu u. a. Siedlungsflächen, Infrastruktur etc. vorgegeben. Das Fraunhofer IWES hat anhand von GIS-Daten vorhandene Potentiale im Rahmen der möglichen Genauigkeit ermittelt.

Ziel der Untersuchung war die Überprüfung der Plausibilität der vom Auftraggeber genannten Flächennutzung von 2 % der jeweiligen Landesfläche. Zu diesem Zweck wurden Ausschlusskriterien wie z.B. Gewässer und Siedlungsflächen, und Abstandregelungen definiert, um auf dieser Basis die verfügbaren Flächen zu berechnen. Diese Flächen umfassen auch Flächen, die z.B. aufgrund von Steigung, Besitzverhältnissen etc. nicht für die Windenergienutzung in Frage kommen. Damit sollte das 2 %-Szenario des Auftraggebers einschätzbar sein.

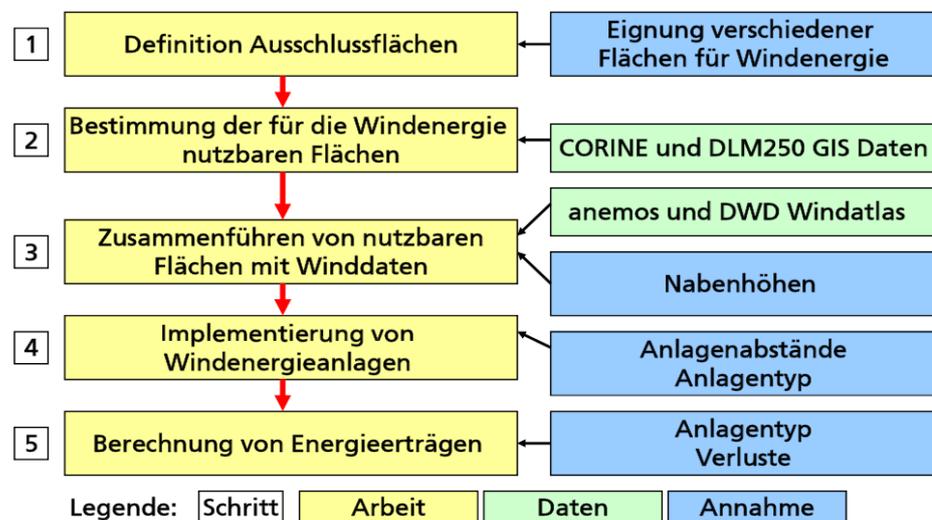
Die vorliegende Kurzfassung der Studie fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen. In der Langfassung wird darüber hinaus noch eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse sowie Validierung dargestellt.

## 3 Datengrundlage und Methodik

### 3.1 Übersicht über die Methodik

Die Methodik der Flächenermittlung und Potenzialbestimmung beruht auf fünf aufeinander aufbauenden Schritten (siehe Abbildung 1). Zuerst werden auf Basis der verfügbaren GIS Daten die Flächen definiert, die für die Windenergie entweder nutzbar, bedingt nutzbar oder gar nicht nutzbar sind (Schritt 1). Diese Einteilung erfolgte in Absprache mit dem Auftraggeber. Anschließend wurden die nutzbaren Flächen entsprechend den Annahmen bestimmt (Schritt 2). Darauf aufbauend wurden die Windbedingungen zu den einzelnen Standorten ermittelt und mit den nutzbaren Flächen überlagert (Schritt 3). Im vierten Schritt wurden auf den nutzbaren Flächen entsprechend der vorgegebenen Szenarien Windenergieanlagen (WEA) platziert und im letzten Schritt die zugehörigen Erträge an den WEA-Standorten berechnet und zum Gesamtertrag zusammengefasst.

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise



### 3.2 Datengrundlage

Die Datengrundlage bildet den Ausgangspunkt für die anstehenden Berechnungen. Die für die Bewertung der Flächeneignung verwendeten Daten sind georeferenzierte Oberflächenbedeckungsdaten von CORINE [Corine]

(Auflösung 100x100m) und Infrastruktur- (z. B. Straßen, Schienen, Stromleitungen)[BKG 2003] und Sonderflächendaten (Naturschutzgebiete) [BKG 2008] des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.

Für die Ertragsberechnungen wurden die Winddaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) [DWD] (statistisches Wind Modell, A und k Parameter einer Weibullverteilung für 80m über Grund, Auflösung 1 km x1 km) verwendet. Die Umrechnung auf Nabenhöhe erfolgte durch Extrapolation mit dem logarithmischen Windprofil. Die dafür verwendeten Rauigkeitsparameter stammen aus dem Windatlas [RISO 1990] und wurden für jede Corine-Klasse zugewiesen.

Die Daten sowie ihre Auflösung sind in Tabelle 1 dargestellt

Tabelle 1: Beschreibung der GIS Daten

Daten	Inhalt	Auflösung
DWD	statistisches Wind Modell, A und k Parameter einer Weibullverteilung für 80m über Grund	1000x1000m
Corine	Bodenbedeckungsdaten in 48 Kategorien	100x100m
Basis-DLM und DLM 250	Infrastruktur, Siedlungen, Schutzgebiete	1:25.000 bis 1:250.000

### 3.2.1 Bestimmung von nutzbaren Flächen

Heute werden WEA (Windenergieanlagen) meist auf offenem Land außerhalb von Schutzgebieten und Wäldern errichtet. Daneben ist eine Nutzung in Wäldern und eingeschränkt auch in bestimmten Typen von Schutzgebieten denkbar. Deshalb wurden Untersuchungen für diese 3 Kategorien vorgenommen:

1. **Flächen ohne Restriktionen:** landwirtschaftlich genutzte Flächen (nicht bewässertes Ackerland, Wiesen und Weiden, Obst und Beerenobstbestände, Weinbauflächen und landwirtschaftlich genutzte Flächen mit natürlicher Bodenbedeckung) sowie natürliche Flächen mit geringem Bodenbewuchs (natürliches Grünland, Heiden und Moorheiden und Flächen mit spärlicher Vegetation)
2. **Flächen in Wäldern:** Laubwald, Nadelwald, Mischwald und Wald-Strauchübergangsformen
3. **Flächen in Schutzgebieten:** Landschaftsschutzgebiet, Naturparks Biosphärenreservate sowie Fauna- und Flora- Habitate

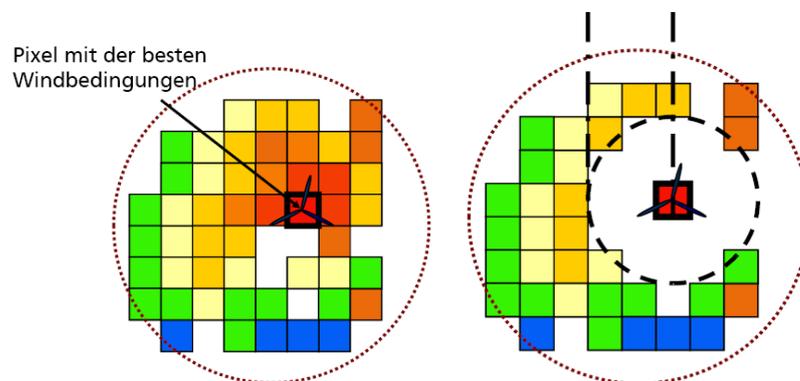
Andere Flächen wie Nationalparks, Naturschutzgebiete, bebauete Flächen, Gewässer, Gletscher und Dauerschneegebiete oder in Gezeitenzonen liegende Flächen wurden als für WEA nicht nutzbare Flächen betrachtet. Auch andere Flächen stehen derzeit vielfach nicht für die Windenergienutzung zur Verfügung und werden aus wissenschaftlichen Gründen zusätzlich mit einem Puffer versehen<sup>1</sup>.

### 3.3 Anlagenplatzierung

Bei dem angewandten Verfahren werden zuerst die Windenergieanlagen platziert, die den höchsten Ertrag versprechen. Dieses Vorgehen soll einen ertragsoptimierten Windenergieausbau simulieren. Zuerst wird die Windenergieanlage auf der verfügbaren Fläche, die den höchsten Ertrag verspricht, platziert. Nun wird unter den übrigen nutzbaren Flächen und unter der Berücksichtigung des festgelegten Anlagenabstandes (4 Rotordurchmessern) zur bereits gesetzten Turbine der Standort mit den nun besten Bedingungen besetzt. So wird eine Windenergieanlage nach der nächsten gesetzt, bis alle freien Flächen besetzt sind.

Abbildung 2: Platzierung der WEA auf dem Rasterfeld mit den besten Windbedingungen (links)

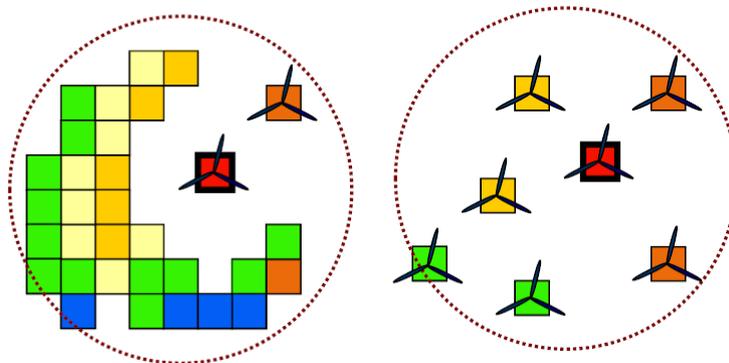
Abbildung 3: Löschung aller Freiflächen im inneren des vorgegebenen Abstands (rechts)



<sup>1</sup> Details zu den Puffern werden in der Langfassung erläutert.

Abbildung 4: Platzierung der nächsten WEA am Standort mit den besten Windbedingungen (links)

Abbildung 5: Platzierung der WEA endet wenn verfügbaren Flächen besetzt sind. (rechts)



Das Verfahren erlaubt es auch im großen Maße kleinere Flächen Effektiv zu nutzen. So wird jede kleinere nutzbare Fläche (z. B. eine nutzbare Fläche von einen ha) in mitten von nicht nutzbaren Flächen genutzt. Dadurch wird der mittlere Flächenbedarf pro installierter Leistung reduziert.

### 3.4 Ertragsberechnung

Als Standardturbine wird von Anlagen der 3 MW-Klasse ausgegangen (in der Langfassung der Studie sind daneben noch die Ergebnisse mit einer 5MW WEA aufgeführt). Im Rahmen der Simulation werden zuerst WEA mit einer Nabenhöhe von 100 m und einem Verhältnis der Rotorfläche zur Generatornennleistung von  $2,6 \text{ m}^2/\text{kW}$  (100 m Rotordurchmesser) installiert. Sollten diese keine 1600 äquivalenten Volllaststunden erreichen, so wird eine Turbine mit 150 m Nabenhöhe und einem Rotor zu Generatorverhältnis von  $3,5 \text{ m}^2/\text{kW}$  (115 m Rotordurchmesser) installiert, um den Standort für die Windenergienutzung auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erschließen zu können. Sollte auch diese Anlagenvariante keine 1600 äquivalenten Volllaststunden erreichen, wird keine WEA installiert.

Der Abstand zwischen den Turbinen wird mit 4 Rotordurchmessern, also 400 m bei einer Anlage für gute Standorte und 460 m bei einer Anlage für Schwachwindstandorte, berücksichtigt.

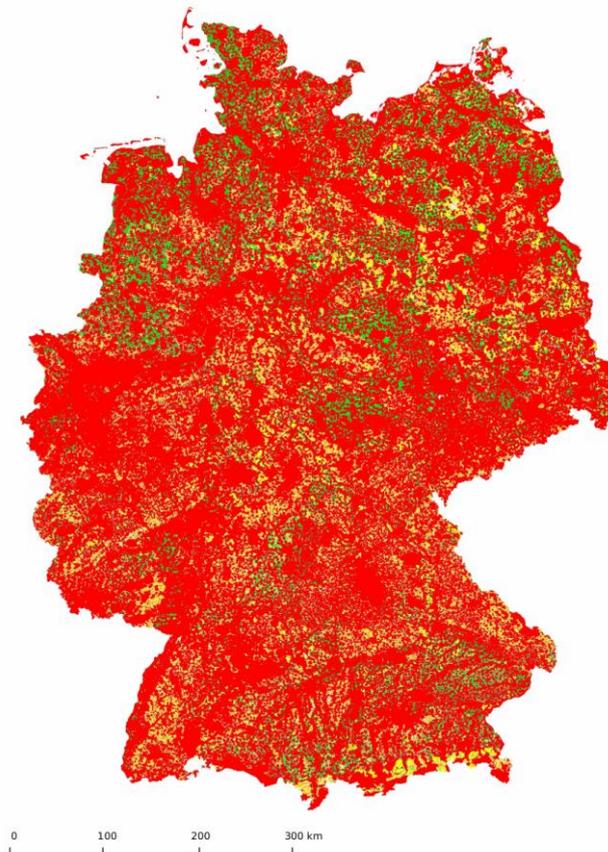
Die aerodynamischen Verluste haben einen wesentlichen Einfluss auf den Ertrag. Um diese Verluste zu berücksichtigen, wird der Ertrag um 10 % reduziert. Darüber hinaus wird ein weiterer Abzug in Höhe von 3 % für die technische Nichtverfügbarkeit der Anlagen angesetzt.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Nutzbare Flächen in Deutschland

Die berechneten nutzbaren Flächen werden entsprechend der Definition in dem vorangegangenen Kapitel in Abbildung 6 in die vier Klassen: Flächen ohne Restriktionen (grün), nutzbarer Wald außerhalb von Schutzgebieten (gelb), nutzbare Flächen innerhalb von Schutzgebieten (orange) und nicht nutzbare Flächen (rot) aufgeteilt.

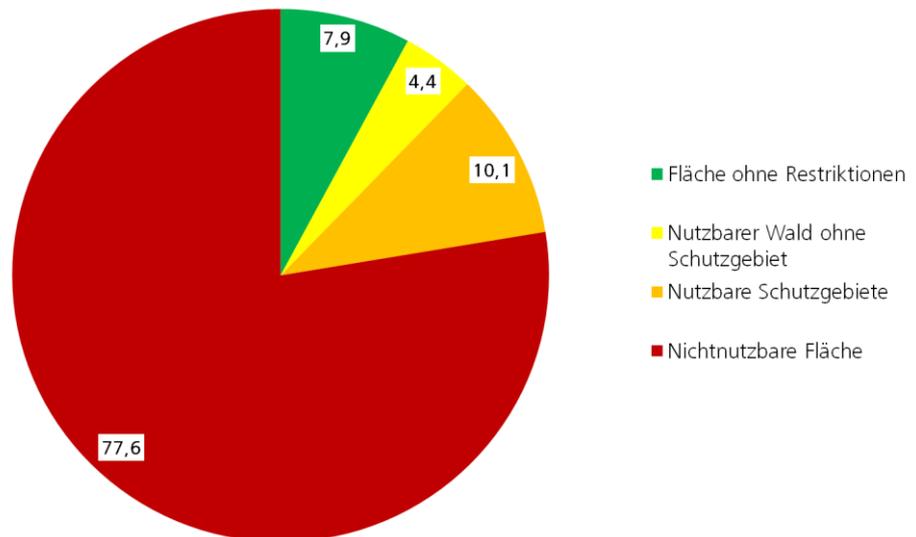
Abbildung 6: Karte der nutzbaren Flächen in Deutschland



Über dreiviertel der Flächen von Deutschland sind entsprechend dem Szenario nicht nutzbar (siehe Abbildung 7). Die übrigen 22 % sind potenziell nutzbare Flächen. Etwa ein Viertel der übrigen Flächen (8 % der gesamten Fläche) ist ohne Restriktionen (nicht im Wald und nicht in Naturschutzgebieten) nutzbar. Die nutzbaren Waldflächen, die außerhalb von Schutzgebieten liegen, machen 4 % der

deutschen Gesamtfläche aus. Damit können auch Waldflächen einen wesentlichen Beitrag für die Nutzung der Windenergie an Land leisten.

Abbildung 7: Anteil der nutzbaren Fläche an der Gesamtfläche in Prozent



Der größte Teil der nutzbaren Fläche (10 % der deutschen Gesamtfläche) liegt in Schutzgebieten. Dies ist einerseits mit dem großen Flächenanteil der Schutzgebiete und andererseits mit deren geringerer Besiedelung zu erklären. Aus diesem Grund schränken die Abstandsregelungen zu Siedlungen und Verkehrswegen die Windenergienutzung in Schutzgebieten weniger stark ein.

#### 4.2 Ergebnisse pro Bundesland

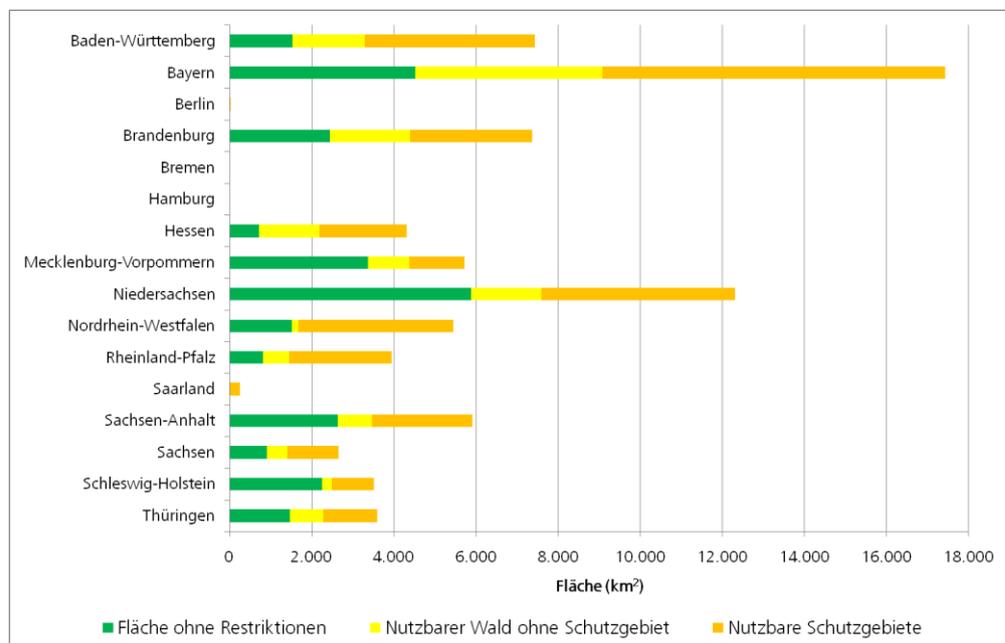
In diesem Abschnitt wird untersucht, inwieweit die Ergebnisse je Bundesland variieren. Dafür wird zuerst auf die allgemeine Struktur der Bundesländer eingegangen.

Wie zu erwarten liegen die potenziell nutzbaren Flächen in den großen Flächenländern (siehe Abbildung 8). Das Land Bayern hat aufgrund seiner großen räumlichen Ausdehnung auch insgesamt die größten nutzbaren Flächen (17.700 km<sup>2</sup>). Gefolgt wird Bayern von Niedersachsen mit 12.500 km<sup>2</sup> sowie Brandenburg und Baden-Württemberg, die mit etwa 7.500 km<sup>2</sup> an dritter Stelle rangieren.

Niedersachsen hat die größte restriktionsfreie Fläche. In den südlichen Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen ist aufgrund der großen Waldflächen (in und außerhalb von Schutzgebieten) die Fläche ohne Restriktion deutlich reduziert. Insbesondere in diesen Bundesländern ist also die Nutzung von Waldflächen in und außerhalb von Schutzgebieten

relevant. Die Flächen in den Stadtstaaten sind im Vergleich zu denen der großen Flächenländer so gering, dass sie in der folgenden Abbildung 8 als kaum sichtbar erscheinen

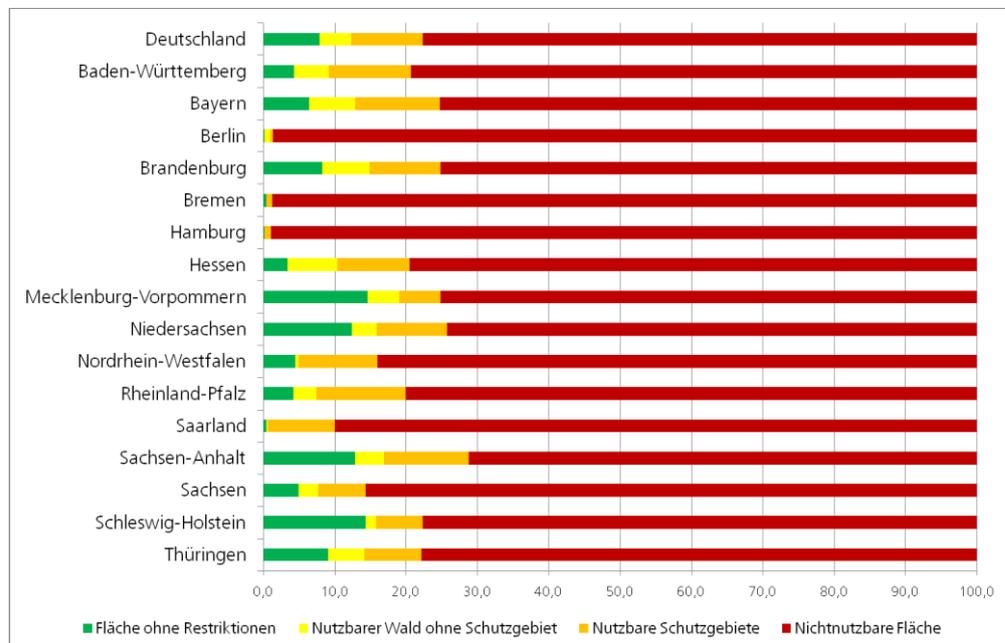
Abbildung 8: Nutzbare Fläche in km<sup>2</sup> nach Bundesland



Bei der Betrachtung des nutzbaren Flächenanteils (Abbildung 9) liegt Sachsen-Anhalt mit 30 % der Landesfläche vor Niedersachsen (27 %) und Brandenburg (26 %). Die Flächenländer mit dem geringsten Anteil an nutzbaren Flächen sind das Saarland (10 %), Sachsen (15 %) und Nordrhein-Westfalen (16 %). Bei allen anderen Flächenbundesländern liegt der Anteil der nutzbaren Flächen im Bereich zwischen 20-25 %.

In den Stadtstaaten liegt der Anteil aller nutzbarer Flächen bei nur 1 %, der darüber hinaus meistens auch in Schutzgebieten liegt. Damit ist das Flächenpotenzial der Stadtstaaten zwar gering, aber doch vorhanden.

Abbildung 9: Anteil der nutzbaren Fläche an der Landesfläche



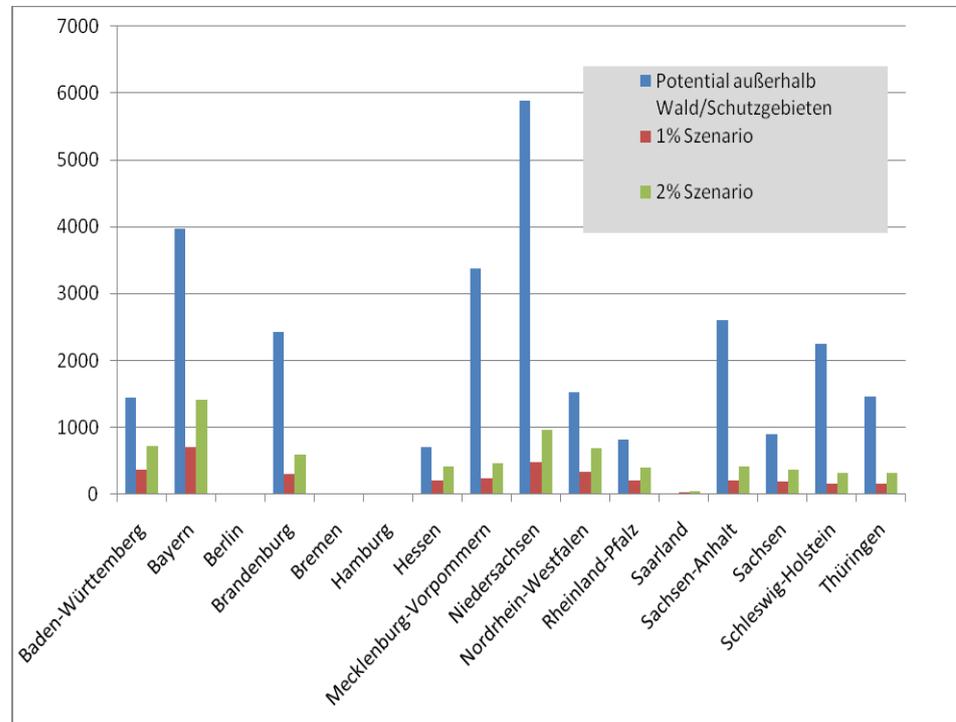
#### 4.2.1 Bewertung der Ergebnisse zu den berechneten Flächen

Es ist davon auszugehen, dass nicht alle der als theoretisch nutzbaren Flächen markierten Gebiete tatsächlich genutzt werden können. Eine Vielzahl anderer Aspekte spielt hier noch eine Rolle. Diese sind u.a.

- Besitzfragen
- Einzelgebäude (z. B. Bauernhöfe, die in den Daten nicht erfasst sind)
- Störungen des Bundeswehrradars
- Vorkommen seltener Tierarten
- Einzelfallentscheidungen

Das Ziel der Studie war jedoch die Überprüfung der Plausibilität der Annahmen des Auftraggebers. Daher wird davon ausgegangen, dass nur 2% der Bundesfläche für die Windenergienutzung tatsächlich zur Verfügung steht. Hiermit ergeben sich gemäß Abbildung 10 die folgenden Flächen:

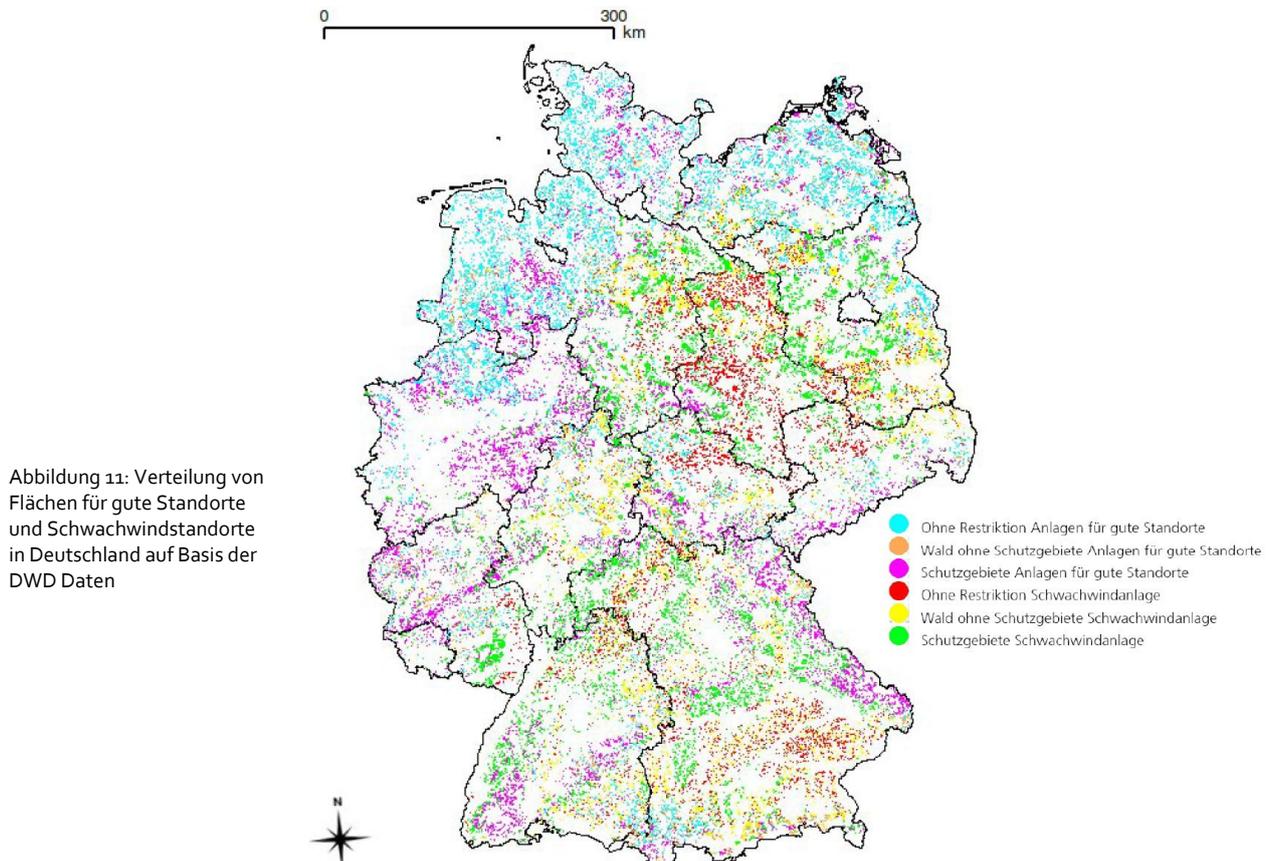
Abbildung 10: Nutzbare Flächen in den Bundesländern für verschiedene Szenarien in km<sup>2</sup>



### 4.3 Installierte Leistung und Erträge

Die installierten Anlagenanzahlen und -leistungen sowie die Erträge werden auf Basis des durch den Bundesverband WindEnergie e. V. vorgegebenen Szenarios berechnet.

Bei Windstandorten mit guten Windbedingungen (bis 1600 äquivalenten Volllaststunden) wurden 3 MW Windenergieanlage mit 2,6 m<sup>2</sup>/kW und einer Nabhöhe von 100 m angenommen. Wenn diese keine 1600 Volllaststunden erreicht, wird die 3 MW Schwachwindanlage mit 3,5 m<sup>2</sup>/kW und einer Nabhöhe von 150 m installiert. Diese erreicht etwa 50 % mehr Volllaststunden. Wenn diese ebenfalls keine 1600 äquivalente Volllaststunden erreicht, wird die Fläche ausgeschlossen.



Im Szenario zur Flächennutzung von WEA wurden auf Basis der Annahmen und der Datengrundlage Flächen berechnet, die potenziell nutzbar sind. Im beschriebenen Szenario wurden zwei verschiedene Anlagentypen mit einer Nennleistung von 3 MW verwendet. Die hier dargestellten Ergebnisse stellen eine allgemeine Abschätzung des maximalen Potenzials dar und sollen nicht als ein angestrebtes Szenario verstanden werden. Auf 8 % (28.116 km<sup>2</sup>) der Flächen ohne Restriktionen ergeben sich bei dem Verfahren 240.562 Anlagen mit einer Leistung von etwa 722 GW installierter Leistung. Diese Anzahl steigt bei der Nutzung aller potenziellen Flächen (22 % von Deutschland) auf ca. 1500 GW.

Die gesamte installierbare Leistung auf Flächen außerhalb von Wald und Schutzgebieten beträgt 722 GW. Dies ist knapp 5mal so viel wie die derzeit in Deutschland installierte gesamten Kraftwerkskapazität von 156 GW [BDEW 2011].

#### 4.3.1 Nutzung von zwei Prozent der deutschen Fläche

Es lässt sich somit festhalten, dass die vom Auftraggeber angenommenen Flächenszenarien von 2 % der Flächen von Deutschland realistisch sind.

Daraus ergibt sich eine installierte Leistung von 189 GW bei 62.839 WEA. Der Ertrag kann mit 390 TWh/Jahr abgeschätzt werden. Dies entspricht ca. 65% des deutschen Bruttostromverbrauchs von 603 TWh im Jahr 2010 [BMWI 2011].

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Auf den Unterschied zwischen Deutschland und der Summe der Bundesländer wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

Tabelle 2: Energie- und Leistungspotential bei Nutzung von 2% der deutschen Landfläche

	Maximales Potential (Flächen ohne Restriktionen) [GW]	Volllaststunden	Nutzung von 2% der Fläche	
			Leistung [GW]	Ertrag [TWh]
Deutschland	722	2071	189	390
Summe der Bundesländer	722	2071	198	410

Aufgrund der Windbedingungen und der damit verbundenen verschiedenen Anlagentypen und Rotordurchmesser ergeben sich für die Bundesländer verschiedene Verhältnisse der installierten Nennleistung zu den verfügbaren Flächen.

#### 4.3.2 Ergebnisse pro Bundesland

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse für die Bundesländer zusammengefasst. Die Zahlen basieren auf der Annahme, dass die Anlagen weiterhin außerhalb von Wald und Schutzgebieten errichtet werden, wobei die Nutzung dieser Flächen durchaus sinnvoll ist und z.B. die Abstände zu Ortschaften noch weiter erhöhen könnte. Durch die Diversifizierung der nutzbaren Flächen kommt es zu unterschiedlichen Ausnutzungsgraden (installierte Leistung/nutzbare Fläche) in den Bundesländern (Bsp.: wenn eine nutzbare Fläche von 100 m x 100 m bestimmt wurde, wird hier eine Anlage platziert und man kommt zu einer Flächennutzung für diese Anlage von  $3\text{MW} / (100\text{m} \times 100\text{m}) = 3\text{MW/ha}$ , also  $0,3\text{ha/MW}$ . Wenn jedoch die Anlage auf einer größeren zusammenhängenden Fläche platziert wird, müssen aufgrund des

geforderten Abstands von 4 Rotordurchmessern zur nächsten Anlage 5,6MW/ha angesetzt werden). Durch die Gewichtung der unterschiedlichen Ausnutzungsgrade durch die Größe der Bundesländer ergibt sich rechnerisch ein unterschiedliches Potential für Deutschland und die Summierung der Bundesländer. Durch diesen Effekt kommt es gerade bei den Stadtstaaten (hohe Diversifizierung der Flächen) zu hohen installierten Kapazitäten unter der 2% Nutzungsprämisse (Zahlen in der Tabelle in Klammern). Diese liegen unter Umständen über dem oben bestimmten Potential. Deshalb wurde das Potential auf das geringere verfügbare Potential beschränkt.

Tabelle 3: Energie- und Leistungspotential bei Nutzung von 2% der Landesflächen

	Maximales Potential		Volllaststunden	Nutzung von 2% der Fläche	
	Gesamt	Flächen ohne Restriktionen		Leistung [GW]	Ertrag [TWh]
Deutschland	1581	722	2071	189	390
Summe der Bundesländer	1581	722	2071	198	410
Baden-Württemberg	163	46	1953	23	45
Bayern	316	115	1948	41	80
Berlin	0,3	0,0	1793	0,3 (0,6)	0,6
Brandenburg	139	55	1920	13	26
Bremen	0,2	0,1	2053	0,2 (0,4)	0,3
Hamburg	0,3	0,1	1936	0,3 (2,0)	0,6
Hessen	77	24	1965	14	28
Mecklenburg-Vorpommern	139	84	1985	11	23
Niedersachsen	292	160	2146	26	56
Nordrhein-Westfalen	86	45	2011	20	41
Rheinland-Pfalz	60	25	2037	12	25
Saarland	2,4	0,6	1933	2,4 (2,8)	4,6
Sachsen-Anhalt	91	47	2074	7,4	15
Sachsen	55	24	2027	10	20
Schleswig-Holstein	98	62	2605	9	23
Thüringen	64	34	1977	7,5	15

## 5 Belastbarkeit der Ergebnisse

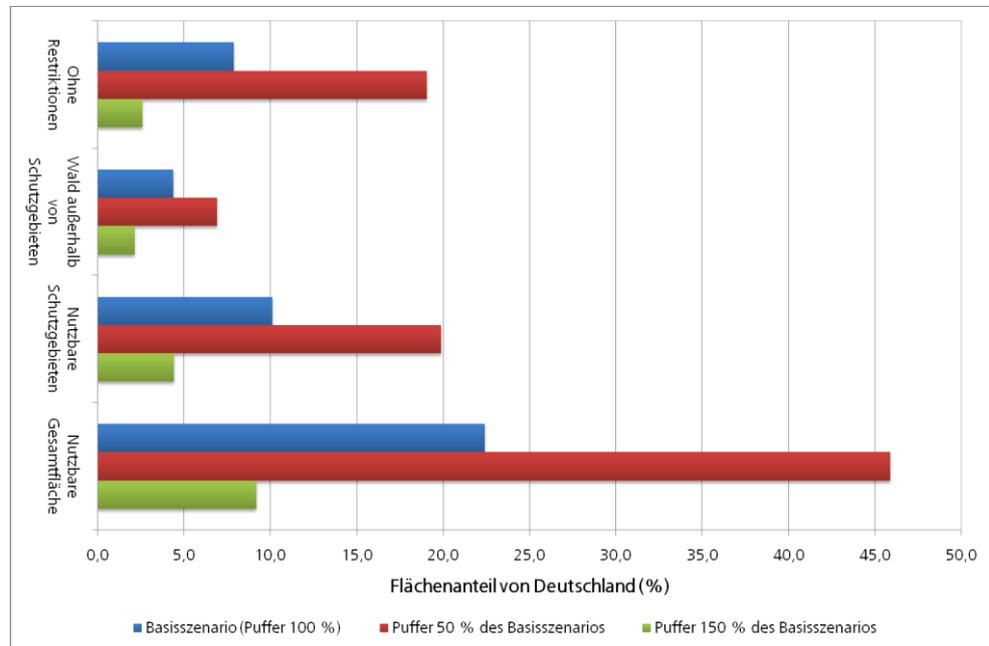
In der Langfassung der Studie ist eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse dargestellt. An dieser Stelle sollen nur die Haupteinflussfaktoren diskutiert und so die Belastbarkeit der Ergebnisse gezeigt werden.

### 5.1 Einfluss der Pufferung auf die verfügbaren Flächen

Der Abstand der WEA zu bestimmten Gebieten und Verkehrswegen (z. B. Siedlungen, Straßen, schiffbaren Flüssen) wird bei der Berechnung als Puffer umgesetzt. Die Abstandsannahmen/Puffer wurden oben erläutert. Um die Auswirkung der Pufferung insgesamt bewerten zu können, wurden die Puffer um 50 % vergrößert bzw. reduziert.

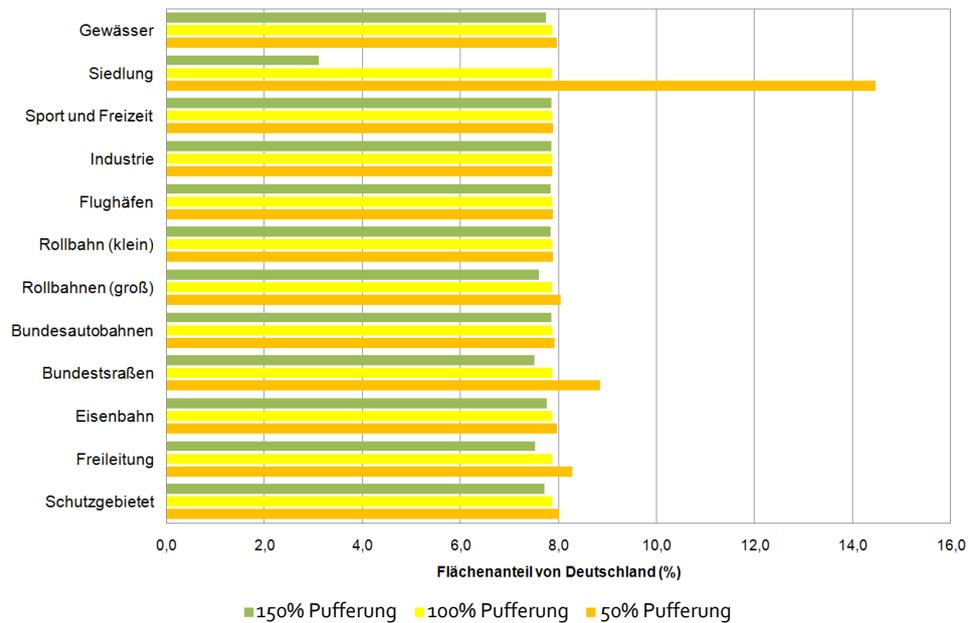
Insgesamt hat sich gezeigt, dass die Pufferung einen entscheidenden Einfluss auf die verfügbaren Flächen hat. Eine deutliche Änderung der Puffergrößen, wie bei der Sensitivitätsanalyse angenommen (+/-50 %), führt zu einer massiven Veränderung der Flächen (siehe Abbildung 12). Die Reduktion des Puffers um 50 % führt zu einer Erhöhung der Fläche um den Faktor 2,5. Eine Vergrößerung des Puffers um 50% reduziert die nutzbare Fläche auf 1/3 des Basiswertes. Auch die potenziell nutzbaren Flächen im Wald außerhalb von Schutzgebieten (Erhöhung um 57 % bzw. Reduktion um 51%) und in Natur- und Landschaftsschutzgebieten (Erhöhung um 96 % bzw. Reduktion um 56%) werden stark (wenn auch nicht ganz so drastisch wie die Flächen ohne Restriktionen) von dem Puffer beeinflusst. Der Grund für den größeren Einfluss auf die Flächen ohne Restriktionen (hauptsächlich Felder und Wiesen) sind vermutlich deren Lage in der Nähe von Städten und Verkehrswegen, die von der Veränderung des Puffers besonders stark betroffen sind.

Abbildung 12: Auswirkung der Pufferung aller Layer auf die potenziell nutzbaren Flächen



Im nächsten Schritt wird untersucht, wie sich die Änderung einzelner Puffer auf die nutzbaren Flächen auswirkt. Hierfür wird jeder Layer einzeln verändert (+/- 50 %), während die anderen Layer konstant bei einem Pufferwert von 100 % bleiben. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt deutlich, dass der Abstand zu den Siedlungen der entscheidende Faktor ist. Wird der Puffer dieses Layers um 50 % reduziert, steigt beispielsweise die potenziell nutzbare Fläche ohne Restriktionen von etwa 8 % auf 14,5 % der Gesamtfläche Deutschlands (siehe Abbildung 13). Eine ähnliche Dominanz des Einflusses von Siedlungen zeigt sich auch bei der Erhöhung des Puffers. Hier hat die Erhöhung des Puffers um 50 % zur Folge, dass die nutzbare Fläche ohne Restriktionen um 60 % auf 3 % der deutschen Fläche reduziert wird. Auch im Bereich der Waldgebiete außerhalb von Schutzgebieten und in Natur- und Landschaftsschutzgebieten ist der Puffer der Siedlungsfläche die mit Abstand wichtigste Größe.

Abbildung 13:  
Auswirkung der  
Reduktion (-50 %) bzw.  
Erhöhung einzelner  
Pufferung auf die  
nutzbaren Flächen



Eine ähnliche Dominanz des Einflusses von Siedlungen zeigt sich auch bei der Erhöhung des Puffers. Hier hat die Erhöhung des Puffers um 50 % zur Folge, dass die nutzbare Fläche ohne Restriktionen um 60 % auf 3 % der deutschen Fläche reduziert wird. Auch im Bereich der Waldgebiete außerhalb von Schutzgebieten und in Natur- und Landschaftsschutzgebieten ist der Puffer der Siedlungsfläche die mit Abstand wichtigste Größe. Der Grund für die Dominanz des Siedlungs-Layers ist in der Anzahl und Größe der Siedlungsflächen sowie in der Größe des Puffers (1000 m im Basisszenario) zu sehen.

## 5.2 Vergleich mit heutigen Windparks

Um die Ergebnisse zu plausibilisieren, wurde analysiert, inwieweit die heute bestehenden Windparks (Stand 2009, ca. 19000 WEA) innerhalb der nutzbaren Flächen liegen. Exemplarisch ist das Ergebnis für eine norddeutsche Region in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Windparks der Struktur der nutzbaren Flächen folgen, jedoch meist darüber hinausgehen. Dies zeigt, dass die Annahmen der Puffer für heutige Parks eher zu groß als zu klein gewählt wurden und in dieser Hinsicht die nutzbaren Flächen eine Abschätzung nach unten darstellen.

Abbildung 14: Heutiger Stand der Anlagen in Nordwestdeutschland (Schwarz) und berechnete nutzbare Flächen

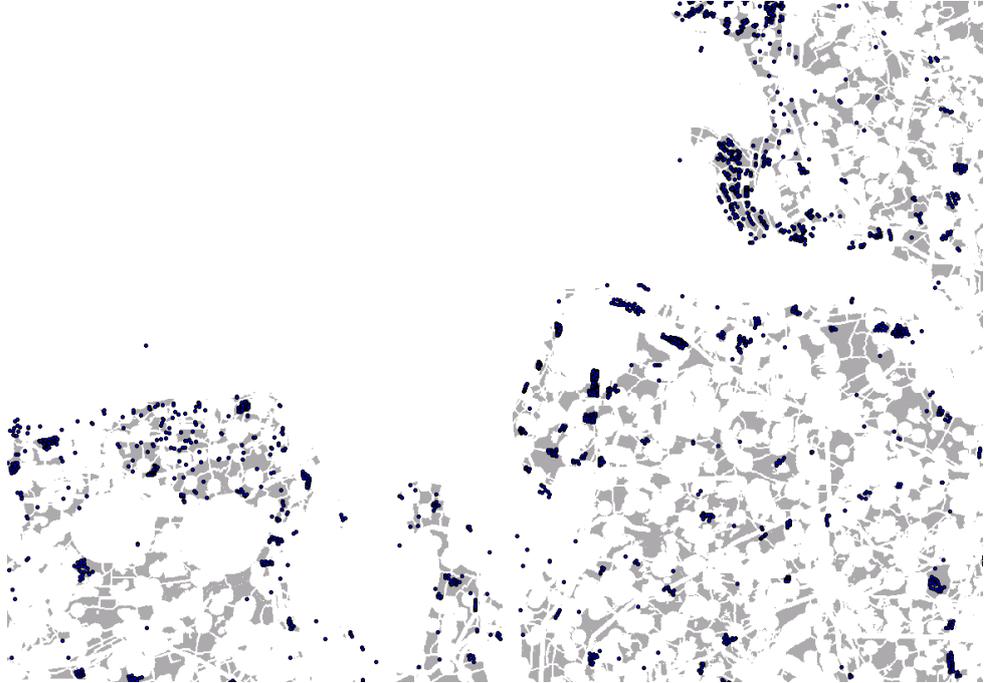
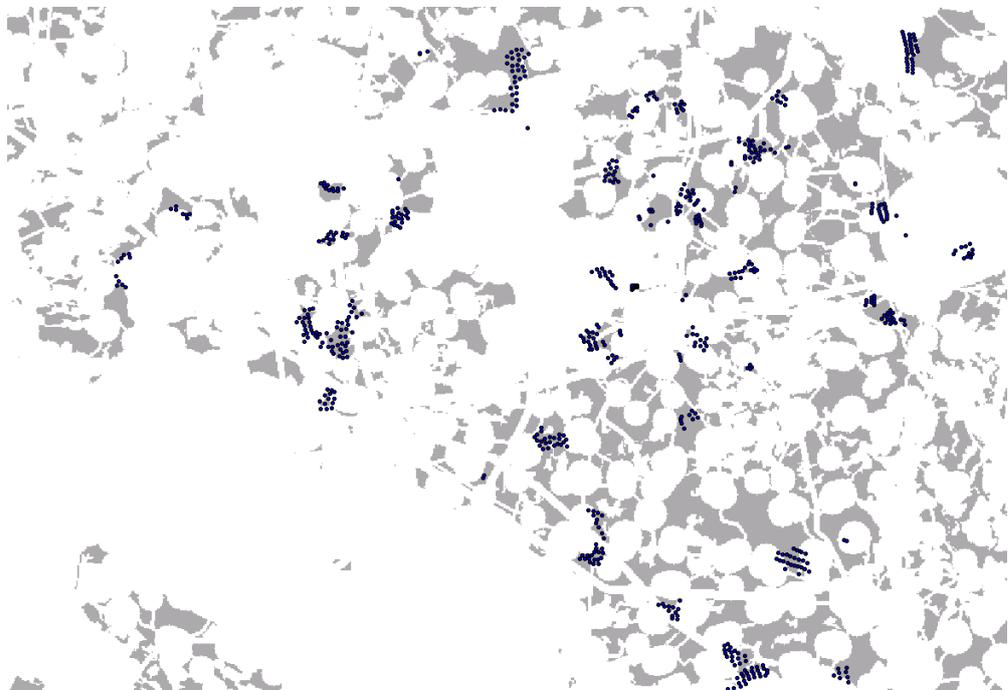
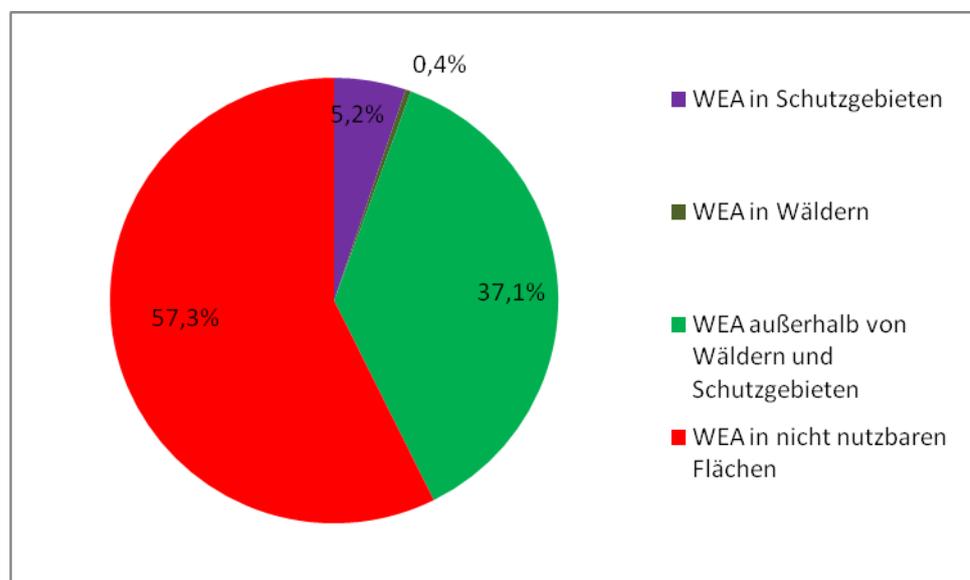


Abbildung 15: Heutiger Stand der Anlagen in einer Nordwestdeutschen Region (Schwarz) und berechnete nutzbare Flächen



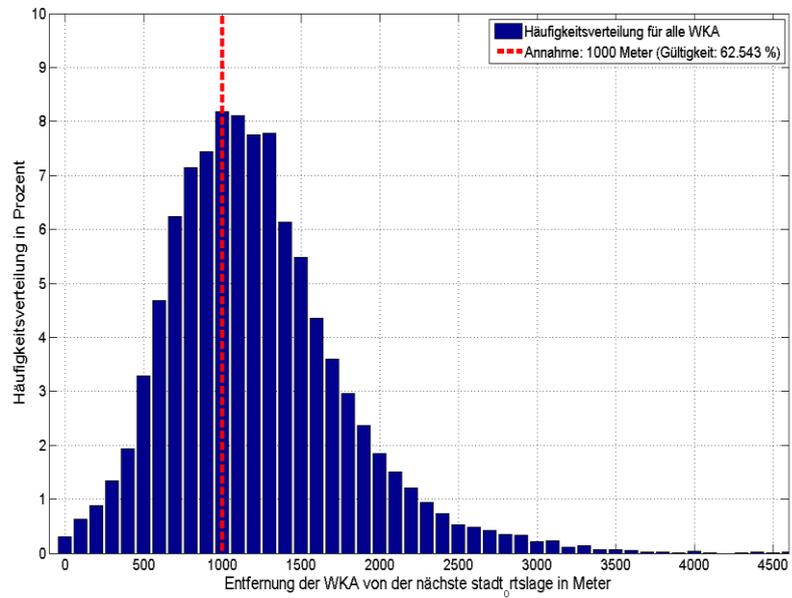
Es wird deutlich das eine Vielzahl der existierenden Windparks in den als nutzbaren Flächen definierten Bereichen liegen, jedoch reichen sie oft über deren Grenzen hinaus und liegen in der Pufferzone der Siedlungsgebiete. Damit lässt sich darauf schließen, dass die Pufferung eher eine Abschätzung nach unten darstellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 zusammenfassend nach den 3 Flächenkategorien dargestellt. Knappe 60% aller Anlagen stehen in Flächen, die nach den oben genannten Kriterien auszuschließen wären. In Wäldern steht, wie erwartet, nur ein sehr geringer Teil der Anlagen.

Abbildung 16: Heutige WEA in den verschiedenen Flächenkategorien



Um diese Effekte näher zu betrachten wurden wieder die geringsten Abstände jeder WEA zu den verschiedenen Ausschlussflächen analysiert. Erneut zeigte sich das besondere Gewicht des Siedlungs-Layers. Zur Verdeutlichung wird an dieser Stelle exemplarisch das Ergebnis für die Entfernung zu Siedlungsflächen dargestellt (umfangreichere Analysen finden sich in der Langfassung), siehe Abbildung 17. Es wird deutlich, dass der Anlagenbestand viel näher an Ortschaften heranreicht, als der in der Studie angenommene Puffer von 1000m (eingezeichnet in rot). Dies liegt zum einen an dem älteren Anlagenbestand (geringe Nabenhöhe), den sich verändernden rechtlichen Rahmenbedingungen, aber auch am wissenschaftlich konservativen Ansatz von 1000m Pufferung in alle Richtungen um eine Siedlung.

Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung des Abstand von heutigen WEA zu Ortschaften. In rot der für die Studie angesetzte Puffer.



### 5.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend wird deutlich, dass gerade bei den Siedlungs-Layern, die den größten Einfluss auf das Ergebnis haben (siehe Abschnitt 5.1), große Unsicherheiten bestehen. Auf der einen Seite werden nicht alle Gebäude, wie einzeln stehende Höfe, abgebildet, auf der anderen Seite ist die Pufferzone von 1000m gerade bei kleineren Orten als großzügig anzusehen. Diese beiden Effekte sind gegenläufig und somit wird der Effekt auf das Endergebnis reduziert.

Insgesamt wird deutlich, dass viele der heutigen Windparks in den nutzbaren Flächen liegen. Einige liegen in den Ausschlussflächen, so dass insgesamt die getroffenen Annahmen als plausibel angesehen werden können. Abweichungen im Detail lassen sich auf der verfügbaren Datengrundlage nicht allgemein bestimmen.

In der Langfassung finden sich neben den hier aufgeführten Ergebnissen noch weitere Details:

- Vergleich der Erträge auf Basis von DWD mit dem Anemos-Windatlas
- Detaillierte Untersuchung des Einflusses der Pufferung auf das Ergebnis
- Vergleich der Platzierung der Anlagen mit einer vereinfachten Platzierung mit einem regelmäßigen Gitter
- Detaillierte Abstandsanalyse des aktuellen Bestands
- Einfluss der technischen Kennwerte (Nabenhöhe, Nennleistung usw.) der angenommenen WEA

## 6 Gesamt-Zusammenfassung

Im Rahmen der Studie wurde auf Basis der Bodenbedeckungsdaten und Vorgaben des BWE ein Potential der Windenergienutzung in Deutschland bestimmt. Die Ergebnisse sind alle plausibel, unterliegen jedoch den folgenden Unsicherheiten:

- Durch die Auflösung der Inputdaten, insbesondere der CORINE-Daten, können einige lokale Effekte nicht abgebildet werden
- In der Studie werden Richtwerte der möglichen Energieerträge angegeben. Diese berücksichtigen keine lokalen Aspekte der Orographie oder Topographie, Hindernisse oder kleinskalige Windverhältnisse und sind daher als Vergleichsgröße zwischen Regionen anzusehen und nicht als absolute zu erwartende Erträge.

Die Ergebnisse lassen sich mit obigen Einschränkungen wie folgt zusammenfassen:

- Die Studie bietet auf Basis homogener Eingangsdaten eine stark regionalisierte Potentialanalyse
- ca. 7,9 % der (Onshore-)Fläche Deutschlands sind für Windenergienutzung geeignet. Bei Berücksichtigung von Wäldern und zusätzlich Schutzgebieten ergeben sich 12,3 % bzw. 22,4 % nutzbare Fläche
- Damit ist das vom Auftraggeber aufgezeigte Szenario mit 2 % Flächennutzung als absolut realistisch anzusehen

In einer Sensitivitätsanalyse wurde die Belastbarkeit der Ergebnisse überprüft. Hier zeigte sich insbesondere der Einfluss der diversifizierten Siedlungsstruktur mit großen Pufferzonen. Insgesamt können die Ergebnisse jedoch mit oben aufgeführten Einschränkungen als belastbar angesehen werden. Details zur Sensitivitätsanalyse sind in der Langfassung der Studie zu finden.

## 7 Literaturverzeichnis

- [anemos 2010] anemos, Wind atlas for Germany, handout, download, 30.09.2010,
- [BDEW 2011] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Webseite, Nettoleistung der Kraftwerke in Deutschland, Stand September 2010, URL: [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE\\_Energiedaten](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Energiedaten)
- [BMWI] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Referat III C 3, Zahlen und Fakten - Energiedaten – nationale und internationale Entwicklung, Stand 13.01.2011
- [BKG 2003] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Digitales Landschaftsmodell 1:25000 DLM250, Frankfurt am Main, 19.09.2003
- [BKG 2008] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Digitales Basis-Landschaftsmodell BASIS-DLM, Frankfurt am Main, 14.10.2008
- [CORINE] CORINE Daten, <http://www.umweltbundesamt.at/umwelt/raumordnung/flaeche/nutzung/corine/>, besucht am 22.3.2011
- [DWD] Deutscher Wetterdienst, Wulf-Peter Gerth, Winddaten für Deutschland – Bezugszeitraum 1981 – 2000, Offenbach
- [dena 2005] Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena), Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020, Köln 24.02.2005
- [dena 2010] Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena), dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025, Berlin, 11.2010
- [HVBG 2010] Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation, Produktkatalog Heft 3, Luftbildprodukte, Wiesbaden 2010
- [nE 2006] neue Energie, Flaute im Kopf, Artikel, Ausgabe: 02.2006

[Riso 1990]      Europäischer Windatlas, Riso National Laboratory, Roskilde,  
Denmark, 1990