

FLÄCHENPOTENZIALE DER WINDENERGIE AN LAND 2022

September 2022

Dr. Carsten Pape, David Geiger, Christoph Zink

Miron Thylmann, Dr. Wolfgang Peters, Silvio Hildebrandt

Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE

Joseph-Beuys-Straße 8

34117 Kassel

Tel: +49 561 7294-265

www.iee.fraunhofer.de

Bosch & Partner GmbH

Kantstraße 63a

10627 Berlin

Tel: +49 30 609 88 44-60

www.boschpartner.de

Auftraggeber: Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE)

Kurzzusammenfassung

Der Ausbau der Windenergie ist ein zentraler Baustein für die Erreichung der Ziele der Energiewende. Die vorliegende Studie untersucht das Flächenpotenzial der Windenergie an Land und stellt damit eine Weiterentwicklung der Analysen des BWE aus dem Jahr 2012¹ dar.

Als eine der Neuerungen erfolgt zusätzlich zu einer Weißflächenkartierung auch eine Raumbewertung für die grundsätzlich für die Windenergienutzung verfügbaren Flächen. Je nach Höhe des ermittelten „Konfliktrisikos“, also der Wahrscheinlichkeit und des Gewichts einer Windenergienutzung entgegenstehender Belange, werden die Flächen zu unterschiedlichen Anteilen als Flächenpotenzial angerechnet. Die Annahmen zur Eignung und Bewertung der Nutzbarkeit wurden in mehreren Workshops mit dem BWE und dessen Experten aus der Praxis festgelegt. Für die Analysen wurde weiterhin eine verbesserte (Geo-)Datenbasis sowie die fortschreitende technologische Entwicklung der Windenergie berücksichtigt.

Durch Abbildung der nicht geeigneten Flächen wurde eine Fläche von 94.268 km² bzw. 26 % des Bundesgebiets ermittelt, auf denen die Windenergienutzung nicht ausgeschlossen ist. Nach Anwendung der Raumbewertung und den abgeleiteten Faktoren für die Nutzbarkeit ergibt sich ein bundesweites Flächenpotenzial von 20.890 km² bzw. 5,8 % des Bundesgebiets. Davon entfallen 0,26 % auf Flächen, die durch einen Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 frei werden.

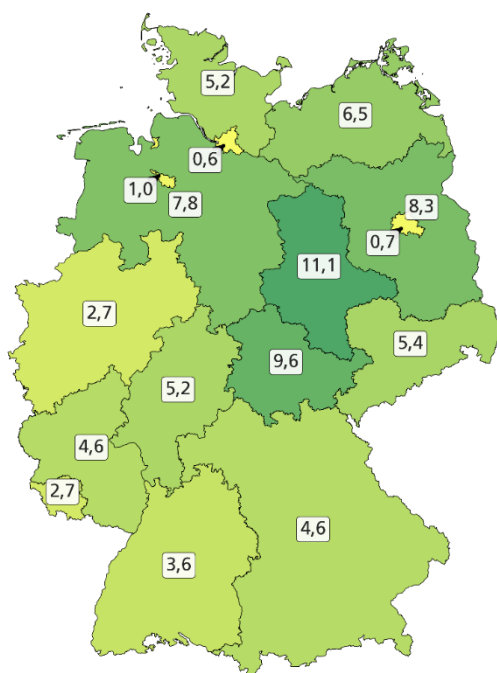


Abbildung 1: Ermittelte Flächenpotenziale einschließlich Repoweringflächen.

Das ermittelte Flächenpotenzial weist deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Bundesländern auf (Abbildung 1). Während in den Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen nur

¹ [BWE 2012]

0,6 bis 1,0 % der Fläche für die Windenergienutzung verfügbar sind, beläuft sich das Flächenpotenzial der Flächenländer auf 2,7 % im Saarland und Nordrhein-Westfalen bis 11,1 % in Sachsen-Anhalt. Insbesondere in den fünf neuen Ländern ist das Potenzial mit durchschnittlich 8,2 % überdurchschnittlich hoch, aber auch die Länder Niedersachsen (7,8 %), Schleswig-Holstein (5,2 %) und Hessen (5,2 %) weisen Flächenpotenziale > 5 % des Landesgebiets auf.

Die Ergebnisse zeigen, dass die im Koalitionsvertrag der Bundesregierung vereinbarten und im Windenergieflächenbedarfsgesetz (WindBG) festgelegten Gebietsausweisungen von durchschnittlich 2,0 % des Bundesgebiets für alle (Flächen-)Bundesländer realisierbar sind. Während die Bundesregierung bis 2040 eine installierte Leistung der Windenergieanlagen an Land in Höhe von 160 GW anstrebt, weisen die Analysen auf ein deutlich höheres Leistungspotenzial hin, welches sich je nach Berechnungsansatz auf 405 bis 640 GW beläuft. Entsprechend können auf den Flächen Energieträge von ca. 970 bis 1.700 TWh erzielt werden.

Kurzzusammenfassung	3
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung und bisherige Arbeiten	10
2 Simulation	12
2.1 Bestands-Windenergieanlagen	13
2.2 Technologieentwicklung Windenergieanlagen	13
2.3 Ermittlung der Ausschlussflächen	15
2.3.1 Siedlungsabstände	16
2.3.2 Luftverkehr	17
2.3.3 Verkehr	18
2.3.4 Infrastruktur	18
2.3.5 Militärische Belange	18
2.3.6 Schutzgebiete	18
2.3.7 Sonstige	19
2.4 Vorgehensweise der Raumbewertung	21
2.4.1 Siedlungsabstände	22
2.4.2 Natur- und Landschaftsschutz	22
2.4.3 Vogelschutz außerhalb von Schutzgebieten	23
2.5 Anwendung von KRW-Faktoren	25
2.6 Sonderbetrachtungen	25
2.6.1 Repowering-Potenziale	26
2.6.2 Industrie- und Gewerbegebiete	27
2.7 Leistungsermittlung	27
2.8 Ertragsermittlung	29
3 Ergebnisse	31
3.1 Flächenpotenziale	31
3.2 Leistungs- und Ertragspotenziale	36
3.3 Sonderbetrachtung Repowering	37
3.4 Sonderbetrachtung Industriegebiete	37
4 Einordnung der Ergebnisse	40
5 Anhang	44
5.1 Inputdaten	44
5.2 Ergebnistabelle	49
5.3 Ländersteckbriefe	50
6 Literatur	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ermittelte Flächenpotenziale einschließlich Repoweringflächen.....	3
Abbildung 2: Prozesskette für die Modellierung des Windpotenzials in Deutschland.....	12
Abbildung 3: Mittlere Windgeschwindigkeit auf 150 m über Grund nach Global Wind Atlas. ...	13
Abbildung 4: Auswertung von Rotordurchmesser, Nennleistung und Nabelhöhe von Zubau-WEA zwischen 2012 und 2022 (Q1) sowie Genehmigungen ab 2019.	14
Abbildung 5: Exemplarische Überlagerung verschiedener Geodaten-Layer zur Abbildung eines aggregierten Ausschlusslayer.	16
Abbildung 6: Gebiete mit Windgeschwindigkeit < 6,5 m/s (weiß dargestellt) sowie betroffene Flächenanteile je Bundesland.	20
Abbildung 7: Gebiete mit einer Hangneigung von mehr als 30 %.....	20
Abbildung 8: Einteilung der Schutzgüter in Schutzgutgruppen.	22
Abbildung 9: Ermittlung von Repoweringflächen aus den (Punkt-)Standorten bis 2030 zurückgebauter Windenergieanlagen.....	27
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Anlagenplatzierung zur Leistungsermittlung.....	28
Abbildung 11: Anlagenplatzierung mit 4 RD x 3 RD auf die ermittelten KRW-Flächen 1 bis 5...	29
Abbildung 12: Glättung der Leistungskennlinie durch Faltung mit Gauss-Verteilung.....	30
Abbildung 13: Überlagerung der Ausschlussflächen (links) mit der flächendeckenden Raumbewertung (rechts).	31
Abbildung 14: Flächenpotenziale für die Windenergienutzung mit unterschiedlicher Konfliktrisikobewertung.	32
Abbildung 15: Absolute Nicht-Ausschlussfläche in Deutschland, aufgeteilt nach Konfliktrisikowerten (KRW), ohne Repoweringflächen.	33
Abbildung 16: Relative Nicht-Ausschlussfläche in Deutschland, aufgeteilt nach Konfliktrisikowerten (KRW), ohne Repoweringflächen	34
Abbildung 17: Absolutes Flächenpotenzial je Bundesland nach Anwendung der KRW-Faktoren.	35
Abbildung 18: Relatives Flächenpotenzial je Bundesland nach Anwendung der KRW-Faktoren.	35
Abbildung 19: Flächenpotenzial je Bundesland nach Anwendung des KRW-Faktors einschließlich der Repoweringflächen bis 2030.	40
Abbildung 20: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Brandenburg.....	51
Abbildung 21: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Berlin.....	53
Abbildung 22: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Baden-Württemberg.	55

Abbildung 23: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Bayern.....	57
Abbildung 24: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Bremen.....	60
Abbildung 25: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Hessen.....	63
Abbildung 26: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Hamburg.....	65
Abbildung 27: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Mecklenburg-Vorpommern.....	67
Abbildung 28: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Niedersachsen.....	69
Abbildung 29: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Nordrhein-Westfalen.....	71
Abbildung 30: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Rheinland-Pfalz.....	73
Abbildung 31: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Schleswig-Holstein.....	75
Abbildung 32: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für das Saarland.....	77
Abbildung 33: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Sachsen.....	79
Abbildung 34: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Sachsen-Anhalt.....	81
Abbildung 35: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Thüringen.....	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter der Referenz-WEA für 2026.....	15
Tabelle 2: Gewichtungsmatrix nach vogelartspezifischer Dichteklasse (vDK) und vorhabentypspezifischen Mortalitäts-Gefährdungs-Index (vMGI)	24
Tabelle 3: KRW-Werte mit zugeordneter Umsetzungswahrscheinlichkeit in Form von KRW-Faktoren.	25
Tabelle 4: Installierbare Leistung, Energieerträge und durchschnittliche Volllaststunden.	36
Tabelle 5: Repoweringflächen, installierbare Leistung sowie erzielbare Erträge.....	37
Tabelle 6: Sensitivität Industrie- und Gewerbegebiete – Flächenpotenzial in Prozent des Landesfläche nach Anwendung der KRW-Faktoren.	38
Tabelle 7: Hauptunterschiede zwischen der Herangehensweise in dieser Studie und den Ergebnissen der BMWK-Studie „Analyse der Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030“, „Basisszenario“, Variante B [BMWK 2022].	43
Tabelle 8: Siedlungsflächen	44
Tabelle 9: Verkehrsflächen.....	44
Tabelle 10: Naturschutz.....	45
Tabelle 11: Mess- und Radarstationen.....	47
Tabelle 12: Sonstige	48

Abkürzungsverzeichnis

ADEBAR	Atlas Deutscher Brutvogelarten
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
Basis-DLM	Digitales Basis-Landschaftsmodell
BB	Brandenburg
BE	Berlin
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
CLC	CORINE-Landbedeckungsmodell
CVOR	Classic Very High Frequency Omnidirectional Radio (Drehfunkfeuer)
DVOR	Doppler Very High Frequency Omnidirectional Radio (Drehfunkfeuer)
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
GIS	Geoinformationssystem
GW	Gigawatt
H	Gesamthöhe (analog zu 10H-Regelung in Bayern)
ha	Hektar
HB	Hansestadt Bremen
HE	Hessen
HH	Hansestadt Hamburg
KRK	Konfliktrisikoklasse
KRW	Konfliktrisikowert
kWh	Kilowattstunde
LoD1	Level-of-Detail1 (einfaches 3D-Gebäudemodell)
LSG	Landschaftsschutzgebiet
MV	Mecklenburg-Vorpommern
MW	Megawatt
NI	Niedersachsen
NW	Nordrhein-Westfalen
OSM	OpenStreetMap
RD	Rotordurchmesser
RP	Rheinland-Pfalz
SH	Schleswig-Holstein
SL	Saarland
SN	Sachsen
ST	Sachsen-Anhalt
TH	Thüringen
TK	Topografische Karte
TWh	Terawattstunde
UBA	Umweltbundesamt
UMK	Umweltministerkonferenz
vDK	Vogelartspezifische Dichteklasse
vMGI	Vorhabenstypspezifischer Mortalitätsgefährdungsindex
VSG	Vogelschutzgebiet
WEA	Windenergieanlage
WindBG	Windenergieflächenbedarfsgesetz

1 Einleitung und bisherige Arbeiten

Um den immer stärkeren Auswirkungen des menschengemachten Klimawandels entgegenzuwirken, ist eine Reduktion von Treibhausgasemissionen dringend erforderlich. Da der Energiesektor für 82,8 % der anthropogenen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist [UBA 2021], stellt die Transformation des Energieversorgungssystems hin zu erneuerbaren Energien aktuell eine zentrale Aufgabe für Politik und Gesellschaft dar.

Die Energieträger Wind und Solar weisen die höchsten Potenziale bei gleichzeitig niedrigsten Stromgestehungskosten auf, weshalb der Ausbau der erneuerbaren Energien primär bei diesen zwei Technologien erfolgen wird. Dabei ergänzen sich beide Technologien aufgrund ihrer zeitlichen Erzeugungseigenschaften sehr gut. Photovoltaik weist ein ausgeprägtes tages- und jahreszeitliches Erzeugungsmuster, mit maximaler Erzeugungsleistung tagsüber und während des Sommerhalbjahres, auf. Im Gegensatz dazu ist die durchschnittliche Windenergieerzeugung gleichmäßiger über das Jahr und über den Tagesgang verteilt, wobei überdurchschnittliche Erträge primär in den Herbst- und Wintermonaten beobachtet werden. Ebenfalls ist bei modernen Windenergieanlagen die Erzeugungsleistung während der Nachtstunden überdurchschnittlich hoch, sodass sich die Erzeugung beider Technologien gegenseitig gut ergänzt und diese somit die Integration in das Energieversorgungssystem erleichtern.

Entsprechend ist der Ausbau der Windenergie ein zentraler Baustein für die Erreichung der Ziele der Energiewende. Neben dem Klimaschutz liefert der Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine weitere Argumente für eine Reduktion der Abhängigkeit von importierten Energieträgern und somit einen Ausbau der erneuerbaren Energien.

Größtes Hemmnis für einen beschleunigten Ausbau der Windenergie ist aktuell, neben langen Genehmigungsprozessen sowie häufigen Akzeptanz-, Natur- und Artenschutzkonflikten, die Verfügbarkeit von Flächen für die Errichtung neuer Anlagen. Aktuell sind nur ca. 0,8 % des Bundesgebiets für die Windenergienutzung ausgewiesen, während deren tatsächliche Nutzbarkeit sich auf ca. 0,5 % beläuft [UBA 2019]. Mit dem Koalitionsvertrag von SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP wurden klare Ziele für die Bereitstellung von Flächen für die Windenergienutzung benannt. Dort heißt es: „Für die Windenergie an Land sollen zwei Prozent der Landesflächen ausgewiesen werden“. Dies deckt sich mit einer Forderung, die der BWE bereits 2012 formuliert und mit einer bundesweiten Analyse des Flächenpotenzials für die Windenergienutzung untermauert hat [BWE 2012].

Mittlerweile sind die Anforderungen für die Errichtung von Windenergieanlagen zunehmend weiterentwickelt worden und haben sich verändert, u. a. weil Windenergieanlagen deutlich größer geworden sind, aber auch weil die Anforderungen an den Schutz von Mensch und Natur fortgeschrieben wurden.

Die vorliegende Studie stellt eine Aktualisierung der 2012 erstellten Studie dar. Dabei werden die Potenziale der Windenergie auf Basis einer aktuellen, verbesserten Datenbasis erhoben. Die Kriterien für einzuhaltende Schutzabstände sind an die aktuelle Planungspraxis angepasst, wobei auch der Größenentwicklung der Windenergieanlagen Rechnung getragen wird, indem Abstandsanforderungen zum Teil als Vielfaches der Gesamthöhe der Windenergieanlagen festgelegt werden.

Im Gegensatz zu den früheren Arbeiten [BWE 2012, UBA 2013] werden die Potenziale nicht in Form einer Weißflächenanalyse (geeignet/ nicht geeignet) ermittelt, sondern es werden die grundsätzlich für die Windenergienutzung nicht ausgeschlossen Flächen einer Raumbewertung unterzogen und Faktoren für die Nutzbarkeit der unterschiedlichen Bewertungskategorien angesetzt. In die Raumbewertung fließen neben detaillierten naturschutzfachlichen Daten u.a. räumlich aufgelöste Daten des Artenschutzes ein. Da der Artenschutz immer wieder als Grund gegen eine Windenergienutzung angeführt wird, wird mit der hier angewandten Methodik die Konfliktrichtigkeit eines potenziellen Standortes hinsichtlich des Artenschutzes, aber auch zahlreicher weiterer potenzieller Belange, in die Potenzialermittlung mit aufgenommen und bei der Potenzialabschätzung berücksichtigt.

Abschließend wird mithilfe einer weiterentwickelten Anlagenplatzierung das Leistungspotenzial für eine Bebauung der ermittelten Flächen mit modernen Windenergieanlagen berechnet und die erzielbaren Erträge abgeschätzt.

2 Simulation

Die Analysen zum Potenzial der Windenergie in Deutschland erfolgen entlang einer Prozesskette (Abbildung 2). Im ersten Schritt werden die Flächen ermittelt, die aufgrund harter Tabukriterien und Restriktionen nicht für eine Windenergienutzung geeignet sind. Die verbleibenden Gebiete außerhalb dieser Ausschlussflächen werden im nächsten Schritt einer Raumbewertung unterzogen, bei der eventuelle Nutzungskonflikte gegenüber einer Windenergienutzung abgewogen und bewertet werden. Dabei orientiert sich die Bewertung an einer Abwägung, welcher prozentuale Anteil der Flächen, trotz der festgestellten Nutzungskonflikte für die Windenergie nutzbar wäre. Dieser Anteil wird als Faktoren auf die bewerteten Nicht-Ausschlussflächen angewendet, wodurch ein Flächenpotenzial abgeleitet wird.

Zusätzlich zum Flächenpotenzial wird ermittelt, welche Anlagenanzahl und -leistung auf den ermittelten Flächen installiert werden kann. Dies erfolgt mithilfe eines am Fraunhofer IEE entwickelten Anlagenplatzierungsalgorithmus, der unter Einhaltung zuvor festgesetzter Randbedingungen die auf den Flächen platzierbare Anzahl an Windenergieanlagen ermittelt. Aus den zuvor festgelegten Annahmen zur Technologieentwicklung sowie den Kriterien für den Anlagentyp am jeweiligen Standort kann die auf den Flächen installierbare Leistung und somit ein Leistungspotenzial ermittelt werden.

Im letzten Schritt der Analysen erfolgt eine Abschätzung des Energieertrags, der durch einen Zubau von Windenergieanlagen auf den ermittelten Flächen erzielt werden könnte. Hierfür werden mit dem Windleistungsmodell des Fraunhofer IEE zunächst Leistungszeitreihen für die historischen meteorologischen Jahre 2006 bis 2012 berechnet und schließlich die über diesen Zeitraum durchschnittlichen Vollbenutzungsstunden bestimmt.

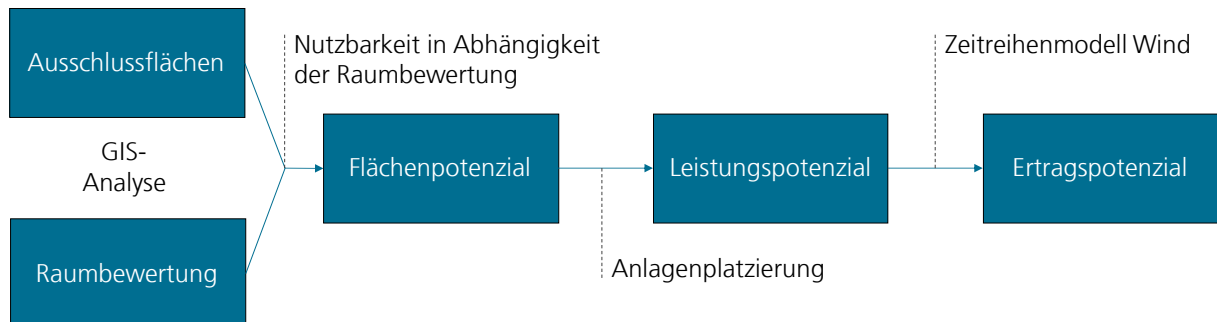


Abbildung 2: Prozesskette für die Modellierung des Windpotenzials in Deutschland.

Die Analysen fokussieren sich auf ein einzelnes Szenario, ohne den Einfluss verschiedener Faktoren mithilfe von Sensitivitätsrechnungen zu bestimmen. Es werden jedoch zwei zusätzliche Betrachtungen angestellt, um mögliche Stellschrauben für einen beschleunigten Windenergieausbau zu untersuchen. Einerseits wird ermittelt, welchen Beitrag ein vereinfachtes Repowering von Windenergieanlagen für einen beschleunigten Windenergieausbau liefern kann, andererseits wird durch eine Sonderrechnung bestimmt, welches Potenzial zusätzlich erschlossen werden kann, wenn ein Zubau von Windenergieanlagen in unmittelbarer Nähe zu Industrie- und Gewerbeflächen vereinfacht möglich wird.

2.1 Bestands-Windenergieanlagen

Laut Koalitionsvertrag sollen Windenergieanlagen an bestehenden Standorten vereinfacht durch neue, moderne Anlagen ersetzt – also repowert – werden können. Um abbilden zu können, wo zusätzlich zum ermittelten Flächenpotenzial Repoweringflächen frei werden, ist ein aktueller Datensatz der Windenergieanlagen im Bestand erforderlich.

Datenbasis hierfür ist ein am Fraunhofer IEE aus mehreren Datensätzen zusammengesetzter Datensatz [vgl. UBA 2019 und UBA (in Veröffentlichung)] der Bestandsanlagen mit Datenstand Ende 1. Quartal 2022.

2.2 Technologieentwicklung Windenergieanlagen

Windenergieanlagen sind in den vergangenen Jahren immer größer und leistungsfähiger geworden, womit eine Reduktion der Stromgestehungskosten auf mittlerweile meist deutlich unter 8 ct/kWh einhergeht [ISE 2021]. Einerseits werden durch die größeren Anlagen mit höheren Nabenhöhen höhere durchschnittliche Windgeschwindigkeiten erschlossen, andererseits lassen sich die spezifischen Installations-, Investitions- und Wartungskosten durch die größere Anlagendimensionierung senken. Für die Ermittlung des Potenzials der Windenergie müssen zunächst Festlegungen für Referenzwindenergieanlagen gemacht werden.

Es wird bei der Modellierung zwischen einer Stark- und einer Schwachwindanlage unterschieden, wobei die Entscheidung, welcher Anlagentyp auf den Potenzialflächen im Modell abgebildet wird, von der mittleren Windgeschwindigkeit in 150 m Höhe über Grund anhand des Global Wind Atlas abhängt. Ab 8,5 m/s wird ein Zubau der Starkwindanlage angenommen, während an Standorten unterhalb von 8,5 m/s ein Zubau der Schwachwindanlage im Modell erfolgt. Abbildung 3 zeigt, wie sich der Zubau von Stark- und Schwachwindanlagen bei den genannten Annahmen verteilt.

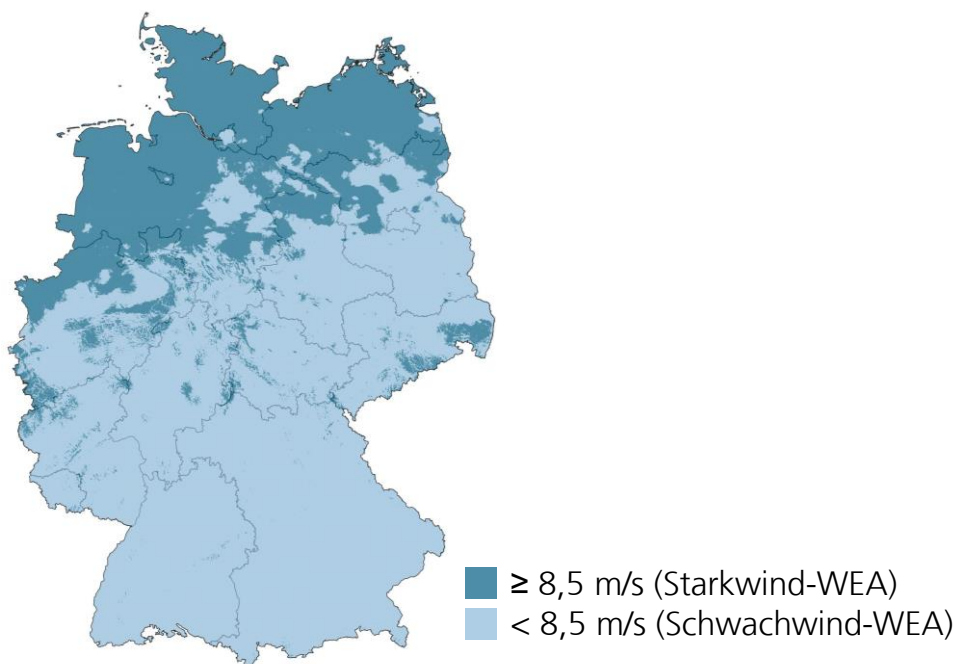


Abbildung 3: Mittlere Windgeschwindigkeit auf 150 m über Grund nach Global Wind Atlas. (Daten: www.globalwindatlas.info; © GeoBasis-DE / BKG (2021))

Die Annahmen für die Referenzanlagen orientieren sich an einer Auswertung der Bestandsanlagen sowie der bereits genehmigten Anlagen. Abbildung 4 zeigt Durchschnittswerte der Parameter

Rotordurchmesser, Nennleistung und Nabenhöhe der zwischen 2012 bis 2022 (1. Quartal) zugebauten sowie der ab 2019 genehmigten Windenergieanlagen in Deutschland.

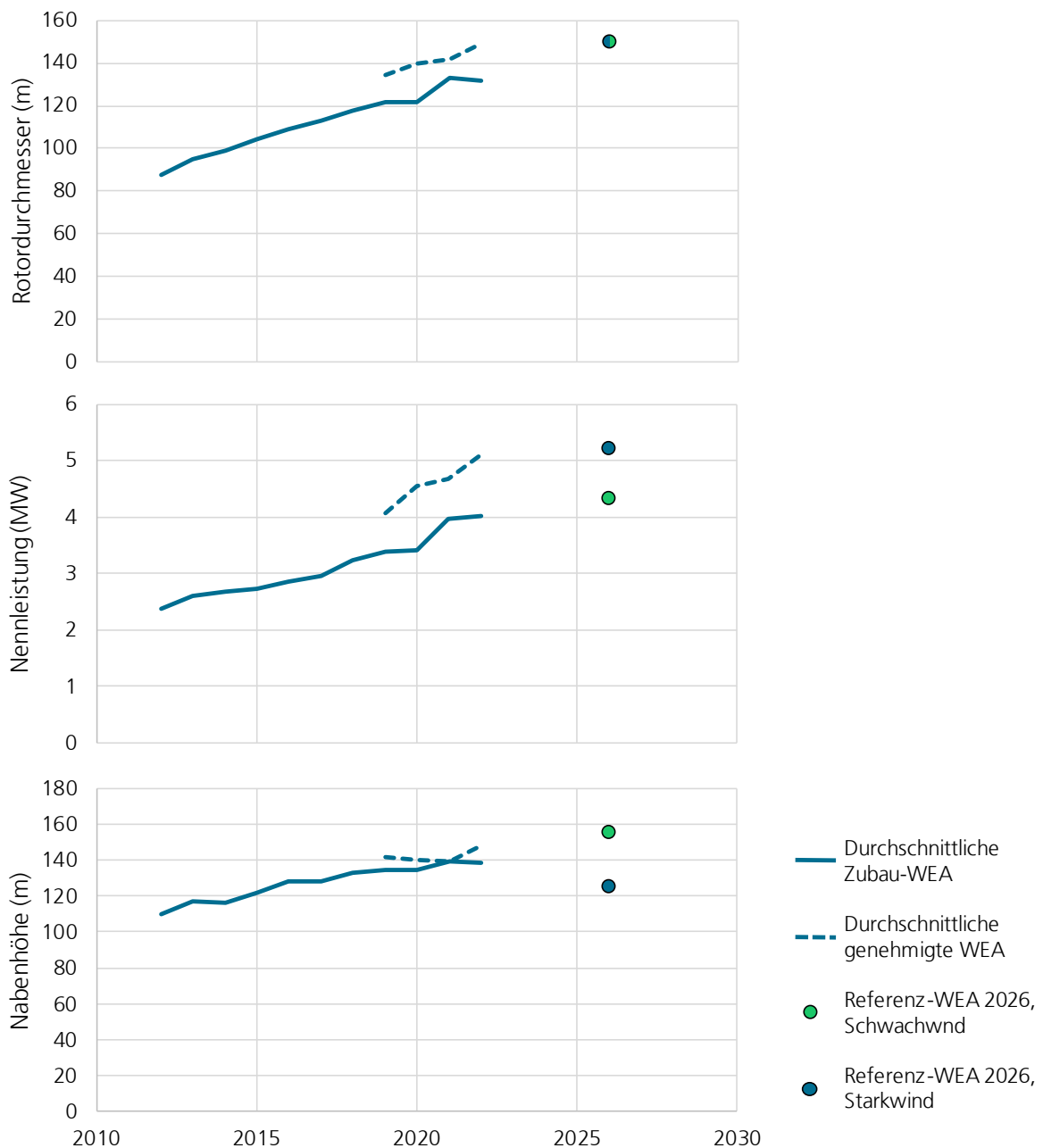


Abbildung 4: Auswertung von Rotordurchmesser, Nennleistung und Nabenhöhe von Zubau-WEA zwischen 2012 und 2022 (Q1) sowie Genehmigungen ab 2019. (Daten: Fachagentur Windenergie an Land e. V. auf Basis des MaStR)

Die Anlagenentwicklung ist nicht abgeschlossen, sondern schreitet weiter voran. Die durchschnittliche im ersten Quartal 2022 in Deutschland genehmigte Windenergieanlage weist einen Rotordurchmesser von 149 m bei einer Nennleistung von 5,1 MW auf. Die durchschnittliche Nabenhöhe beträgt bei diesen Anlagen ca. 138 m.

Für die Modellierung des Potenzials der Windenergie an Land soll abgebildet werden, welche Anlagenanzahl und Gesamtleistung bis 2030 auf den Flächen installiert werden kann.

Entsprechend sollten durchschnittliche, zwischen heute und 2030 zugebaute Windenergieanlagen als Referenzanlage dienen. Daher werden für 2026 durchschnittlich zu erwartende Windenergieanlagenparameter gewählt, allerdings gegenüber Abbildung 4 zusätzlich differenziert nach Stark- und Schwachwindanlagen.

Die oberste Abbildung zeigt den durchschnittlichen Rotordurchmesser der Windenergieanlagen in Deutschland im betrachteten Zeitraum. Es sind sowohl der Durchschnittswert der Zubauanlagen der jeweiligen Jahre dargestellt (durchgezogene Linie) als auch ab 2019 der Mittelwert der im gleichen Jahr genehmigten Anlagen (gestrichelte Linie). Deren Inbetriebnahme erfolgt ca. 2-3 Jahre nach der Genehmigung, sodass die gestrichelten Linien für die genehmigten WEA für eine Fortschreibung des Trends um 2-3 Jahre nach rechts verschoben werden müssten.

Die für die Modellierung angenommenen Parameter der Referenzanlagen sind als grüne und blaue Punkte dargestellt. Beim Rotordurchmesser wird vereinfachend von einem einheitlichen Wert der Stark- und Schwachwindanlagen von 150 m für die Abbildung der Windenergieanlagen im Jahr 2026 ausgegangen.

Die Differenzierung zwischen Stark- und Schwachwindanlagen erfolgt primär über die Parameter Nabhöhe und spezifische Flächenleistung, also die je Quadratmeter Rotorkreisfläche verbaute Generatorleistung in Watt pro Quadratmeter. Die Nabhöhe wird wiederum hergeleitet, indem für die Starkwindanlage ein Abstand zwischen Rotorblattspitze und Grund von 50 m bzw. für die Schwachwindanlage ein Wert von ca. 80 m angenommen wird. Nennleistung und Gesamthöhe lassen sich dann aus den getroffenen Annahmen errechnen.

Tabelle 1 zeigt die auf diese Weise hergeleiteten Parameter der Referenzanlagen für 2026.

Tabelle 1: Parameter der Referenz-WEA für 2026

	Referenzanlage Schwachwind 2026	Referenzanlage Starkwind 2026
Nennleistung (MW)	4,33	5,21
Rotordurchmesser (m)	150	150
Nabhöhe (m)	155	125
Spez. Flächenleistung (W/m ²)	295	245
Abstand Rotorblattspitze zum Grund (m)	80	50
Gesamthöhe (m)	230	200

2.3 Ermittlung der Ausschlussflächen

Für die GIS-Analyse werden Geodaten zur räumlichen Darstellung der auszuschließenden Gebietskategorien benötigt. Hierfür sollten nach Möglichkeit immer deutschlandweit verfügbare Daten verwendet werden, sodass das Windpotenzial mit einer einheitlichen Datenbasis ermittelt wird, ohne dass systematische Unterschiede zwischen den Bundesländern die Vergleichbarkeit der

Ergebnisse einschränken. Aufgrund der Nutzungsrechte sind die Daten des Digitalen Basis-Landschaftsmodells (Basis-DLM) für dieses Vorhaben nicht kostenfrei verwendbar, sodass stattdessen für viele Gebietskategorien Geodaten aus OpenStreetMap (OSM) verwendet werden. Diese haben mittlerweile eine sehr gute Qualität erreicht und bilden die relevanten Flächen beinahe gleich gut ab, wie das Basis-DLM. Zahlreiche weitere Datensätze wie beispielsweise die Schutzgebiete des Bundesamts für Naturschutz (BfN) stehen für eine freie Nutzung zur Verfügung. Des Weiteren wurden eigene GIS-Layer aus veröffentlichten Daten generiert.

Die Festlegung der als Ausschluss- und Bewertungskriterien herangezogenen Flächenkategorien sowie deren Wertzuweisung erfolgte in mehreren Workshops mit dem BWE und dessen Experten aus der Praxis. Zur besseren Übersicht werden die einzeln verfügbaren Flächenkategorien themenspezifisch gruppiert. Die als Ausschluss eingestuften Kategorien sind beispielsweise Wohnbesiedlung, Luftverkehr, Verkehr und Infrastruktur, militärische Belange und (Natur-) Schutzgebiete. Ausschlussgründe, die nicht direkt den oben genannten Kategorien zugeordnet werden können, werden unter „Sonstige“ subsummiert.

Die Analysen erfolgen in einer PostgreSQL-Datenbank mit PostGIS-Erweiterung, die skriptbasiert über Python oder Matlab angesteuert werden kann. Die Eingangsdaten werden zunächst extrahiert, nach den relevanten Kategorien gefiltert und in die Datenbank hochgeladen. Über eine Tabelle werden anzusetzende Puffer vorgegeben und die Pufferung in der PostGIS-Datenbank umgesetzt, bevor die Daten anschließend in ein boolesches Raster mit einer Gitterweite von 25 m x 25 m überführt werden. Von der Windenergienutzung ausgeschlossene Flächen werden skriptbasiert wie in Abbildung 5 dargestellt überlagert und zu einem Ausschlusslayer zusammengefasst.

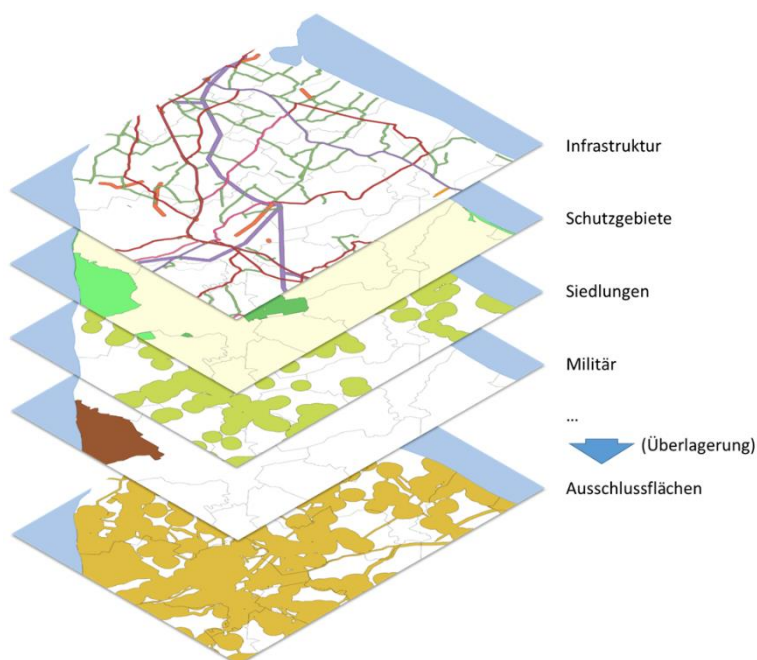


Abbildung 5: Exemplarische Überlagerung verschiedener Geodaten-Layer zur Abbildung eines aggregierten Ausschlusslayer.

2.3.1 Siedlungsabstände

Die Errichtung von Windenergieanlagen in weniger als der 2-fachen Gesamthöhe zu Wohnbausiedlungen im Innenbereich, aber auch zu Wohngebäuden im Außenbereich, wird

aufgrund der baurechtlich unzulässigen bedrängenden Wirkung ausgeschlossen. Entsprechend werden die für Wohnzwecke genutzten Flächen mit 2H gepuffert und als Ausschlussfläche abgebildet. Da sich die Gesamthöhe der Stark- und Schwachwindanlage unterscheidet, ist es bei der Pufferung mit einem Vielfachen der Gesamthöhe erforderlich, den zu errichtenden Anlagentyp zu berücksichtigen. Dies erfolgt anhand der mittleren Windgeschwindigkeit am Standort. Neben der Berücksichtigung der Siedlungsflächen als Ausschlussflächen, gehen erweiterte Radien (2H-3H) in die Raumbewertung ein (vgl. 2.4.1).

Datenbasis für die Abbildung der Siedlungsflächen im Innenbereich bildet OpenStreetmap. Für Wohngebäude im Außenbereich werden die Einwohnerzahlen im 100m-Raster des Zensus2011 [Zensus2011 2012] außerhalb der Siedlungsflächen nach OpenStreetMap verwendet. Ein visueller Abgleich mit Orthophotos sowie Liegenschafts- und LoD1-Daten zeigt eine gute Übereinstimmung für die Abgrenzung der Wohngebäude im Außenbereich.

Weitere als Ausschluss festgelegte Siedlungsflächen:

- Industrie- und Gewerbegebiete (300 m)
- Sport- und Erholungsgebiete (2H)
- Kliniken und Kurgelände (3H)

2.3.2 Luftverkehr

Zu den Einrichtungen des Luftverkehrs mit Rückwirkungen auf das Potenzial der Windenergie zählen Drehfunkfeuer, Radarsysteme der Flugsicherung sowie Flughäfen und angrenzende Bauschutzbereiche.

Bei den Drehfunkfeuern wird nicht der Status quo der Anlagen abgebildet, sondern es wurden politische Zusagen zu möglichen Umbauten von CVOR- zu DVOR-Anlagen berücksichtigt, ebenso absehbare Außerbetriebnahmen, um die Situation bis 2030 abzubilden. Laut dem Osterpaket der Bundesregierung wird die Anzahl an Drehfunkfeuern bis 2030 auf ca. 38 Anlagen reduziert. Da entsprechend der Recherche alle CVOR-Anlagen rückgebaut oder umgerüstet werden (Ausnahme Helgoland), mussten lediglich Annahmen für DVOR-Anlagen getroffen werden. Hier wird ein Schutzradius von 3 km als Ausschlussfläche angenommen, während der Ring von 310 km mit KRK 3 in die Raumbewertung eingeht. Im sogenannten Osterpaket ist eine Verkleinerung der Anlagenschutzbereiche für Drehfunkfeuer von 15 auf 6-7 km vorgesehen.

Für die Radarsysteme zur Flugsicherung wird ein Radius von 5 km als Ausschluss für die Windenergie angesetzt.

Durch den BWE wurde eine Liste mit 58 Flughäfen bereitgestellt, die mit dem Instrumentenflugverfahren arbeiten. Für diese Flughäfen wird sich an § 12 Luftverkehrsgesetz orientiert. Es wird zusätzlich zur Grundfläche ein Radius von 1,5 km als Ausschlussfläche abgebildet sowie bis 6 km Entfernung mit der KRK 4 bewertet. Weiterhin werden die Anflugsektoren bis 10 km von der Windenergie ausgeschlossen und im Bereich zwischen 10 und 15 km mit KRK 3 bewertet.

Kleinere Flughäfen und Flugplätze ohne Instrumentenflugverfahren werden angelehnt an § 17 Luftverkehrsgesetz mit Radien von 1,5 km um den Flughafenbezugspunkt als Ausschlussfläche abgebildet, während zusätzlich bis 2,5 km die Konfliktrisikoklasse 4 angesetzt wird.

2.3.3 Verkehr

Die einzuhaltenden Abstände zu Straßen und Bahnstrecken werden als feste Puffer abgebildet. Bei Straßen wird nicht zwischen Autobahnen und anderen Straßen unterschieden, sondern ein einheitlicher Puffer von 40 m als Bauverbotszone angenommen, wobei zusätzlich um eine halbe Straßenbreite gepuffert wird, sofern die Daten als Linie und nicht als Fläche bzw. Polygon vorliegen.

Weiterhin werden Gleisanlagen, Schienenwege und Seilbahnen zuzüglich eines 100m-Puffers als Ausschlussfläche abgebildet.

2.3.4 Infrastruktur

Diverse Infrastrukturen werden bei der Modellierung ebenfalls als Ausschlussflächen abgebildet. Hierzu zählen Freileitungen der verschiedenen Spannungsebenen und Umspannwerke, Deichanlagen unterschiedlicher Funktion, Pumpspeicherkraftwerke und Solaranlagen, seismologische Messstationen, Wetterradare und Windprofiler-Radarsysteme. Die abgebildeten Ausschlussflächen und eventuell zusätzlich für die Modellierung angenommene Konfliktrisikoklassen finden sich im Anhang (Abschnitt 5.1). Während für die meisten Infrastrukturen feste Annahmen getroffen werden, wird bei den seismologischen Stationen nach deren Funktion bzw. Bedeutung zu differenziert. Dabei wird der Messarray im Bayerischen Wald mit einem 15 km-Puffer als Ausschlussfläche berücksichtigt, während Stationen globaler Bedeutung mit 5 km gepuffert werden, Stationen regionaler Bedeutung mit 3 km sowie Stationen lokaler Bedeutung mit 1 km. Einzelne Stationen z.B. mit Projektrelevanz werden gar nicht in die Modellierung der Ausschlussflächen aufgenommen, da davon auszugehen ist, dass diese nur zeitlich begrenzt betrieben werden.

2.3.5 Militärische Belange

Die berücksichtigten militärischen Belange umfassen Radaranlagen, einschließlich der Radaranlagen der Landesverteidigung, Flugsicherungsanlagen sowie militärisch genutzte Flughäfen, Truppenübungsplätze und sonstige Flächen. Als Datenquelle dient ein durch das Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr bereitgestellter Datensatz, der die oben beschriebenen Gebietskategorien umfasst. Ergänzt wurde dieser Datensatz um einzelne Flächen aus OpenStreetMap sowie um eine erweiterte Abbildung des Bauschutzbereiches der militärischen Flughäfen analog zu den zivilen Flughäfen (s.o.). Die angesetzten Puffer finden sich in Kapitel 5.1.

2.3.6 Schutzgebiete

Als Ausschluss abgebildet werden bei der Modellierung die Kern- und Pflegezonen der Biosphärenreservate, Naturschutzgebiete, Nationalparke, Naturwaldreservate, Wildnisgebiete sowie Wildnisentwicklungsgebiete. Dabei wurden jeweils die Grundflächen als Ausschlussflächen angenommen, während eventuelle Schutzabstände zu diesen Gebieten im Rahmen der Raumbewertung berücksichtigt wurden (siehe Kapitel 2.4.2). Die Geodaten der Schutzgebiete wurden weitgehend vollständig durch das Bundesamt für Naturschutz bereitgestellt. Lediglich die Naturwaldreservate wurden aus einzelnen Datensätzen der Bundesländer zusammengestellt.

Weiterhin bildet die Modellierung ab, dass die Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete für die Schutzzone I sowie Schutzzone II bis zu einer Größe von 2.000 ha als Ausschlussgebiete zählen.

Daten hierzu stammen von der Bundesanstalt für Gewässerkunde sowie für die Bundesländer Rheinland-Pfalz, Thüringen und Baden-Württemberg aus individuellen Recherchen bzw. Anfragen.

2.3.7 Sonstige

Diverse weitere Ausschlussflächen wurden bei den Analysen berücksichtigt. Hierzu zählen Bodenbewegungsgebiete, Rieselfelder, Hafenbecken sowie Flächen besonderer funktionaler Prägung. Weiterhin wurden die Landesgrenze sowie die Küstenlinie mit jeweils einer Pufferung des Rotorradius als Ausschlussflächen abgebildet, um sicherzustellen, dass keine Turbinen über die Landesgrenze hinausragen oder direkt an der Küstenlinie errichtet werden. Weiterhin werden eine Mindestwindgeschwindigkeit sowie eine maximale Hangneigung angesetzt. Diese werden im Folgenden beschrieben

Windgeschwindigkeit

Die Eignung von Gebieten für die Windenergienutzung ist, neben weiteren Faktoren, abhängig von einer gewissen Mindest-Windhöflichkeit, die eine wesentliche Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen ist. Zwar können mit modernen Windenergieanlagen mit Turmhöhen von 150 m und höher mittlerweile auch an vergleichsweise windschwachen Standorten nennenswerte Erträge erzielt werden, jedoch nur zu höheren Stromgestehungskosten. Das Referenzertragsmodell des Erneuerbare-Energien-Gesetzes gleicht zwar die unterschiedliche Standortgüte weitgehend aus, jedoch nur bis zu einer Standortgüte von 60 % zum Zeitpunkt der Kriterienfestlegung. Die tatsächliche Wirtschaftlichkeit einer Windenergieanlage lässt sich aber nicht pauschal beurteilen, sondern muss für jedes Projekt standortspezifisch bewertet werden. Dabei reicht die Windgeschwindigkeit als einzige Kenngröße nicht aus.

Basierend auf einer Auswertung des Anlagenbestands wurde ein Grenzwert von 6,5 m/s in 150 m Höhe festgelegt (Abbildung 6) – etwa 99 % der Bestands-Windenergieanlagen stehen an Standorten mit einer Windgeschwindigkeit oberhalb von 6,5 m/s. Datenbasis hierfür ist der Global Wind Atlas, wobei immer zu berücksichtigen ist, dass verschiedene Windatlanten stark voneinander abweichen können und daher der absolute Zahlenwert nur in Verbindung mit der zugrunde gelegten Datenquelle aussagekräftig ist.

Der Global Wind Atlas liefert eine einheitliche, räumlich hoch aufgelöste Datenbasis, jedoch werden Windgeschwindigkeiten (für Deutschland) tendenziell zu hoch erfasst. Entsprechend bedeutet dies, dass ein wirtschaftlicher Betrieb von Windenergieanlagen auch an Standorten möglich ist, an denen die tatsächliche mittlere Windgeschwindigkeit geringer als die angesetzten 6,5 m/s in 150 m Höhe ist. Weiterhin kann ein Windatlas nie ein standortspezifisches Windgutachten ersetzen, da nur ein solches Gutachten eine verlässliche Bewertung der lokalen Windsituation erlaubt.

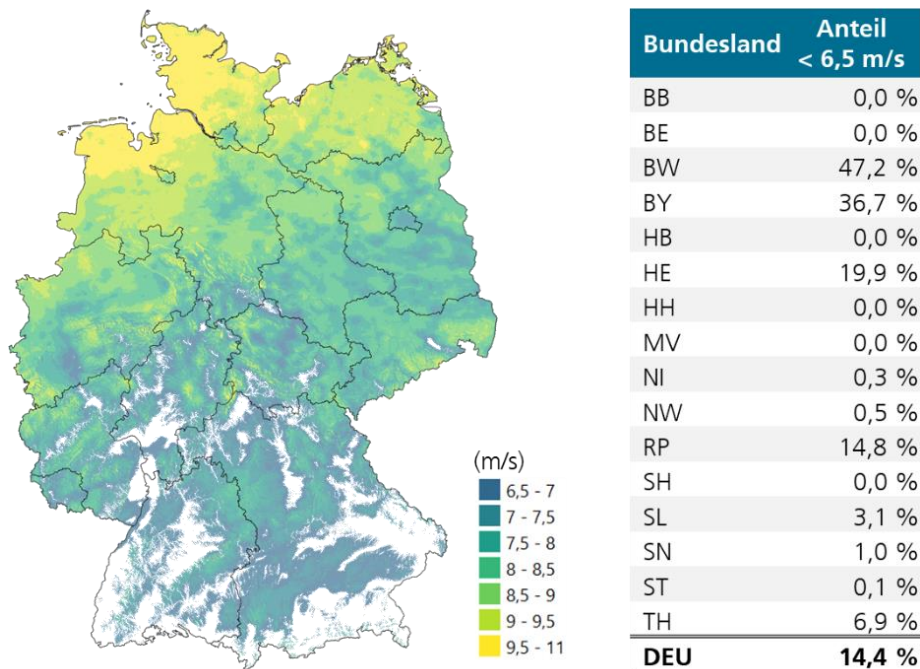


Abbildung 6: Gebiete mit Windgeschwindigkeit < 6,5 m/s (weiß dargestellt) sowie betroffene Flächenanteile je Bundesland. (Daten: globalwindatlas.info; © GeoBasis-DE / BKG (2021)).

Hangneigung

Weiterhin stellt eine zu große Hangneigung ein Hemmnis für die Errichtung von Windenergieanlagen dar, da Untergrund, Zuwegung und Transport an Standorten mit zu großer Hangneigung problematisch sein können, ebenso die Installation als solche. Es wurde ein maximaler Grenzwert von 30 % Steigung bei einer Auflösung des Geländemodells von 30 m festgelegt (Abbildung 7).

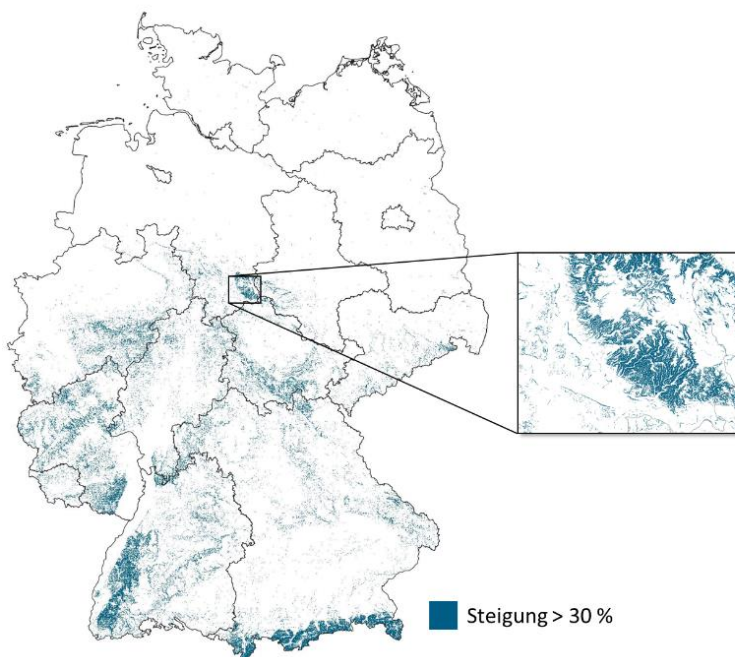


Abbildung 7: Gebiete mit einer Hangneigung von mehr als 30 %. (Datenbasis: European Digital Elevation Model, Copernicus; © GeoBasis-DE / BKG (2021))

2.4 Vorgehensweise der Raumbewertung

Die hier angewendete Methode zur Erstellung einer bundesweiten Raumbewertung wurde bereits in vorangegangenen Vorhaben entwickelt und angewendet [Riedl et al. 2020; Stemmer et al. (in Veröffentlichung)]. In diesem Projekt dient die Raumbewertung als Grundlage für die anschließende Potenzialanalyse. Das Vorgehen zur Erstellung der Raumbewertung wird im Folgenden kurz beschrieben.

In einem ersten Schritt werden **Ausschlusskategorien** definiert und in den Raum projiziert (siehe Kapitel 2.3). Diese Flächen kommen aus rechtlichen, technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht für die Windenergienutzung in Frage.

Die nicht kategorisch ausgeschlossenen Flächen werden im Hinblick auf mögliche Konflikte durch Windenergienutzung bewertet. Dazu werden die raumbezogen vorliegenden Ausprägungen der von Nutzungs- und Schutzbelangen durch als Geodaten bundesweit vorliegende **Flächenkategorien** abgebildet. Durch die Verwendung bundesweit einheitlicher Geodaten wird sichergestellt, dass die Ergebnisse zwischen einzelnen Bundesländern vergleichbar sind. Die als Geodatensätze vorliegenden Flächenkategorien dienen somit als Indikator für die Art und das Ausmaß der durch Windenergienutzung verursachten negativen Veränderungen der Belange von Naturschutz und Landschaftspflege und die daraus resultierenden Konflikte. Dabei wird auch berücksichtigt, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese Konflikte eintreten würden, wenn auf einer Rasterzelle eine Windenergieanlage errichtet werden würde (Konfliktrisiken). Vor diesem Hintergrund werden die einzelnen Flächenkategorien hinsichtlich der **Bedeutung** (abgeleitet aus umweltrechtlichen Zielen und Maßstäben) und **Empfindlichkeit** der durch sie abgebildeten naturschutzrelevanten Flächeneigenschaften (gegenüber den Wirkungen der Windenergienutzung) sowie der **Abbildungsgenauigkeit** bewertet. Diese Bewertung der Flächenkategorien dient als Grundlage für die Einstufung in 5 **Konfliktrisikoklassen** (KRK):

1 = sehr geringes Konfliktrisiko

2 = geringes Konfliktrisiko

3 = mittleres Konfliktrisiko

4 = hohes Konfliktrisiko

5 = sehr hohes Konfliktrisiko

Durch die Projektion der Flächenkategorien in den Raum wird so eine raumbezogene Bewertung erzeugt, die das Ausmaß des Konfliktrisikos abbildet, welches durch die Wirkungen der Windenergienutzung ergibt. Dazu werden die Flächen in einem GIS-Modell in ein 25 x 25 m Raster überführt und die Konfliktrisikoklassen der sich überlagernden Flächenkategorien im Anschluss nach Maximalwert zu einem **Konfliktrisikowert** (KRW) je Rasterzelle aggregiert.

Immer wenn sich mehrere Restriktionskategorien auf einer Fläche überlagern, die mittlere bis hohe Konflikte mit verschiedenen Schutzgütern indizieren, wird davon ausgegangen, dass ein höheres Konfliktrisiko besteht. Diese **Wechselwirkungen** werden in der Methodik berücksichtigt, indem die verschiedenen Restriktionskategorien mit den durch sie abgebildeten Schutzgütern in drei sogenannte Schutzgutgruppen, nämlich abiotische-, biotische- und anthropogene Schutzgüter eingeteilt werden: (siehe Abbildung 8).

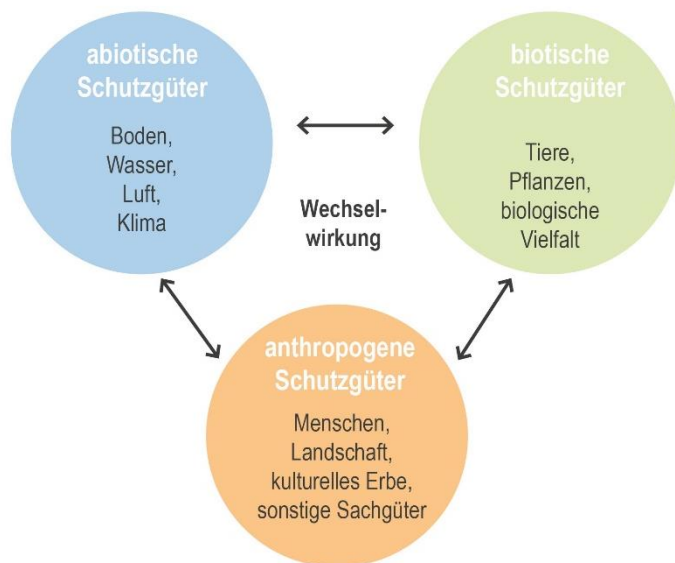


Abbildung 8: Einteilung der Schutzgüter in Schutzgutgruppen. Quelle: Bosch & Partner

Bei der Aggregation der Restriktionskategorien nach Maximalwert erfolgt im GIS-Modell eine Abfrage der jeweiligen Schutzgutgruppe. Wenn in einer 25 x 25 m Rasterzelle eine Überlagerung von Restriktionskategorien vorliegt, die mindestens eine Konfliktrisikoklasse ≥ 3 aufweisen und mindestens zwei Schutzgutgruppen angehören, wird der maximale Konfliktrisikowert dieser Zelle um einen Punkt erhöht. Auf diese Weise erhöht sich die Spanne der Bewertungsskala von fünf auf sechs mögliche Konfliktrisikowerte. Der höchste Konfliktrisikowert (KRW = 6) wird vergeben, wenn vor der Berücksichtigung von kumulativen Effekten bereits mindestens ein Konfliktrisikowert von fünf „sehr hohes Konfliktrisiko“ vorlag. Dieser neuhinzukommende Konfliktrisikowert wird als „sich überlagernde, sehr hohe Konflikte“ bezeichnet.

2.4.1 Siedlungsabstände

In Bezug auf die Siedlungsflächen wird neben dem reinen Ausschlussabstand ein Restriktionsbereich definiert, in dem ein Ausschluss nicht zwingend, die Wahrscheinlichkeit der Umsetzung jedoch aufgrund der zu erwartenden Belastung geringer ist. Der Restriktionsbereich untergliedert sich in einen Bereich von 2 bis 2,5H für den Innen- und Außenbereich mit einer Konfliktrisikoklasse von 5 und einen Bereich von 2,5 bis 3H für den Innen- und Außenbereich mit einer Konfliktrisikoklasse von 4. Dieses Vorgehen bildet nach Auffassung der Experten des BWE die heterogene Situation in der Bundesrepublik und die daraus resultierenden Genehmigungsbedingungen besser ab, als ein fester, einheitlicher Siedlungsabstandswert.

2.4.2 Natur- und Landschaftsschutz

Unter den Restriktionskategorien findet sich eine Vielzahl von Flächenkategorien, die als Indikator für die Konflikte der Windenergienutzung mit den Belangen des Naturschutzes verwendet werden. Die Gesamtheit aller verwendeten Flächenkategorien kann in Anhang 5.1 eingesehen werden.

Einen besonderen Naturschutzaspekt stellen die **Waldgebiete** dar. Je nach Ausstattung und Qualität von **Waldgebieten** sind deren Empfindlichkeit gegenüber den Wirkungen der Windenergienutzung und deren naturschutzfachliche Bedeutung unterschiedlich, was auch zu unterschiedlich starken Konflikten durch die Windenergienutzung führt. Flächendeckende

Geodaten, die Auskunft über die naturschutzfachliche Qualität von Waldbeständen geben, liegen allerdings nicht in einem bundesweiten Maßstab vor. Aus diesem Grund werden die im CORINE Land Cover (5 ha) Datensatz vorhandenen Unterscheidungen in Nadel-, Misch- und Laubwald als Indikator für die Qualität von Waldbeständen genutzt. Es wird davon ausgegangen, dass Laub- und Mischwald eine etwas höhere naturschutzfachliche Qualität aufweisen, als reiner Nadelwald. Laub- und Mischwaldgebiete werden entsprechend mit einer KRK von 4 bewertet, Nadelwälder mit einer KRK von 3. Da der Waldsaum aus naturschutzfachlicher Sicht ein besonderes Jagdhabitat, nicht zuletzt für windsensible Vögel und Fledermäuse darstellt, werden die Waldflächen mit 200 m gepuffert und der Waldsaum mit einer KRK von 3 bewertet.

Landschaftsschutzgebiete (LSG) werden in dieser Studie in die KRK 2 eingestuft. Insgesamt sind die Eigenschaften von LSG im bundesweiten Vergleich sehr unterschiedlich, sodass die Abbildungsgenauigkeit von naturschutzfachlichen Sachverhalten, die eine besondere Empfindlichkeit gegenüber den Wirkungen der Windenergienutzung und eine erhöhte Bedeutung aufweisen, vergleichsweise gering ist. Wenn solche Ausprägungen vorliegen sollten, werden diese häufig zusätzlich durch spezifische Flächenkategorien abgebildet, die die LSG überlagern, sodass den betreffenden Teilflächen dadurch ein höherer Konfliktrisikowert zugewiesen wird. Im Hinblick auf Konflikte mit besonderen Belangen des Landschaftsbildschutzes, die häufig Schutzzweck von LSG sind, wurde die Empfindlichkeit im Hinblick auf die Wirkungen der Windenergienutzung im Abstimmungsprozess mit den Experten des BWE als gering eingestuft.

2.4.3 Vogelschutz außerhalb von Schutzgebieten

Besonders dem **Vogelschutz** kommt bei der Umsetzungswahrscheinlichkeit von Windenergieanlagen eine große Bedeutung zu. In dieser Studie wird zum einen die naturschutzrechtliche Schutzgebietskulisse zur Abbildung der Vorkommen von Vögeln verwendet. **Vogelschutzgebiete** (VSG) werden dabei differenziert bewertet, je nachdem ob in dem Gebiet windsensible Vogelarten vorkommen oder nicht. Die Empfindlichkeit der Vogelarten wird aus dem vorhabentypspezifischen Mortalitäts-Gefährdungs-Index (vMGI) abgeleitet [Bernotat & Dierschke 2016]. Vogelarten, die einen vMGI von A, B oder C aufweisen, werden als empfindlich eingestuft. Entsprechend werden VSG mit Vorkommen empfindlicher Vogelarten mit einem KRK von 5 bewertet und VSG ohne Vorkommen empfindlicher Vogelarten mit einem KRK von 2.

Zur Abbildung der Konflikte mit dem Vogelschutz außerhalb von Schutzgebieten werden als Indikator für das Vorkommen von Vogelarten die Daten des Atlas Deutscher Brutvogelarten (ADEBAR) [Gedeon et al. 2014] verwendet. Diese stellen die einzige bundesweit verfügbare Datengrundlage zu Vogelvorkommen dar. Der hier verwendete Ansatz wurde bereits in verschiedenen Forschungsprojekten angewendet². In die Analyse fließen folgende Datensätze ein:

- Daten aus dem Atlas Deutscher Brutvogelarten (ADEBAR) [Gedeon et al. 2014]
- CORINE Landcover (CLC) [BKG 2018]

² Vgl. Riedl et al. 2020; Stemmer et al. (in Veröffentlichung); BMWK (2022)

- Zuweisung von CLC zum Brutzeitlebensraum (Brut- und Nahrungshabitat während der Brutzeit) einer Auswahl windenergiesensibler Vogelarten [Busch et al. 2017; ergänzt durch eigene Zuweisung]
- Vorhabentypspezifischer Mortalitäts-Gefährdungs-Index (vMGI) [Bernotat & Dierschke 2016]

Für die Analyse werden die ADEBAR-Daten zu Arealen und Häufigkeiten der im Papier „Signifikanzrahmen“³ der Umweltministerkonferenz aufgeführten 12 windenergiesensiblen Vogelarten⁴ verwendet.

Der ADEBAR-Datensatz basiert auf einem ca. 11 x 11 km großen Netz der topografischen Karte 1:25.000 (TK) Deutschlands. Dabei werden die TK-Kacheln durch den von Busch et al. [2017] entwickelten Ansatz räumlich eingegrenzt, indem entsprechende Brutlebensräume (Bruthabitat und während der Brutzeit aufgesuchte Nahrungshabitate) für die einzelnen Vogelarten in Form von Landbedeckungsklassen von CORINE Land Cover zugewiesen und selektiert werden. Für die selektierten Habitate wird nun unter Verwendung der Häufigkeit der Vogelindividuen in den ADEBAR-Daten für jede Art eine vogelartsspezifische Dichteklasse gebildet. Mittels dieser Dichteklasse und dem vorhabentypspezifischen Mortalitäts-Gefährdungs-Index (vMGI) werden die Habitate nun für jede betrachtete Vogelart zu der sogenannten vogelartsspezifischen Konfliktpunktzahl gewichtet (siehe

Tabelle 2).

Tabelle 2: Gewichtungsmatrix nach vogelartsspezifischer Dichteklasse (vDK) und vorhabentypspezifischen Mortalitäts-Gefährdungs-Index (vMGI)

vDK	vMGI-Klasse A (*4)	vMGI-Klasse B (*2)	vMGI-Klasse C (*1)
1	4	2	1
2	8	4	2
3	12	6	3
4	16	8	4
5	20	10	5
6	24	12	6
7	28	14	7
8	32	16	8
9	36	18	9
10	40	20	10

3 „Standardisierter Bewertungsrahmen zur Ermittlung einer signifikanten Erhöhung des Tötungsrisikos im Hinblick auf Brutvogelarten an Windenergieanlagen (WEA) an Land – Signifikanzrahmen“, Papier der Umweltministerkonferenz vom 11. Dezember 2020. Verfügbar unter https://www.umweltministerkonferenz.de/documents/vollzugshilfe_signifikanzrahmen_11-12-2020_1608198177.pdf

4 Baumfalke, Fischadler, Rohrweihe, Rotmilan, Schreiadler, Schwarzmilan, Seeadler, Steinadler, Uhu, Wanderfalke, Weißstorch, Wiesenweihe

Die vogelartsspezifischen Konfliktpunktzahlen der einzelnen Arten werden räumlich addiert und die Summe in die 5-stufige Konfliktrisikobewertung überführt. Diese Bewertung der Konflikte des Vogelschutzes außerhalb von Schutzgebieten fließt als eine weitere Flächenkategorie in die Raumbewertung ein.

2.5 Anwendung von KRW-Faktoren

Durch die Einstufung von Flächenkategorien in Konfliktrisikoklassen wird den nicht ausgeschlossenen Potenzialflächen eine qualitative in Bewertung zugeordnet (Konfliktrisikowerte). Um aus den so bewerteten Flächen Flächenpotenziale abzuleiten, erfolgt eine Festlegung, welche Anteile der mit den unterschiedlichen Konfliktrisikowerten belegten Flächen in die Potenziale eingerechnet werden sollen. Den einzelnen qualitativen Konfliktrisikowerten wird damit indirekt eine spezifische Wahrscheinlichkeit unterstellt, mit der die Fläche für eine Realisierung der Windenergienutzung infrage kommt. In Tabelle 3 werden die entsprechend festgelegten Faktoren dargestellt. Durch die Multiplikation der Flächengröße je Konfliktrisikowert mit dem zugeordneten Faktor für die Wahrscheinlichkeit der Umsetzung, kann ein voraussichtlich nutzbares Flächenpotenzial ermittelt werden.

Tabelle 3: KRW-Werte mit zugeordneter Umsetzungswahrscheinlichkeit in Form von KRW-Faktoren.

Konflikt-Risiko-Wert (KRW)	KRW-Faktor
1	1
2	0,8
3	0,6
4	0,2
5	0,05
6	0

2.6 Sonderbetrachtungen

Neben der Analyse eines möglichst gut abgestimmten Szenarios wird in zwei gesonderten Betrachtungen untersucht, welche zusätzlichen Flächenpotenziale eventuell mit geringem Aufwand erschließbar sind. Einerseits wird untersucht, welche zusätzlichen Potenziale erschlossen werden können, wenn die Errichtung neuer Windenergieanlagen an Standorten bereits bestehender Anlagen, abgesehen von wenigen Ausnahmen, fast generell möglich ist. Andererseits wird betrachtet, welche zusätzlichen Potenziale erschlossen werden können, wenn die Windenergieanlagen auch in unmittelbarer Nähe oder sogar innerhalb von Industrie- und Gewerbegebieten erlaubt ist⁵.

⁵ Zur rechtlichen Umsetzung hat der BWE einen Vorschlag in die politische Debatte eingebracht [\[Link\]](#).

2.6.1 Repowering-Potenziale

Für die Ermittlung zusätzlicher Repoweringflächen wird die Annahme getroffen, dass auf den Flächen aller bis 2030 zurückgebauter Windenergieanlagen neue, moderne Anlagen errichtet werden können, es sei denn, diese stehen zu dicht an Gebäuden mit Wohnnutzung. Dabei wird angenommen, dass der Mindestabstand der zweifachen Gesamthöhe (2H) zu Wohnbauflächen im Innenbereich sowie der einfachen Gesamthöhe (1H) zu Wohngebäuden im Außenbereich entspricht⁶. Es wird eine Nutzungsdauer der Windenergieanlagen von 20 Jahren angesetzt.

Um aus den Punktkoordinaten der bis 2030 zurückgebauten Windenergieanlagen Flächen zu generieren, werden die Anlagen zunächst nach Inbetriebnahmejahr und Entfernung zur Wohnbebauung gefiltert. Diese Anlagen (Abbildung 9a, rote Punkte) und anschließend mit 500 m gepuffert (gelbe Kreise). Diese Puffer werden im nächsten Schritt aufgelöst (Abbildung 9b, grüne Flächen), sodass weniger als 1.000 m entfernt stehende Windenergieanlagen zu einer gemeinsamen Fläche verschmelzen. Diese Flächen werden im letzten Schritt wieder um 400 m nach innen gepuffert (Abbildung 9c, blau). Die hiernach verbleibenden Flächen (Abbildung 9d, blau, ohne grüne Fläche) werden als Repoweringflächen definiert, die unabhängig von der Raumbewertung vollständig als Potenzialflächen interpretiert werden. Anschließend wird mithilfe der Anlagenplatzierung ermittelt, welche Leistung auf diesen Flächen installiert werden kann.

Um die Flächen bei der Ermittlung der Flächenpotenziale nicht doppelt zu berücksichtigen, werden die Abstandsellipsen um die mithilfe der Anlagenplatzierung ermittelten Repoweringstandorte nachfolgend als Ausschlussfläche berücksichtigt.

⁶ Der Mindestabstand von 1H bzw. 2H berücksichtigt, dass durch die Methodik der Flächenermittlung die Fläche 100 m dichter an Wohngebäude heranrücken kann, als der Standort der Einzelanlagen. Daher wird nach $> 1H + 100$ m (Außenbereich) bzw. $> 2H + 100$ m (Innenbereich) gefiltert.

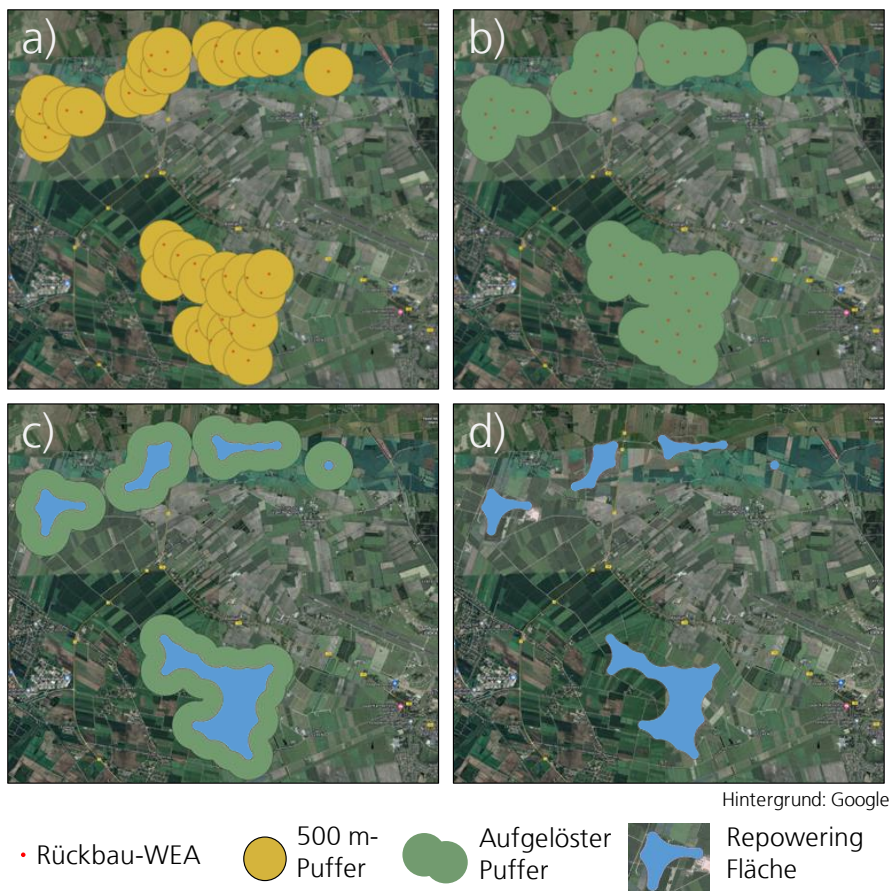


Abbildung 9: Ermittlung von Repoweringflächen aus den (Punkt-)Standorten bis 2030 zurückgebauter Windenergieanlagen. (Hintergrund © Google 2022)

2.6.2 Industrie- und Gewerbegebiete

Zur Ermittlung des zusätzlichen Potenzials, welches erschlossen werden könnte, wenn Windenergieanlagen innerhalb von Industrie- und Gewerbegebieten oder zumindest in geringerem Abstand zu solchen Gebieten errichtet werden dürften, wurden GIS-Analysen mit angepassten Annahmen durchgeführt. Hierbei wurde der Mindestabstand von Windenergieanlagen zu Industrie- und Gewerbegebieten zwischen 0 und 200 m variiert (sonst bis 300 m Ausschluss), sowie in einer weiteren Variante auch die Grundfläche der Industrie- und Gewerbegebiete nicht als Ausschluss berücksichtigt. Vergleichende Auswertungen zur Basisrechnung ermöglichen Rückschlüsse, wie viel zusätzliches Potenzial durch angepasste Regeln für Industrie- und Gewerbegebiete erschlossen werden könnte.

2.7 Leistungsermittlung

Das Flächenpotenzial dient einem quantitativen Vergleich zwischen Bundesländern oder der Bewertung der Erreichbarkeit des 2 %-Ziels. Allerdings kann aus der identifizierten Fläche nicht unmittelbar auf die Anzahl installierbarer Windenergieanlagen sowie deren Erzeugungsleistung zurückgeschlossen werden, da der Flächenbedarf der Windenergie stark von Größe, Form und Ausrichtung der bebaubaren Fläche abhängt [UBA 2022].

Die Ermittlung der auf den Flächen installierbaren Windenergieanlagen erfolgt mithilfe eines am Fraunhofer IEE entwickelten Anlagenplatzierungsalgorithmus [vgl. Thiele et al. 2021]. Im Rahmen der Anlagenplatzierung werden Windenergieanlagen systematisch unter Berücksichtigung elliptischer Abstandspuffer in Abhängigkeit von der Hauptwindrichtung auf den identifizierten Flächen platziert und so Leistungspotenziale ermittelt.

In einer konkreten Projektierung stellt die Platzierung von Windenergieanlagen einen komplexen Vorgang dar, der von vielen Faktoren abhängt. Primäre Zielgröße dieser Abwägungen ist die Maximierung der Erlöse. Die Art der zu betrachtenden Erlöse kann sich eventuell unterscheiden, je nachdem, ob der Windpark durch den Projektierer auch betrieben oder direkt veräußert werden soll. Durch eine engere Bebauung der Flächen lassen sich höhere Leistungen installieren, jedoch werden Energieerträge der einzelnen Anlagen durch eine zu enge Platzierung stark vermindert und die mechanische Belastung durch Turbulenzen steigt. Innerhalb eines gewissen Bereichs sorgt aktuell das Referenzertragsmodell des EEG für einen Ausgleich von verminderten Erträgen, wodurch eine etwas engere Bebauung der Flächen gefördert wird.

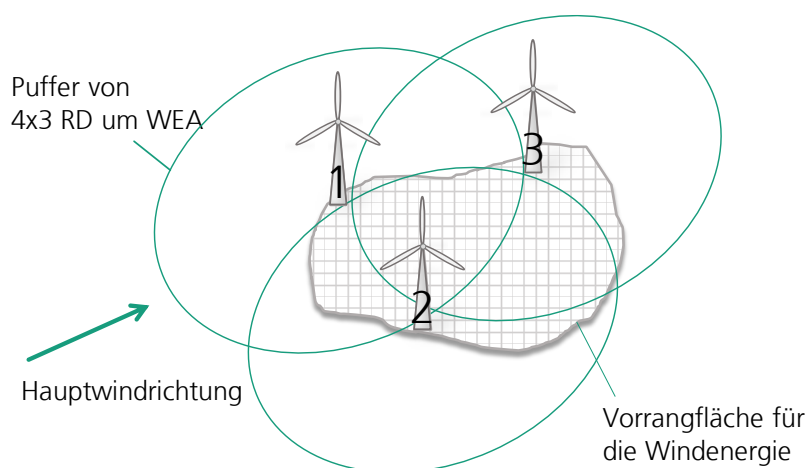


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Anlagenplatzierung zur Leistungsermittlung.

Für die Anlagenplatzierung wird ein Mindestabstand von vier Rotordurchmessern in Haupt- und drei Rotordurchmessern in Nebenwindrichtung zu benachbarten Windenergieanlagen angesetzt (4 RD x 3 RD). Dies ist geringfügig enger als in anderen Studien [Bons & Pape, 2021; UBA 2019], stellt aber noch immer einen realistischen Wert dar. Gegenüber einer Platzierung mit 5 RD x 3 RD lassen sich bei 4 RD x 3 RD ca. 14 % mehr Leistung auf den Flächen installieren, gleichzeitig sinkt die mittlere Auslastung der Anlagen geringfügig.

Die Hauptwindrichtung wurde auf Basis von u- und v-Vektoren des Cosmo-DE-Modells (evtl. Quellenangabe) für ca. 122 m über Grund ermittelt. Hierzu wurden Windleistungszeitreihen für die historischen meteorologischen Jahre 2007 bis 2015 mithilfe des Windleistungsmodells am Fraunhofer IEE erstellt und anschließend für jede 2,8 km x 2,8 km große Wettermodellfläche ausgewertet, in welchem 30°-Windrichtungssektor der höchste Ertrag während dieses Zeitraums auftrat. Im Rahmen der Anlagenplatzierung wurde dann der Mittelwert der Grenzen des Windrichtungssektors als Hauptwindrichtung und somit Längsachse der Abstandsellipse angenommen.

Die zunächst im Vektorformat vorliegenden Flächen werden in eine Boolesche-Matrix mit 25 m Gitterweite überführt, wobei der Wert „true“ eine Nutzbarkeit der 25 m x 25 m großen Fläche

für die Windenergie darstellt, während alle Ausschlussflächen durch „false“ markiert sind. Die Platzierung erfolgt mit einer Logik, bei der sich für jede vorrangig zugebaute Anlage eine möglichst geringe Zahl an „true“-Flächen innerhalb der Abstandsellipse befindet, wobei der eigentliche Standort der neuen Anlage selbst eine „true“-Fläche sein muss. Alle Flächen innerhalb der Abstandsellipse der neuen Anlage werden anschließend auf „false“ gesetzt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis alle Felder der Matrix auf „false“ gesetzt wurden und somit keine Flächen für einen weiteren Zubau mehr verfügbar sind.

Mit dem beschriebenen Verfahren werden ca. 97 % der maximal auf den Flächen installierbaren Anzahl an Windenergieanlagen ermittelt, verglichen mit einer mathematischen Optimierung, die jedoch deutlich rechen- und damit zeitintensiver ist.

Die auf den Flächen installierbare Leistung errechnet sich aus der Multiplikation der platzierbaren WEA mit der Nennleistung der WEA. Dabei unterscheidet sich die Leistung der Stark- und Schwachwind-WEA, wobei die Entscheidung, welcher Anlagentyp am jeweiligen Standort angenommen wird, von der mittleren Windgeschwindigkeit in 150 m Höhe nach dem Global Wind Atlas abhängt (vgl. Abschnitt 2.2).

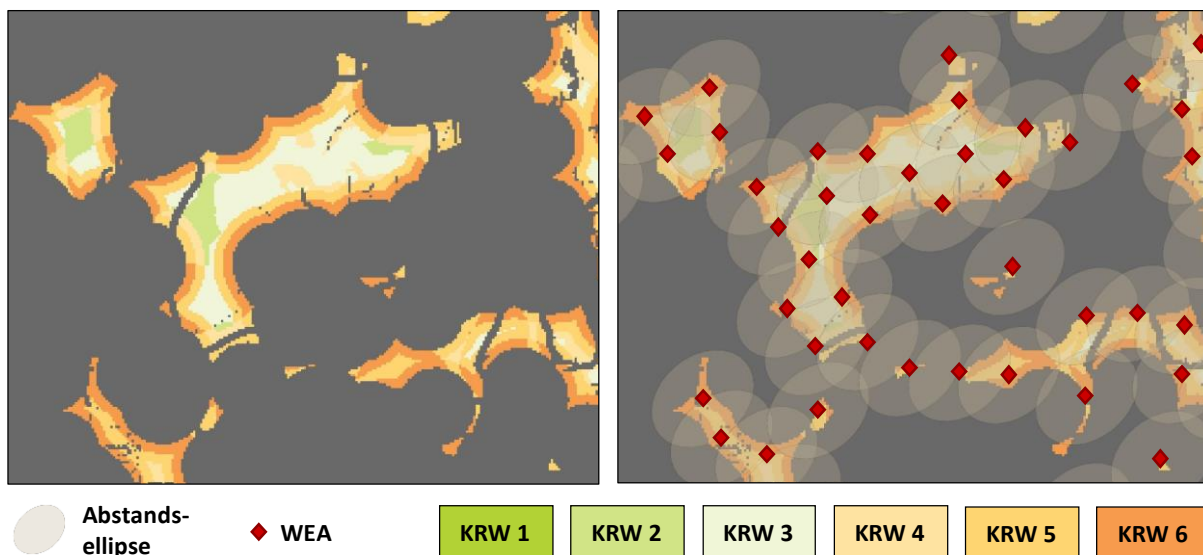


Abbildung 11: Anlagenplatzierung mit 4 RD x 3 RD auf die ermittelten KRW-Flächen 1 bis 5.

Abbildung 11 zeigt als Kartendarstellung die Platzierung der Windenergieanlagen (rote Rauten) sowie die jeweiligen Abstandsellipsen für die Flächen nach Abbildung der verfügbaren Fläche. Innerhalb einer Abstandsellipse darf entsprechend immer nur eine WEA stehen. Ausschlussflächen und Flächen mit Konfliktrisikobewertung 6 werden bei der Platzierung nicht berücksichtigt.

2.8 Ertragsermittlung

Anhand der platzierten Windenergieanlagen lassen sich im nächsten Schritt die hiermit erzielbaren Energieerträge abschätzen. Hierfür wird das Wind-Zeitreihenmodell des Fraunhofer IEE verwendet, welches die stündliche Erzeugungsleistung einer Windturbine anhand von Angaben zu Standort, Nabenhöhe und spezifischer Flächenleistung ermittelt. Aus der spezifischen Flächenleistung wird durch Interpolation zwischen Kennlinien bekannter Windenergieanlagen eine generische Kennlinie erzeugt, die zur Korrektur der räumlichen und zeitlichen Glättung mit einer Gauss-Kurve gefaltet wird [Norgård & Holtinnen, 2004; Abbildung 12] und anschließend mit den Windgeschwindigkeiten des Wettermodells multipliziert wird. Als Windgeschwindigkeiten

werden die stündlichen, räumlich 6 km x 6 km aufgelösten Zeitreihen des REA6-Modells des Deutschen Wetterdienstes verwendet [Bollmeyer et al., 2015]. Die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe wird durch logarithmische Höheninterpolation flankierender Höhenlevel bestimmt. Zur Abbildung von Verschattungseffekten durch benachbarte Windenergieanlagen wird abschließend ein Korrekturfaktor auf der Erzeugungsleistung angewendet, wodurch die Erzeugungsleistung je nach Windgeschwindigkeit unterschiedlich stark reduziert werden kann (vgl. windpowerlib⁷, dena_extreme2).

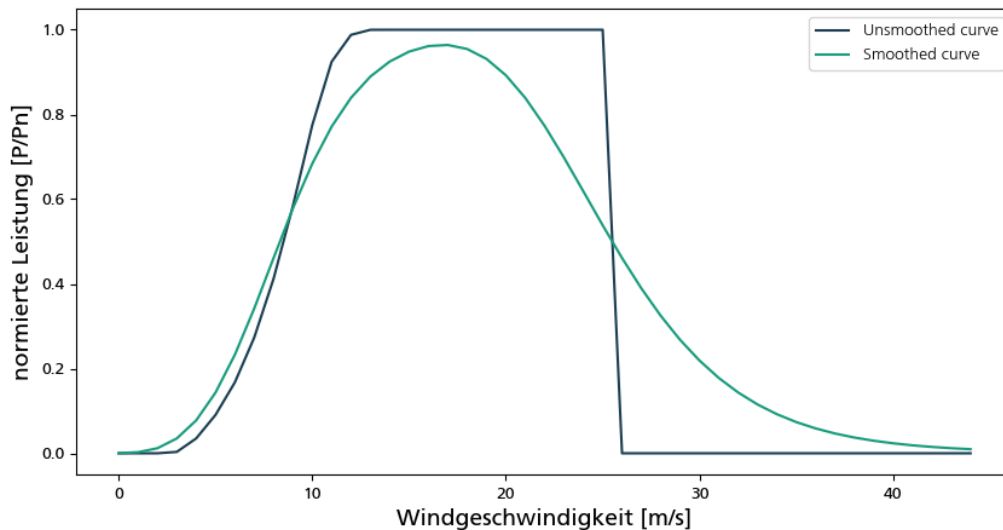


Abbildung 12: Glättung der Leistungskennlinie durch Faltung mit Gauss-Verteilung (nach Norgaard & Holtinnen 2004).

Die Zeitreihenerstellung erfolgt normiert für die meteorologischen Jahre 2006 bis 2012 mit anschließender Berechnung der durchschnittlichen Vollbenutzungsstunden. Es werden zunächst die Erträge für Stark- und Schwachwindanlagen für alle je 36 km² großen Wettermodellflächen bestimmt und im Anschluss den Anlagen aus der Anlagenplatzierung zugeordnet.

Trotz einer Parametrierung auf gemessene Ertragsdaten überschätzt das Windmodell die Leistung nach Einschätzung der Autoren weiterhin geringfügig. Gründe hierfür könnten sein, dass Verluste durch den Anschluss zum Netzknoten nicht abgebildet sind. Ebenso wurden für die Parametrierung neuere WEA verwendet, während im Modell keine Alterung der Turbinen modelliert wird. Als Korrektur dieser Überschätzung und um zu berücksichtigen, dass die Windenergieanlagen geringfügig enger platziert wurden (4 RD x 3 RD), wird ein pauschaler Abschlag in Höhe von 15 % angesetzt.

Da keine detaillierte Verschattung der Einzelanlagen modelliert wird, sondern lediglich windgeschwindigkeitsabhängige Leistungsreduktionen angenommen werden, reflektieren die Erträge nicht die zu erwartenden Ertragsreduktionen, die aus der Errichtung einer sehr hohen Anzahl in meist großen Windparks errichteter (und sich somit gegenseitig verstärkt verschattender) Windenergieanlagen resultieren würden.

⁷ <https://windpowerlib.readthedocs.io>

3 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Analysen dargestellt. Dabei liegt der Fokus auf den Flächenpotenzialen, da aktuell die Steuerung der Windenergie über die Vorgabe eines Flächenziels erfolgt. Anschließend werden die Leistungs- und Ertragspotenziale sowie die Ergebnisse der Sonderbetrachtungen zum Repowering und zur Windenergienutzung in Industrie- und Gewerbegebieten dargestellt.

Neben der grafischen Aufbereitung der Ergebnisse findet sich im Anhang (Abschnitt 5.2) eine tabellarische Zusammenfassung.

3.1 Flächenpotenziale

Abbildung 13 zeigt auf der linken Seite die deutschlandweite Ausschlusskarte. Grau gekennzeichnete Flächen stellen Ausschlussflächen dar, die weißen Bereiche bilden theoretische Flächenpotenziale ab. Bereits in dieser Ansicht zeigt sich die ungleiche Verteilung der Ausschlussflächen in den Bundesländern.

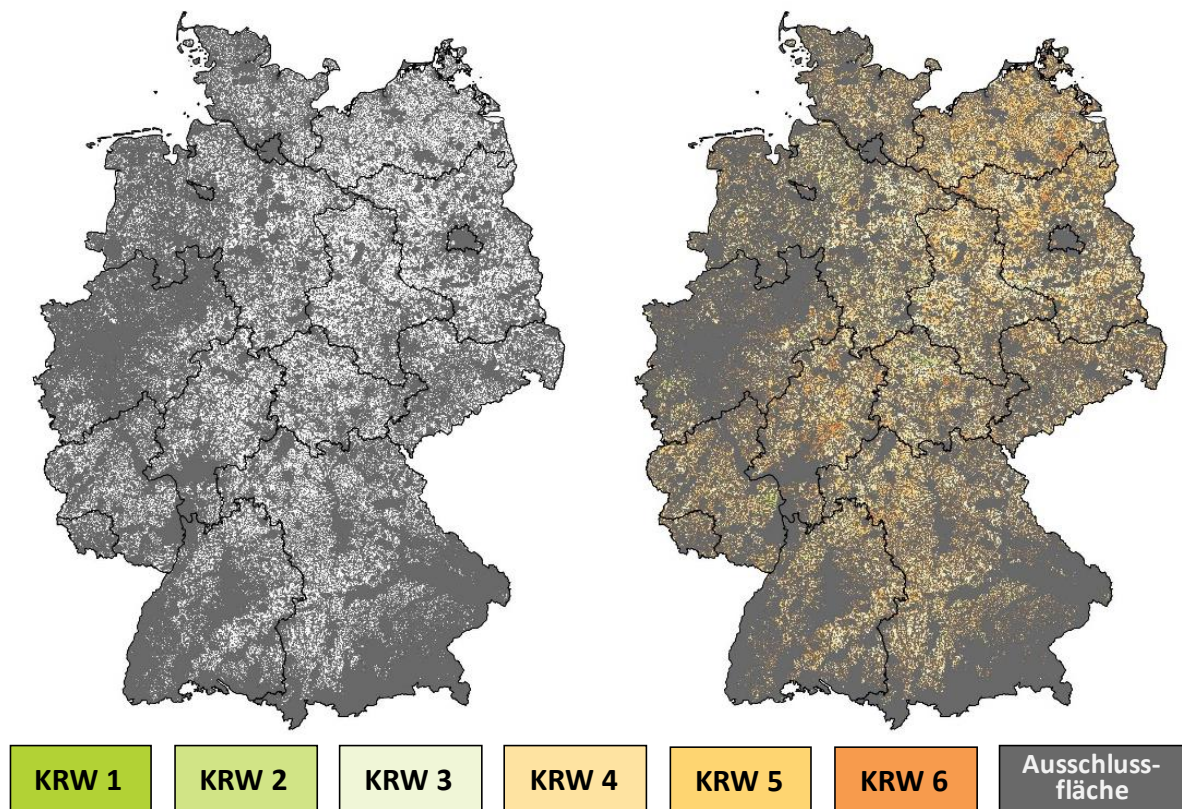


Abbildung 13: Überlagerung der Ausschlussflächen (links) mit der flächendeckenden Raumbewertung (rechts). (Daten: © GeoBasis-DE / BKG (2021)).

In der Karte links lassen sich als zusammenhängende graue Bereiche die Großstädte sowie die Ballungszentren, wie das Ruhrgebiet und der Frankfurter Raum, gut erkennen. Ebenso sind Regionen mit einer weniger dichten Besiedlung als eher hellere Bereiche gut erkennbar. Beispiele hierfür sind Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Thüringen sowie Teile von Niedersachsen, Hessen und Bayern. Weiterhin sind die Gebiete mit zu geringer mittlerer Windgeschwindigkeit oder zu großer Hangneigung, insbesondere in Bayern und Baden-Württemberg, gut zu erkennen.

Auf der rechten Seite werden die Ergebnisse aus der Raumbewertung, der nicht ausgeschlossenen Flächen, farblich abgestuft ergänzt. Die Karte der Raumbewertung wird durch die Orangetöne der höheren Konfliktrisikobewertungen dominiert. Eher nur vereinzelt gibt es Bereiche mit einer niedrigen Bewertung.

Eine vergrößerte Ansicht der ermittelten Flächenpotenziale (Abbildung 14) zeigt einen typischen Ausschnitt. Die konzentrischen Ausschlussflächen einzelner kleiner Ansiedlungen sind mit linearen Strukturen verbunden, wobei es sich meist um Straßen handelt. Freileitungen sind als breitere lineare Strukturen zu erkennen. Die eher rot-orangefarbenen Kreise um die Siedlungsflächen bilden die Bewertung der erweiterten Siedlungsabstände mit KRK 5 (2H-2,5H) und KRK 4 (2,5H-3H) ab. Häufig kommt es hier zu einer Überlagerung mit anderen Schutzgutgruppen und somit zu einer Hochstufung, sodass die Ringe um die Siedlungs-Ausschlussflächen meist mit einem KRW von 5 oder 6 belegt sind. Flächen mit einem KRW von 2 und 3 kommen in dem gezeigten Ausschnitt häufiger vor als im Bundesdurchschnitt.

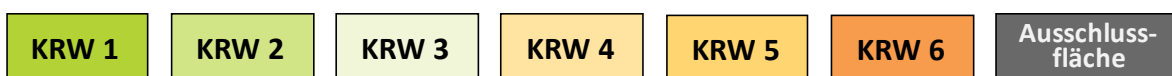
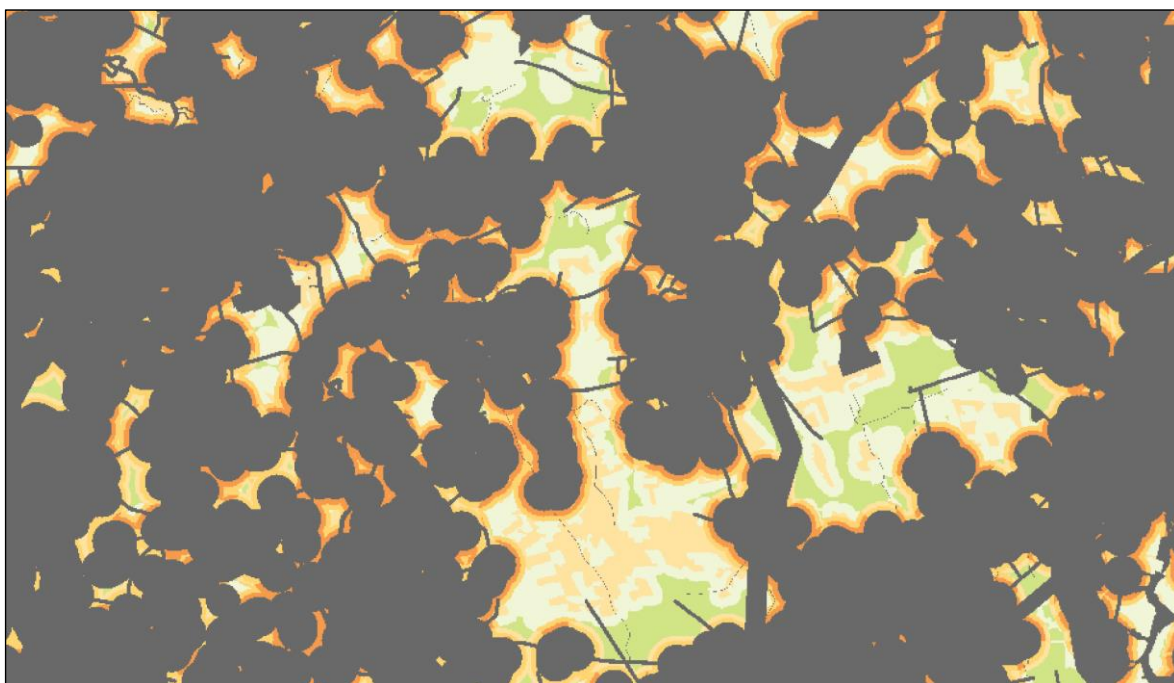


Abbildung 14: Flächenpotenziale für die Windenergienutzung mit unterschiedlicher Konfliktrisikobewertung.

Abbildung 15 zeigt die je Bundesland ermittelten, nicht von der Windenergienutzung klar ausgeschlossenen Flächen. Bundesweit befinden sich 94.268 km² bzw. ca. 26 % außerhalb der zuvor definierten Ausschlussflächen. Die Gebiete außerhalb der Ausschlussflächen wurden mithilfe der in Kapitel 2.4 beschriebenen Raumbewertung hinsichtlich ihres Konfliktrisikowertes klassifiziert. Die Unterteilung der Nicht-Ausschlussgebiete nach Konfliktrisikowerten, sind als farbliche Abschnitte der einzelnen Balken je Bundesland dargestellt. Dabei stellt KRW 1 (grün) einen niedrigen Konfliktrisikowert und damit eine hohe Wahrscheinlichkeit dar, dass einer Windenergienutzung keine schwerwiegenden Schutzinteressen oder sonstige Argumente entgegenstehen, während KRW 6 die höchste Konfliktrisikobewertung darstellt und davon ausgegangen werden muss, dass auf diesen Flächen eine Windenergienutzung nahezu

ausgeschlossen ist. Zusätzlich wurden 921 km² des Bundesgebiets als Repoweringfläche identifiziert, für die eine Nutzbarkeit für die Windenergie angenommen wird.

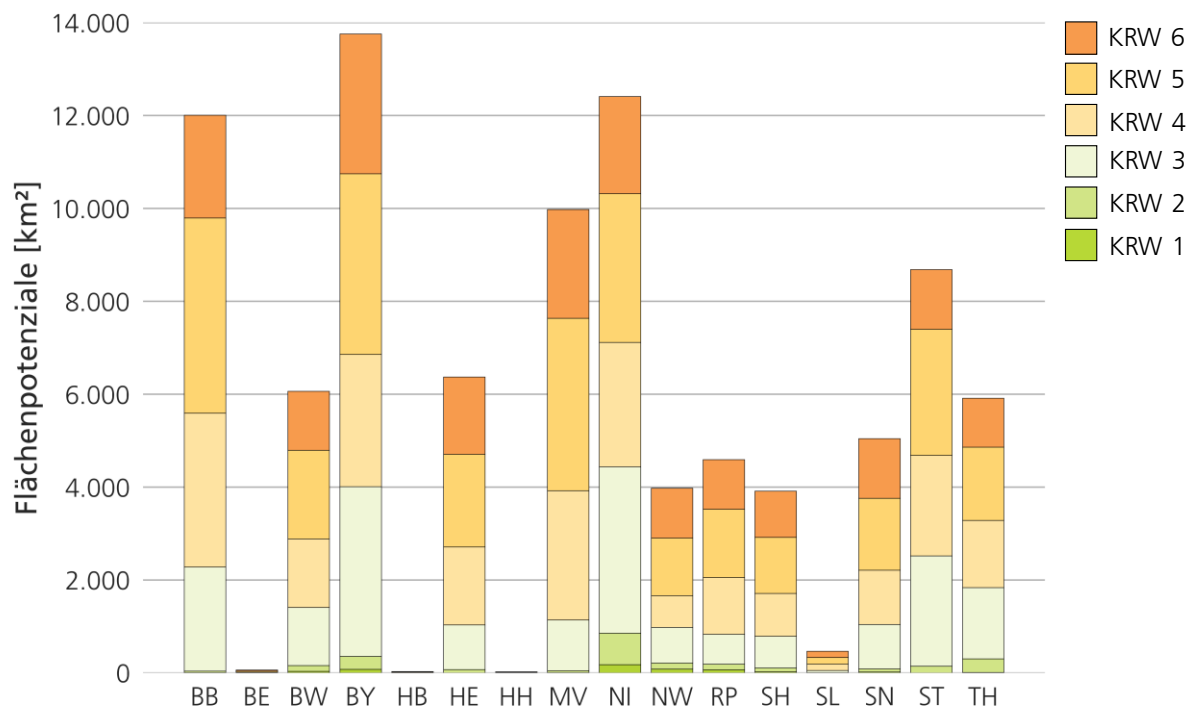


Abbildung 15: Absolute Nicht-Ausschlussfläche in Deutschland, aufgeteilt nach Konfliktrisikowerten (KRW), ohne Repoweringflächen.

Die Bundesländer Bayern, Niedersachsen und Brandenburg weisen die größten absoluten Flächen außerhalb der Ausschlussflächen auf, während die Stadtstaaten sowie das Saarland die niedrigsten Werte aufweisen. Dies korreliert natürlich mit der Größe der Bundesländer, wobei im Gegensatz hierzu eine Betrachtung der relativen Flächenanteile deutliche Unterschiede aufweist (vgl. Abbildung 16).

Die prozentualen Anteile der außerhalb der Ausschlussgebiete liegenden Flächen weisen eine große Spannweite von unter 5 % (Hamburg) bis über 40 % (Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt) auf. Dabei fällt auf, dass sich insbesondere in den neuen Bundesländern überdurchschnittlich hohe Anteile der Landesfläche außerhalb von Ausschlussflächen befinden. Als Flächenland mit dem geringsten Anteil außerhalb der Ausschlussflächen sticht Nordrhein-Westfalen mit ca. 12 % Flächenanteil hervor.

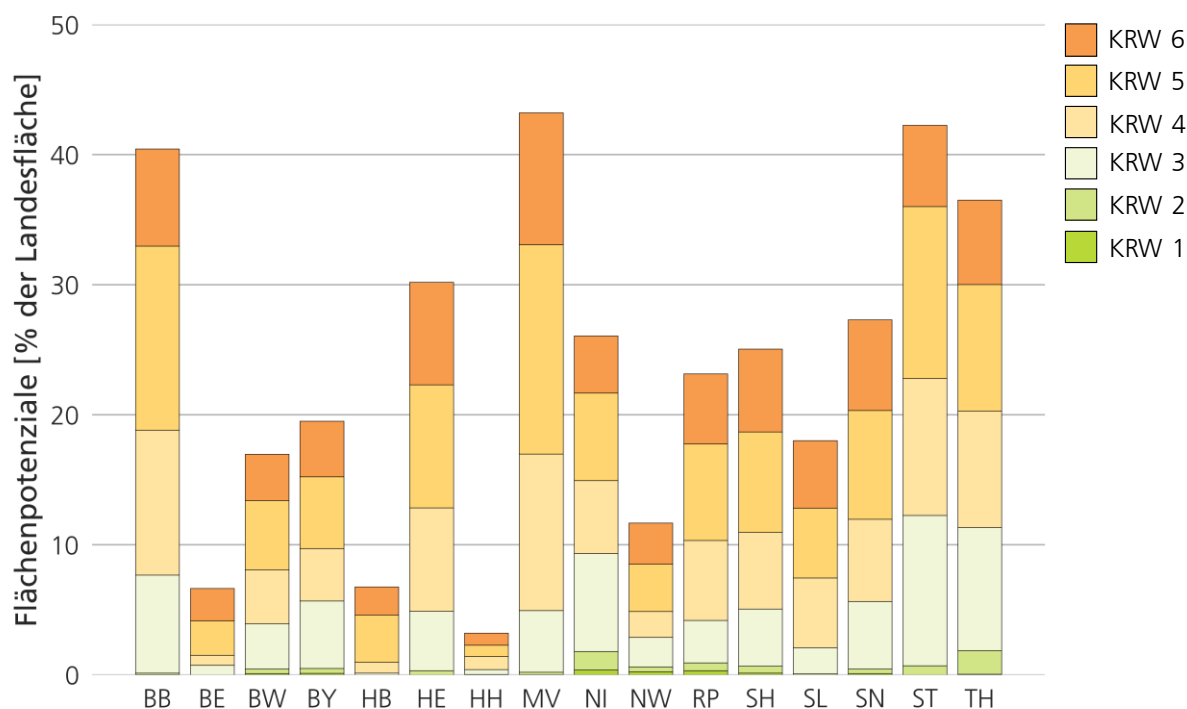


Abbildung 16: Relative Nicht-Ausschlussfläche in Deutschland, aufgeteilt nach Konfliktrisikowerten (KRW), ohne Repoweringflächen.

Neben der rein quantitativen Betrachtung der ermittelten Flächen stellt die Einstufung des Konfliktrisikowertes für die Flächen eine entscheidende Einflussgröße für die abgeleiteten Flächenpotenziale dar. In Abhängigkeit von der Konfliktrisikobewertung werden unterschiedliche Anteile als tatsächlich für die Windenergienutzung geeignet angenommen (vgl. Abschnitt 2.5). Es fällt auf, dass die mit den Konfliktrisikowerten 1 und 2 bewertete Flächen nur einen sehr kleinen Anteil ausmacht, während der weit überwiegende Teil der nicht ausgeschlossenen Flächen mit Konfliktrisikowerten von 3 bis 6 bewertet wurde.

Durch Multiplikation der ermittelten Flächen(-anteile) mit den in Abschnitt 2.5 beschriebenen KRW-Faktoren wird das Flächenpotenzial ermittelt. Dieses ist in Abbildung 17 als absolute Fläche (in km²) dargestellt. Das deutschlandweite Flächenpotenzial für die Windenergie beläuft sich auf 19.969 km², dies entspricht einem relativen Anteil von 5,6 % der Bundesfläche. Zur Einordnung dieser Werte hilft der Vergleich mit dem 2 %-Ziel der Bundesregierung, welches etwa 7.100 km² entspricht.

Nach diesem Berechnungsansatz weisen Niedersachsen und Bayern mit 3.564 km² bzw. 3.255 km² die größten absoluten Flächenpotenziale auf. Dies entspricht in Summe bereits einem Flächenanteil von 1,9 % des Bundesgebiets.

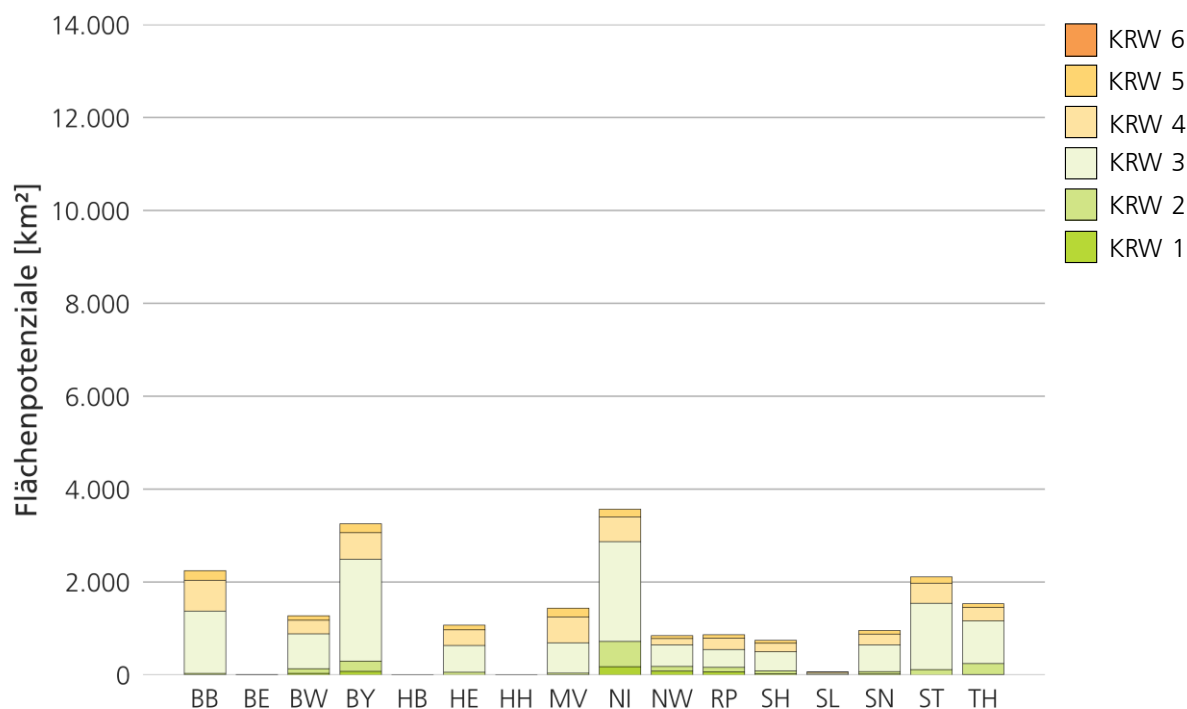


Abbildung 17: Absolutes Flächenpotenzial je Bundesland nach Anwendung der KRW-Faktoren.

Abbildung 18 zeigt das Flächenpotenzial nach Anwendung der KRW-Faktoren in Prozent der Landesfläche. Hierbei reicht die Spannweite von 0,43 % in Bremen bis 10,26 % in Sachsen-Anhalt. Auch hier zeigt sich das Muster, dass das Flächenpotenzial in den Stadtstaaten sehr niedrig und in den neuen Bundesländern hingegen meist überdurchschnittlich hoch ist.

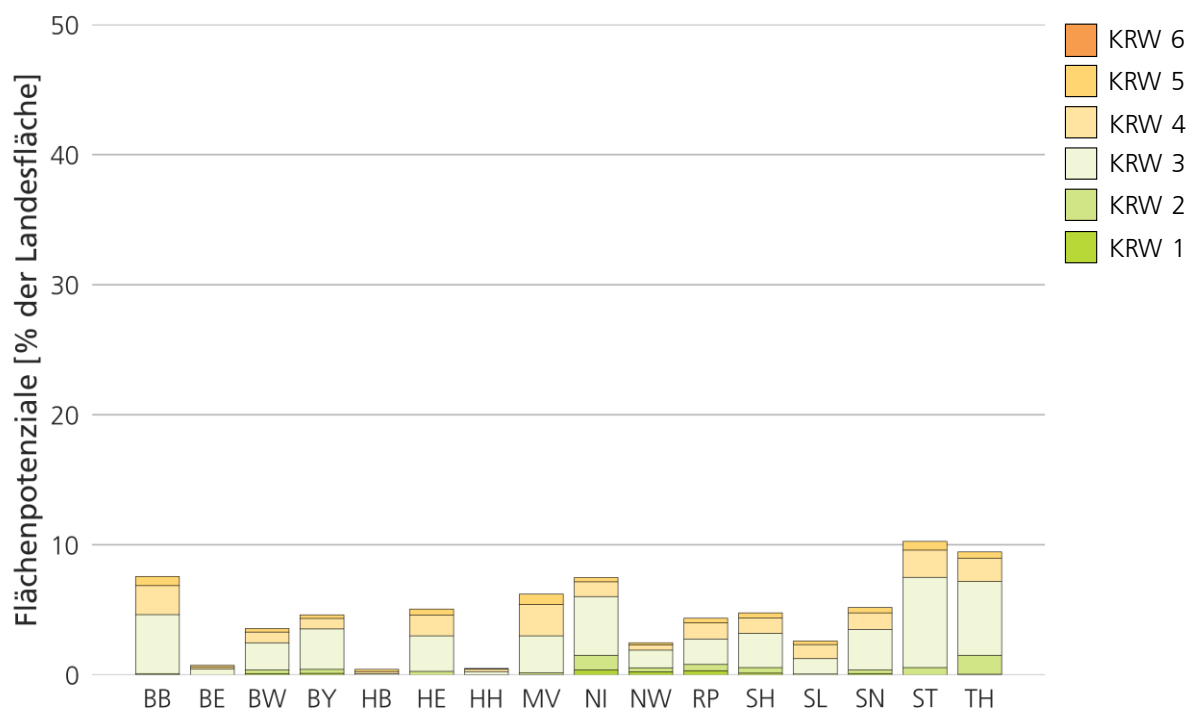


Abbildung 18: Relatives Flächenpotenzial je Bundesland nach Anwendung der KRW-Faktoren.

Aufgrund der nur geringen Eignung der Flächen mit $KRW > 3$ für die Errichtung von Windenergieanlagen (vgl. Abschnitt 2.5), setzt sich das identifizierte Flächenpotenzial zu einem

hohen Anteil (59,6 %) aus Flächen mit KRW 3 zusammen. Während Flächen mit KRW 1 und 2 nur mit kleinen Anteilen vorkommen, bewirkt der niedrige KRW-Faktor für Flächen der Kategorie 4 und 5, dass diese, trotz ihres hohen Anteils an den Nicht-Ausschlussflächen, nur wenig zum Flächenpotenzial beitragen. Flächen, die durch Hochstufung den KRW 6 zugewiesen bekommen haben (vgl. Abschnitt 2.4), tragen aufgrund des KRW-Faktors von 0 nicht zum Flächenpotenzial bei. Hier wird angenommen, dass aufgrund des hohen Konfliktrisikopotenzials eine Windenergienutzung praktisch ausgeschlossen ist.

3.2 Leistungs- und Ertragspotenziale

Abschließend wurden für die identifizierten Flächenpotenziale die auf den Flächen platzierbaren Windenergieanlagenleistungen sowie die hiermit erzielbaren Energieerträge ermittelt. Hierfür wurden zunächst Windenergieanlagen flächig auf allen Nicht-Ausschlussflächen (ca. 26 % des Bundesgebiets) mithilfe des Anlagenplatzierungsalgorithmus platziert. Hierbei wurde in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit am Standort zwischen Stark- und Schwachwindenergieanlagen unterschieden. Insgesamt ließen sich auf den Flächen 451.408 Windenergieanlagen mit einer Leistung von 2.086 GW platzieren. Anschließend wurden die erzielbaren Erträge jeder Anlage mit dem Zeitreihenmodell bestimmt.

Abhängig von der Konfliktrisikobewertung am Standort jeder Windenergieanlage wurden schließlich die KRW-Faktoren auf Leistung und Erträge angewendet und je Bundesland ausgewertet (Tabelle 4).

Tabelle 4: Installierbare Leistung, Energieerträge und durchschnittliche Volllaststunden.

Bundesland	Installierbare Leistung (GW)	Ertrag (TWh)	Volllaststunden (h/a)
BB	39,6	116,2	2.932
BE	0,1	0,3	3.105
BW	24,2	52,7	2.179
BY	55,8	124,5	2.230
HB	0,1	0,2	2.915
HE	18,9	47,1	2.490
HH	0,1	0,3	2.830
MV	27,9	80,4	2.884
NI	68,7	194,7	2.835
NW	18,6	51,4	2.757
RP	16,8	41,1	2.438
SH	14,3	46,0	3.224
SL	1,3	3,1	2.347
SN	16,7	46,7	2.804
ST	36,3	99,1	2.732
TH	26,5	67,6	2.548
DEU	365,9	971,3	2.654

Nach Anwendung der KRW-Faktoren beträgt die auf dem ermittelten Flächenpotenzial installierbare Leistung 365,9 GW. Dies entspricht 17,5 % der auf den Nicht-Ausschlussflächen

insgesamt platzierbaren Anlagenleistung. Bezogen auf das ermittelte Flächenpotenzial ergibt sich ein spezifischer Flächenbedarf von 5,2 ha/MW.

3.3 Sonderbetrachtung Repowering

Die Repoweringflächen, die mit der unter Abschnitt 2.6.1 beschriebenen Methodik ermittelt wurden, machen bis zum Jahr 2030 einen Anteil 0,26 % des Bundesgebiets aus. Das entspricht einer Fläche von 921 km². Zu dieser Gesamtfläche tragen insbesondere die Bundesländer Brandenburg (217 km²), Sachsen-Anhalt (175 km²) sowie Niedersachsen (159 km²) bei – alles große Flächenländer, in denen vergleichsweise früh ein ausgeprägter Ausbau der Windenergie erfolgte.

Auf diesen Flächen lassen sich bundesweit 39,1 GW Windenergieanlagen mithilfe der Anlagenplatzierung platzieren, was einem deutlich geringeren spezifischen Flächenbedarf von 2,4 ha/MW entspricht. Mithilfe dieser Anlagen lassen sich durchschnittlich Erträge von 109,3 TWh erzielen. Dies entspricht 2.796 Volllaststunden, was 141 Volllaststunden höher ist, als die in Tabelle 4 für die Potenzialflächen ermittelten durchschnittlichen Volllaststunden. Dies lässt sich u.a. mit einem überdurchschnittlichen Anteil an Repoweringflächen in windhöffigen Regionen erklären.

Tabelle 5: Repoweringflächen, installierbare Leistung sowie erzielbare Erträge.

Bundesland	Fläche Bundesland (km ²)	Repoweringflächen (km ²)	Anteil Landesfläche	Inst. Leistung (GW)	Ertrag (TWh)
BB	29.698	217	0,73 %	7,3	20,5
BE	893	0	0,00 %	0,0	0,0
BW	35.723	16	0,04 %	0,9	2,0
BY	70.553	11	0,02 %	0,8	1,8
HB	402	2	0,55 %	0,2	0,5
HE	21.099	21	0,10 %	1,0	2,6
HH	742	1	0,16 %	0,1	0,2
MV	23.088	63	0,27 %	2,8	8,1
NI	47.626	159	0,33 %	7,9	23,3
NW	34.095	83	0,24 %	4,5	11,9
RP	19.847	42	0,21 %	2,0	4,9
SH	15.611	67	0,43 %	3,3	11,3
SL	2.570	3	0,11 %	0,1	0,3
SN	18.478	32	0,18 %	1,6	4,4
ST	20.554	175	0,85 %	5,5	14,5
TH	16.197	29	0,18 %	1,1	2,9
DEU	357.174	921	0,26 %	39,1	109,3

3.4 Sonderbetrachtung Industriegebiete

In einer gesonderten Betrachtung wurde untersucht, wie sich die Einbeziehung der Industriegebiete auf die Flächenpotenziale für die Windenergie auswirkt. Während in der Basisbetrachtung die Industriegebiete, einschließlich eines 300m-Puffers für die Windenergienutzung, ausgeschlossen wurden, wurde in den Sensitivitätsbetrachtungen die

Pufferung in 100 m-Schritten bis auf null reduziert und schließlich in einer weiteren Betrachtung auch die Grundfläche der Industriegebiete als nutzbar für die Windenergie angenommen.

Tabelle 6 zeigt das ermittelte Flächenpotenzial je Bundesland sowie für das Bundesgebiet, nach Anwendung der KRW-Faktoren für die untersuchten Sensitivitäten und für die Basisvariante. Es zeigt sich, dass selbst beim Vergleich der Basisvariante (Grundfläche zzgl. 300m-Puffer als Ausschluss) mit der Variante „kein Ausschluss“, die Unterschiede meist vergleichsweise gering sind. In Bezug auf das gesamte Bundesgebiet erhöht sich das Flächenpotenzial um 0,1 % von 5,59 % auf 5,69 %. Die stärksten Erhöhungen des Flächenpotenzials sind bei den Stadtstaaten Hamburg und Bremen zu beobachten, wo das Flächenpotenzial als Anteil der Landesfläche um 0,44 % bzw. 0,35 % steigt. Dies ist insbesondere in Bezug auf die Ausgangswerte eine hohe relative Steigerung, da die Stadtstaaten nur ein geringes Ausgangspotenzial aufweisen. Die relative Steigerung beim Vergleich der beiden Varianten beläuft sich auf 88,6 % bzw. 81,9 %, während dieser Wert in allen anderen Bundesländern im unteren einstelligen Prozentbereich liegt (Bundesweit: 1,8 %). Weiterhin fällt auf, dass in Hamburg und Bremen eine deutliche Zunahme des Potenzials insbesondere dann festzustellen ist, wenn die Grundfläche der Industriegebiete mit einbezogen wird, während sich aus der Reduktion der Mindestabstände zu den Industrieflächen nur ein relativ geringer Wert ergibt. Beim direkten Vergleich aller Stadtstaaten fällt auf, dass sich für Berlin das Potenzial nur minimal um 0,02 % des Stadtgebiets erhöhen würde, also deutlich weniger als bei Bremen und Hamburg.

Tabelle 6: Sensitivität Industrie- und Gewerbegebiete – Flächenpotenzial in Prozent des Landesfläche nach Anwendung der KRW-Faktoren.

Bundesland	kein Ausschluss	Puffer 0 m	Puffer 100 m	Puffer 200 m	Puffer 300 m (Basisvariante)
BB	7,67 %	7,65 %	7,63 %	7,60 %	7,56 %
BE	0,75 %	0,74 %	0,73 %	0,73 %	0,73 %
BW	3,62 %	3,62 %	3,60 %	3,59 %	3,56 %
BY	4,66 %	4,66 %	4,65 %	4,64 %	4,61 %
HB	0,78 %	0,53 %	0,49 %	0,46 %	0,43 %
HE	5,13 %	5,13 %	5,11 %	5,09 %	5,06 %
HH	0,93 %	0,55 %	0,51 %	0,50 %	0,49 %
MV	6,28 %	6,27 %	6,26 %	6,24 %	6,22 %
NI	7,67 %	7,63 %	7,60 %	7,55 %	7,48 %
NW	2,55 %	2,54 %	2,52 %	2,50 %	2,47 %
RP	4,44 %	4,43 %	4,41 %	4,39 %	4,36 %
SH	4,82 %	4,81 %	4,80 %	4,78 %	4,76 %
SL	2,71 %	2,68 %	2,66 %	2,64 %	2,60 %
SN	5,27 %	5,25 %	5,24 %	5,21 %	5,18 %
ST	10,47 %	10,43 %	10,40 %	10,34 %	10,26 %
TH	9,63 %	9,61 %	9,58 %	9,53 %	9,46 %
DEU	5,69 %	5,67 %	5,66 %	5,63 %	5,59 %

Unter den Flächenländern weisen Sachsen-Anhalt und Niedersachsen die höchste Zunahme des prozentualen Potenzials bei Einbeziehung der Industriegebiete mit 0,21 % bzw. 0,19 % auf,

ebenso Thüringen mit 0,17 %. Im Gegensatz zu Bremen und Hamburg ist in diesen Bundesländern bereits bei Reduktion der Puffer um die Industriegebiete eine deutliche Zunahme zu beobachten.

Betrachtet man die Ergebnisse vor Anwendung der KRW-Faktoren (nicht dargestellt), stellt sich die Situation sehr ähnlich dar. Das bundesweite Potenzial nimmt bei Nicht-Ausschluss der Industriegebiete um 2,1 % zu. Bundesweit sind dann 26,66 % anstatt 26,11 % nicht von der Windenergienutzung ausgeschlossen.

4 Einordnung der Ergebnisse

Die durch die Raumbewertung ermittelten Flächenpotenziale können zum einen dazu dienen, bundesweit als auch für einzelne Bundesländer abzuschätzen, ob der angestrebte Ausbau der Windenergie auf 2 % der Flächen prinzipiell möglich ist. Darüber hinaus lässt sich an der statistischen Verteilung der Flächenpotenzial über die Konfliktrisikowerte einstufen, mit welchen entgegenstehenden Nutzungs- und Schutzbelangen, quantitativ ausgedrückt in Konfliktintensitäten, bei einem Ausbau in einer Größenordnung von 2 % Flächenanteil zu rechnen ist.

Die Raumbewertung soll mit Nichten dazu dienen, die Ergebnisse regionaler Planungsprozesse vorweg zu nehmen oder für konkrete Flächen im Raum detaillierte Vorhersagen zu treffen. In diesem Sinne liefern die Ergebnisse dieser Studie zwar Flächenpotenziale, also eine Annäherung an eine realistische Größenordnung der verfügbaren Potenziale, jedoch keine Potenzialflächen, also keine konkreten Planungsräume.

Als ein zentrales Ergebnis kann zusammengefasst werden, dass die erforderlichen Flächen für den Ausbau der Windenergie in Deutschland grundsätzlich verfügbar sind. Es konnten insgesamt 26 % Nicht-Ausschlussflächen identifiziert werden. Unter Einbeziehung der Konfliktrisikobewertung reduziert sich das Flächenpotenzial unter den getroffenen Annahmen auf 5,6 %. Durch Repoweringflächen, welche auf der Basis eines Rückbaus bis 2030 berechnet wurden, kommen bundesweit zusätzlich 0,3 % Flächenpotenzial hinzu.

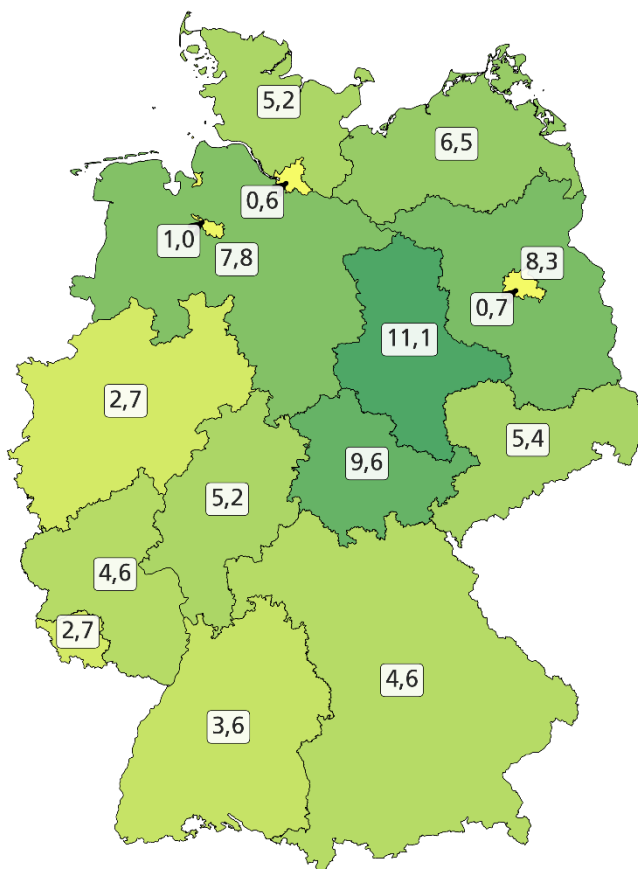


Abbildung 19: Flächenpotenzial je Bundesland nach Anwendung des KRW-Faktors einschließlich der Repoweringflächen bis 2030. (Daten: © GeoBasis-DE / BKG (2021))

Aus den Ergebnissen, dargestellt durch Abbildung 19, wird deutlich, dass sich die Potenziale je Bundesland erwartbar stark unterscheiden. Bezogen auf die Flächenländer reicht die Bandbreite von 2,7 bis 11,1 % der jeweiligen Landesfläche. Es ist jedoch an dieser Stelle zu erwähnen, dass die relativen und absoluten Ergebnisse stark von den Annahmen der Raumbewertung abhängen. Das betrifft die abhängig von den verfügbaren Geodaten getroffene Auswahl der verwendeten Flächenkategorien, die Wertzuweisung der Konfliktrisikoklassen zu den Flächenkategorien in Abhängigkeit von deren Empfindlichkeit, Bedeutung und Treffsicherheit sowie die aufbauend auf der Raumbewertung erfolgenden Berechnung der Flächenpotenziale in Abhängigkeit von den gewählten Anteilen je Konfliktrisikowert (KRW-Faktor) zu nennen.

Zudem fällt auf, dass nur wenige Flächen geringe (KRW 2) oder sehr geringe (KRW 1) Konfliktpotenziale aufweisen (vgl.: Abbildung 15 und Abbildung 16). Dies ist eine direkte Folge des spezifischen Wirkprofils von Windenergieanlagen und den daraus abgeleiteten Annahmen und Setzungen bezüglich Empfindlichkeit, Bedeutung und Treffsicherheit sowie die daraus abgeleiteten Wertzuweisungen der Konfliktrisikoklassen, die für die Modellrechnung getroffen wurden. Hieraus wird deutlich, dass Windenergienutzung, wie andere Infrastrukturvorhaben auch, nur in Ausnahmefällen gänzlich ohne oder mit nur sehr geringen Konflikten zu realisieren sein wird und ein hohes Maß an Kompromissbereitschaft von beteiligten Parteien verlangt werden muss.

Aufgrund der umfassenden und qualitativ guten Datenbasis liefern die Analysen ein gutes, insbesondere auch zwischen den Bundesländern vergleichbares Bild des Potenzials für die Nutzung der Windenergie an Land. Die Datenlage weist jedoch auch Defizite auf, was einen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben dürfte. Hier sind insbesondere militärische Daten zu nennen, die aus Geheimhaltungsgründen nicht herausgegeben werden können. Hubschrauber-Tiefflugstrecken erstrecken sich beispielsweise über ausgedehnte Bereiche und können damit die Nutzbarkeit der ermittelten Flächen im Nachgang noch einschränken. Ebenfalls liegt kein bundesweiter Datensatz von Horstkartierungen kollisionsempfindlicher Vogelarten vor, welche die Treffsicherheit der avifaunistischen Bewertung erhöhen würde. Genauere Daten zum Artenvorkommen können sowohl zu einer Erhöhung als auch zu einer Reduktion des Potenzials führen, dies lässt sich aktuell schwierig vorhersagen. Unabhängig davon weisen die ermittelten Potenziale ausreichend „Reserven“ auf, sodass eine Erreichbarkeit der energiepolitischen Ziele weiterhin gegeben ist.

Die ermittelten Flächenpotenziale erlauben anhand der Ergebnisse der Anlagenplatzierung die Installation von Windenergieanlagen mit einer Leistung von 365,9 GW. Weitere 39,1 GW lassen sich noch auf den Repoweringflächen installieren, sodass in Summe 405 GW Leistung realisierbar sind. Die Methodik der Anlagenplatzierung ist jedoch nur eingeschränkt geeignet, um die installierbare Leistung abzuschätzen. Die Anlagenplatzierung platziert zunächst über alle Nicht-Ausschlussflächen Anlagen. Erst anschließend durch Anwendung der KRW-Faktoren wird die geringere Realisierbarkeit auf Flächen mit hohem Konfliktrisiko abgebildet. Dadurch werden häufig Anlagen auf sehr großen zusammenhängenden Flächen platziert, was sich auf den spezifischen Flächenbedarf auswirkt. Die Größe der Windparkflächen hat jedoch einen Einfluss auf den spezifischen Flächenbedarf [Kigle 2022, UBA 2022]. Auswertungen auf Basis realer ausgewiesener Flächen für die Windenergienutzung [BMWK 2022, UBA (in Veröffentlichung)] deuten im Bundesdurchschnitt eher auf einen spezifischen Flächenbedarf um 3 ha/MW hin. Dies spiegelt sich auch in dem spezifischen Flächenbedarf auf den Repoweringflächen wider – hier sind die Flächen deutlich kleiner als die der Nicht-Ausschlussflächen. Würde man einen Wert von

3 ha/MW auf das ermittelte Flächenpotenzial von 19.169 km anwenden, so ließen sich auf den Flächen etwa 640 GW installieren. Entsprechend höher, mit Werten um 1.700 TWh, würde auch das Ertragspotenzial ausfallen. Wendet man den mithilfe der Anlagenplatzierung ermittelten spezifischen Flächenbedarf von 5,2 ha/MW auf das 2%-Ziel an, so ließen sich lediglich 137 GW errichten – weniger als die aktuell von der Bundesregierung für 2040 angestrebten 160 GW. Im Vergleich dazu beträgt die auf 2% des Bundesgebiets installierbare Leistung bei einem spezifischen Flächenbedarf von 3 ha/MW 238 GW.

Die Sensitivitätsbetrachtungen zum Einfluss weniger restriktiver Vorgaben für die Errichtung von Windenergieanlagen in Industriegebieten zeigen, dass weitere Potenziale kurzfristig erschlossen werden könnten, wenn der erforderliche Abstand zu Industriegebieten verringert oder sogar die Windenergienutzung innerhalb der Industriegebiete nicht mehr ausgeschlossen würde. Auf den ersten Blick sind die Werte vergleichsweise gering: Durch eine vollständige „Öffnung“ der Industriegebiete ließen sich weitere 0,1 % des Bundesgebiets als Flächenpotenzial gewinnen, während bei einem Verzicht auf Mindestabstände zu Industriegebieten 0,08 % hinzukämen. Dass diese Werte eher niedrig ausfallen, ist dadurch zu erklären, dass die Ausschlussflächen angrenzender Wohnsiedlungen und Wohngebäude oft mit den Industriegebieten überlappen und sich häufig auch noch vereinzelt Wohngebäude in Industriegebieten befinden.

Die Flächen innerhalb von Industriegebieten ließen sich jedoch eventuell für einen kurzfristigen Zubau freigeben. Gerade in den Stadtstaaten Bremen und Hamburg könnte die Möglichkeit einer Bebauung bis in die Industriegebiete helfen, die im Windenergieflächenbedarfsgesetz geforderten 0,5 % der Landesfläche zu erreichen (Hamburg +0,44 %; Bremen +0,35 %). Im Gegensatz dazu würde eine solche Öffnung für Berlin keinen großen Nutzen bringen, da hier nur 0,02 % zusätzliches Flächenpotenzial erschlossen würde.

In zeitlicher Nähe zu diesen Ergebnissen wurde auch die Studie „Analyse der Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030“ des BMWK veröffentlicht [BMWK 2022]. Da das Vorgehen und die verwendete Methode der hier vorliegenden Studie sehr ähnlich sind, stellt sich die Frage, warum beide Projekte zwar zu grundlegend ähnlichen, jedoch nicht identischen Ergebnissen kommen. Grund dafür sind Unterschiede bei den zugrundeliegenden Annahmen. In Tabelle 7 sind die wichtigsten Annahmen und die jeweilige Ausprägung in den beiden Projekten aufgeführt. An vielen Stellen wurden dieselben Annahmen getroffen, wie bei dem Umgang mit dem Vogelschutz außerhalb der Schutzgebiete, dem Landschaftsbild, der Windhöffigkeit und der Berechnung der Flächenpotenziale mithilfe der KRW-Faktoren. In manchen entscheidenden Annahmen unterscheiden sich die Studien jedoch auch. Als einer der entscheidenden Unterschiede ist die Nutzung unterschiedlicher Datengrundlagen für die Abbildung der Landnutzung inkl. des Waldes zu nennen. Gerade bei dem Schlüsselthema Wald kann es durch die unterschiedliche Datengrundlage und den dazukommenden Puffern des Waldsaums zu einer abweichenden räumlichen Ausprägung und damit Flächeninanspruchnahme kommen. Darüber hinaus unterscheidet sich auch die Bewertung der Konfliktrisikoklassen für Wald in den beiden Studien: Während in der BMWK-Studie eine Differenzierung der KRK der Waldtypen nach Anteil der Waldflächen an der Bundeslandfläche vorgenommen wird [siehe BMWK 2022], werden die Waldtypen in der hier vorliegenden Studie bundesweit einheitlich bewertet. Dies führt besonders in den südlichen Bundesländern mit hohem Waldanteil, Bayern und Baden-Württemberg, dazu, dass die Waldflächen in der BMWK-Studie im Vergleich mit der hier vorliegenden Studie um eine KRW herabgestuft werden und somit flächig weniger Konflikte vorliegen. Das resultiert darin, dass die BMWK-Studie im Basisszenario zu einem etwas höherem Flächenpotenzial für Bayern von

5,8 % und Baden-Württemberg von 4,5 % kommt, als die hier vorliegende Studie (Bayern: 4,6 %; Baden-Württemberg: 3,6 %). Es ist davon auszugehen, dass darüber hinaus sowohl der unterschiedliche Umgang mit den Siedlungsabständen als auch die unterschiedliche Datengrundlage bundesweit zu leicht anderen Flächenverteilungen der Ausschlussflächen führt, was wiederum abweichende Flächenpotenziale für die einzelnen Bundesländer zur Folge hat.

Tabelle 7: Hauptunterschiede zwischen der Herangehensweise in dieser Studie und den Ergebnissen der BMWK-Studie „Analyse der Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030“, „Basisszenario“, Variante B [BMWK 2022].

Unterscheidungskriterien	BMWK	BWE
Datengrundlage Landnutzung	ATKIS Basis-DLM	OSM, CORINE
Rotor	Rotor-out (Ausschlussflächen werden mit 82,5 m gepuffert)	Rotor-out (jedoch keine zusätzliche Pufferung mit einem Rotorradius)
Siedlungsabstand	800 m innen (ATKIS) = Ausschluss	2H innen/außen (OSM) = Ausschluss
	400 m Einzelgebäude außen (ATKIS + LoD1) = Ausschluss	2,5H innen/außen (OSM + Zensus2011) = KRK 5 3H innen/außen (OSM + Zensus2011) = KRK 4
Wald	Laub/Mischwald je Anteil in Bundesland = KRK 3-5	Laubwald = KRK 4
		Mischwald = KRK 4
	Nadelwald je Anteil in Bundesland = KRK 2-4	Nadelwald = KRK 3
Vogelschutz außerhalb Schutzgebiete	12 Arten (UMK Papier)	12 Arten (UMK Papier)
Landschaftsbild	Nicht als gesondertes Schutzgut einbezogen	Nicht als gesondertes Schutzgut einbezogen
Windhöflichkeit	< 6,5 m/s = Ausschluss	< 6,5 m/s = Ausschluss
KRW-Faktor zur Ermittlung der Flächenpotenziale	KRW 1 = 100 %	KRW 1 = 100 %
	KRW 2 = 80 %	KRW 2 = 80 %
	KRW 3 = 60 %	KRW 3 = 60 %
	KRW 4 = 20 %	KRW 4 = 20 %
	KRW 5 = 5 %	KRW 5 = 5 %
	KRW 6 = 0 %	KRW 6 = 0 %

5 Anhang

5.1 Inputdaten

Tabelle 8: Siedlungsflächen

Flächenkategorie	Mindestabstand	Bewertung	Datenbasis
Wohngebiete im Innenbereich	600 m / 2,5H / 3H	Ausschluss / 5 / 4	OSM: tag: landuse; value: residential or tag: buildings; value: residential
Wohnen im Außenbereich	400 m / 2,5H / 3H	Ausschluss / 5 / 4	[ZENSUS2011 2012]
Sport- und Erholungsgebiete	400 m / 2,5H / 3H	Ausschluss / 5 / 4	OSM: tag: sport; value: soccer, tennis, multi, golf, athletics, skateboard, volleyball, swimming, basketball, equestrian, beachvolleyball, horse_racing, field_hockey, yoga, football
Verwaltung, Bildung, Forschung, Kultur, Soziales, Sicherheit und Ordnung	Fläche	Ausschluss	OSM: tag: office; value: government tag: building; value: public, university, school, or tag: amenity; value: tag;; value: place_of_worship, research_institute
Kliniken und Kurgebiete	3H	Ausschluss	OSM: tag: amenity; value: hospital, clinic, centre
Industrie und Gewerbegebiete	300 m	Ausschluss	OSM: tag: landuse; value: industrial, commercial or tag: buildings; value: industrial or tag: man_made; value: works, wastewater_plant or tag: shop; value: supermarket, convenience, clothes, hairdresser, car_repair', bakery, kiosk, yes, beauty, car or generator:source; value: biomass, biogas
Friedhöfe	Fläche	Ausschluss	OSM: tag: landuse; value: cemetery

Tabelle 9: Verkehrsflächen

Flächenkategorie	Mindestabstand	Bewertung	Datenbasis
Straßen	40 m	Ausschluss	OSM: tag: highway; value: residential, unclassified, primary,

			tertiary, trunk, secondary'
Autobahn	40 m / 100 m	Ausschluss / 5	OSM: tag: highway; value: motorway
Schienenverkehr	150 m	Ausschluss	OSM: tag: railway; value: rail, tram
Flughäfen, Flugschneisen	1.500 m / 4.000 m	Ausschluss / 4	Durch das Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF) bereitgestellter Datensatz
Kleine Flughäfen, Flugplätze	1.500 m	Ausschluss	OSM: tag: aeroway; value: aerodrome
Seilbahnen	150 m	Ausschluss	OSM: tag: aerialway; value: cable_car, gondola, chair_lift or tag: railway; value: funicular

Tabelle 10: Naturschutz

Flächenkategorie	Abstand	Bewertung	Datenbasis
Biosphärenreservate Zone I u. II (Kern- und Pflegezone)	Fläche	Ausschluss	BfN (2019): Schutzgebiete bundesweit, Landschaftsschutzgebiete Deutschland
Biosphärenreservate Entwicklungszone	Fläche	2	BfN (2019): Schutzgebiete bundesweit, Landschaftsschutzgebiete Deutschland
Schwerpunktbereiche des Biotopverbundsystems gem. § 21 BNatSchG; Feuchtlebensräume	Fläche	3	BfN (2012): Flächen für den Biotopverbund der Feucht- und Trockenslebensräume; Funktionsräume der Feuchtlebensräume (FEU) der Stufe auf Basis der Distanzklasse bis 500 m
Schwerpunktbereiche des Biotopverbundsystems gem. § 21 BNatSchG; Trocken- und Waldlebensräume	Fläche	1	BfN (2012): Flächen für den Biotopverbund der Feucht- und Trockenslebensräume; Funktionsräume der Trockenlebensräume (TRO) der Stufe auf Basis der Distanzklassen bis 1.500 m; Funktionsräume der Waldlebensräume, naturschutzfachlich besonders wertvolle (WA) der Stufe auf Basis der Distanzklasse bis 500 m; BfN (2010): Flächen für den Biotopverbund der Waldlebensräume
RAMSAR-Gebiete	Fläche / 500 m	5 / 3	BfN (2021): Schutzgebiete bundesweit, RAMSAR-Gebiete Deutschlands

Flächenkategorie	Abstand	Bewertung	Datenbasis
Important Bird Areas (IBA)	Fläche / 300 m	4 / 2	NABU (2005): IBA-Gebiete bundesweit
Nationalparks	Fläche / 200 m	Ausschluss / 3	BfN (2021): Schutzgebiete bundesweit, Nationalparke Deutschlands
Naturschutzgebiete	Fläche / 200 m	Ausschluss / 2	BfN (2019): Schutzgebiete bundesweit, Naturschutzgebiete
Wasserschutz-Heilquellenschutzgebiete Zone I u. II > 2.000 ha	Fläche	5	BfG (2019) mit Ausnahme von: 1. Rheinland-Pfalz (BfG 2015); 2. Thüringen (GFG 2010); 3. Baden-Württemberg (LUBW 2016)
Wasserschutz-Heilquellenschutzgebiete Zone I u. II < 2.000 ha	Fläche	Ausschluss	BfG (2019) mit Ausnahme von: 1. Rheinland-Pfalz (BfG 2015); 2. Thüringen (GFG 2010); 3. Baden-Württemberg (LUBW 2016)
Wasserschutz-Heilquellenschutzgebiete Zone III	Fläche	2	Siehe: Wasserschutz-Heilquellenschutzgebiete Zone I u. II < 2.000 ha
Nationale Naturmonumente	Fläche	Ausschluss	BfN (2021): Schutzgebiete bundesweit, Nationale Naturmonumente Deutschlands
Flächen des Grünen Bands	Fläche	3	BfN (2013): Aktualisierung der Biotopkartierung im Grünen Band Deutschland
Naturparke	Fläche	2	BfN (2019): Schutzgebiete bundesweit, Naturparke Deutschlands
FFH-Gebiete (keine Windenergieempfindlichen Vogelarten oder Fledermäuse)	Fläche	2	BfN (2019): Schutzgebiete bundesweit, FFH-Gebiete Deutschlands
FFH-Gebiete (Vorkommen windenergieempfindlicher Vogelarten)	Fläche / 1.000 m / 2.000 m / 3.000 m	5 / 4 / 3 / 2	BfN (2019): Schutzgebiete bundesweit, FFH-Gebiete Deutschlands
FFH-Gebiete (Vorkommen von Fledermäusen)	Fläche / 300 m	3 / 2	BfN (2019): Schutzgebiete bundesweit, FFH-Gebiete Deutschlands
SPA-Gebiete (keine Windenergieempfindlichen Vogelarten oder Fledermäuse)	Fläche	2	BfN (2019): Schutzgebiete bundesweit, Vogelschutzgebiete Deutschlands (SPA)
SPA-Gebiet (Vorkommen windenergieempfindlicher Vogelarten)	Fläche / 1.000 m / 2.000 m / 3.000 m	5 / 4 / 3 / 2	BfN (2019): Schutzgebiete bundesweit, Vogelschutzgebiete Deutschlands (SPA)
Habitats ggü. Windenergie empfindlicher Vogelarten (gem. UMK-Papier), abhängig von Mortalitätsindex und Vorkommen			BKG (2012): CORINE Land Cover 10 ha (CLC10), DDA (2016): Zuweisung von CORINE Landnutzungsklassen zum Brutzeitlebensraum (Brut- und Nahrungshabitat während der Brutzeit) der Vogelarten nach BERNOTAT & Dierschke 2016, DDA

Flächenkategorie	Abstand	Bewertung	Datenbasis
			(2014): Atlas deutscher Brutvogelarten (ADEBAR)
Waldgebiete (Nadelwald)	Fläche / 200 m	4 / 3	BKG (2018): CORINE Land Cover 5 ha (CLC5), CLC-Klasse 312
Waldgebiete (Laubwald)	Fläche / 200 m	3 / 3	BKG (2018): CORINE Land Cover 5 ha (CLC5), CLC-Klasse 311
Waldgebiete (Mischwald)	Fläche / 200 m	4 / 3	BKG (2018): CORINE Land Cover 5 ha (CLC5), CLC-Klasse 313
Landschaftsschutzgebiete	Fläche	2	BfN (2019): Schutzgebiete bundesweit, Landschaftsschutzgebiete Deutschland
UNESCO-Welterbestätten/ Weltkulturerbe	Grundfläche / 200 m / 1.000 m	Ausschluss / 5 / 4	Selbst recherchierter Datensatz auf Basis diverser Quellen
Ackerland	Fläche	1	BKG (2018): CORINE Land Cover 5 ha (CLC5), CLC-Klasse 211
Grünland	Fläche	2	BKG (2018): CORINE Land Cover 5 ha (CLC5), CLC-Klassen 231, 321
Offenland außerhalb landwirtschaftlicher Nutzflächen	Fläche	2	BKG (2018): CORINE Land Cover 5 ha (CLC5), CLC-Klassen 331, 332, 333, 334, 335
Flussauen	Fläche	3	BfN (2009): Zustand der rezenten Auen

Tabelle 11: Mess- und Radarstationen

Flächenkategorie	Mindestabstand	Bewertung	Datenbasis
Seismologische-Messstationen*	Abstände gemäß*	Ausschluss	Durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bereitgestellter Datensatz inkl. Unterstützung für die Klassifikation nach Funktion / Bedeutung
DVOR-Anlagen	3.000 m / 10.000 m	Ausschluss / 3	Durch das Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung bereitgestellter Datensatz sowie Online-Daten der FA-Wind. Berücksichtigung von Um- und Rückbauten nach Informationen des BMWK (2022)
Wind-Profil-Messstationen	3.000 m	Ausschluss	Deutscher Wetterdienst (2013): Informationen zur Errichtung von Windenergieanlagen im Nahbereich der Messsysteme des Deutschen Wetterdienstes
Wetterradarstationen	5.000 m / 15.000 m	Ausschluss / 2	Deutscher Wetterdienst (2018): Metadaten zu den Radaren des Radarverbands des DWD
Flugradare	5.000 m	Ausschluss	Durch das Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung bereitgestellter Datensatz

*Seismologische Messstationen: Bayrischer Wald – 15.000 m, globale Bedeutung: 3.000 m, regionale Bedeutung: 2.000 m, lokale Bedeutung: 1.000 m

Tabelle 12: Sonstige

Flächenkategorie	Mindestabstand	Bewertung	Datenbasis
Bodenbewegungsgebiete	Fläche	Ausschluss	OSM: tag: landuse; value: quarry
Freileitungen	1H	Ausschluss	OSM: tag: power; value: line
Umspannwerke	Ab 250 m ² Grundfläche, 180 m zzgl. 75 m Rotorradius	Ausschluss	OSM: tag: power; value: substation
Gasleitungen	1H	Ausschluss	OSM: tag: man_made; value: pipeline
Bruchfelder, Deiche, Hafenbecken, Rieselfelder	Fläche	Ausschluss	OSM: tag: man_made; value: dyke or tag: landuse; value: harbour, port or tag: harbour; value: yes or Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr: Liegenschaftsflächen der Truppenübungsplätze inkl. der Gaststreitkräfte.
Militärisch genutzte Gelände	Fläche	Ausschluss	OSM: tag: military; value: bunker, airfield, barracks, checkpoint, range, office, yes, danger_area, trainig_area, shelter, obstacle_course
Radaranlagen Landesverteidigung?	10.000 / 15.000 m	4 / 2	Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr:
Wasserfläche: Seen, Flüsse	Fläche	Ausschluss	OSM: tag: water; value: lagoon, lake, stream_pool, oxbow, pond, reservoir, basin
Flüsse	Fläche / 250 m	Ausschluss / 4	OSM: tag: waterway; value: river, riverbank, canal or tag: water; value: river, riverbank, canal
Kleine Fließgewässer	Fläche	Ausschluss	OSM: tag: waterway; value: stream, drain or tag: water; stream, drain
Feuchtgebiete	Fläche	Ausschluss	OSM: tag: natural; value: wetland or tag: water; value: wetland
Bundesgrenze	1H	Ausschluss	BKG (2021) GeoBasis-DE

5.2 Ergebnistabelle

Bundesland	Ausschlussfläche	Nicht-Ausschlussfläche	KRW (%)						Repowering (%)	Flächenpotenzial nach KRW-Faktoren (%) inkl. Repowering
			KRW 1	KRW 2	KRW 3	KRW 4	KRW 5	KRW 6		
Nutzbarkeit	100 %	80 %	60 %	20 %	5 %	0 %	100 %			
BB	58,9 %	41,1 %	0,0 %	0,1 %	7,5 %	11,2 %	14,2 %	7,5 %	0,7 %	8,3 %
BE	93,4 %	6,6 %	0,0 %	0,0 %	0,7 %	0,8 %	2,6 %	2,5 %	0,0 %	0,7 %
BW	83,0 %	17,0 %	0,1 %	0,3 %	3,5 %	4,1 %	5,3 %	3,6 %	0,0 %	3,6 %
BY	80,5 %	19,5 %	0,1 %	0,4 %	5,2 %	4,0 %	5,5 %	4,3 %	0,0 %	4,6 %
HB	92,7 %	7,3 %	0,0 %	0,0 %	0,1 %	0,8 %	3,6 %	2,2 %	0,5 %	1,0 %
HE	69,7 %	30,3 %	0,0 %	0,3 %	4,6 %	7,9 %	9,5 %	7,9 %	0,1 %	5,2 %
HH	96,6 %	3,4 %	0,0 %	0,0 %	0,4 %	1,0 %	0,9 %	0,9 %	0,2 %	0,6 %
MV	56,5 %	43,5 %	0,0 %	0,2 %	4,7 %	12,0 %	16,1 %	10,1 %	0,3 %	6,5 %
NI	73,6 %	26,4 %	0,4 %	1,4 %	7,5 %	5,6 %	6,7 %	4,4 %	0,3 %	7,8 %
NW	88,1 %	11,9 %	0,2 %	0,4 %	2,3 %	2,0 %	3,6 %	3,1 %	0,2 %	2,7 %
RP	76,7 %	23,3 %	0,3 %	0,6 %	3,3 %	6,1 %	7,4 %	5,4 %	0,2 %	4,6 %
SH	74,5 %	25,5 %	0,1 %	0,5 %	4,4 %	5,9 %	7,7 %	6,4 %	0,4 %	5,2 %
SL	81,9 %	18,1 %	0,0 %	0,1 %	2,0 %	5,4 %	5,4 %	5,2 %	0,1 %	2,7 %
SN	72,5 %	27,5 %	0,1 %	0,3 %	5,2 %	6,3 %	8,4 %	7,0 %	0,2 %	5,4 %
ST	56,9 %	43,1 %	0,0 %	0,7 %	11,6 %	10,5 %	13,2 %	6,3 %	0,9 %	11,1 %
TH	63,3 %	36,7 %	0,0 %	1,8 %	9,5 %	8,9 %	9,7 %	6,5 %	0,2 %	9,6 %
DEU	73,6 %	26,4 %	0,1 %	0,6 %	5,5 %	6,3 %	8,1 %	5,5 %	0,3 %	5,8 %

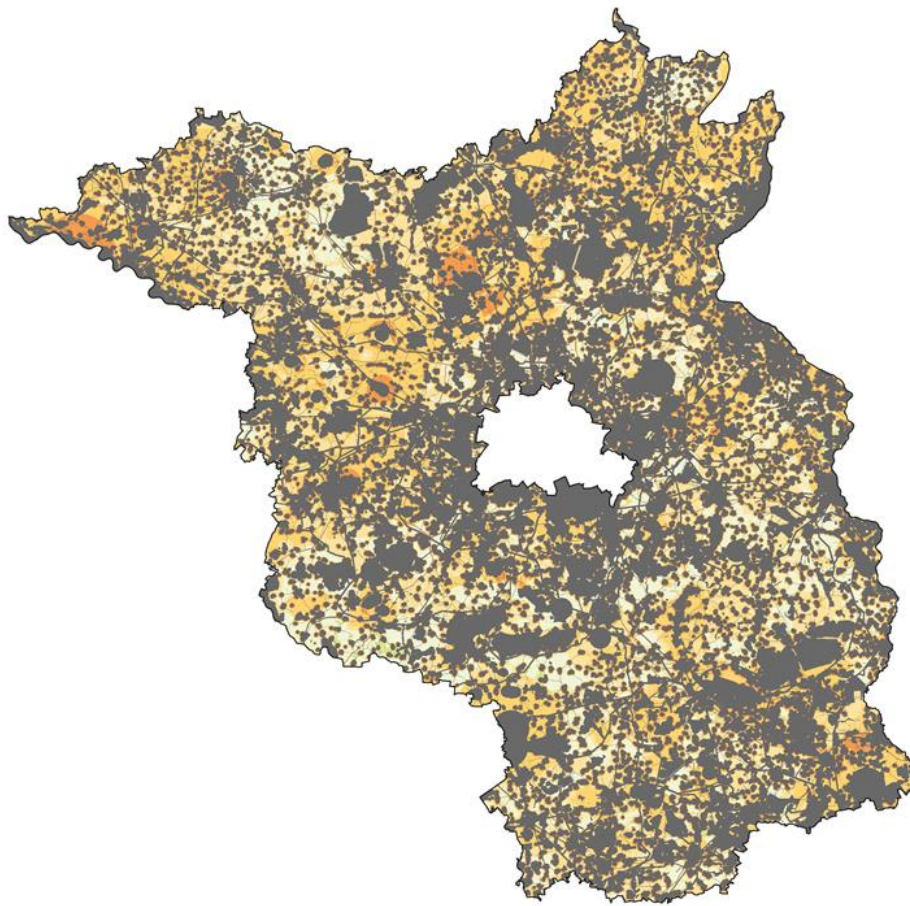
5.3 Ländersteckbriefe

Auf den folgenden Seiten werden für die 16 Bundesländer jeweils die Karten der Potenzialflächen einschließlich der Raumbewertung dargestellt sowie die Ergebnisse des Vorhabens für das jeweilige Bundesland zusammengefasst.

Die Karten sollten dabei lediglich als eine Darstellung der Verteilung und der ungefähren Situation im Bundesland verstanden werden. Da Detailbetrachtungen auf Basis bundeslandspezifischer und lokaler Daten fehlen, sollten aus den Ergebnissen keine konkreten Ableitungen bezüglich der Eignung einzelner Flächen erfolgen – weder in Bezug auf die Eignung noch oder den Ausschluss von Flächen.

Für die Ermittlung der auf den Flächen installierbaren Leistung werden zwei Ansätze verfolgt (vgl. Kapitel 4): Beim dem ersten methodischen Ansatz wird mithilfe der Anlagenplatzierung die auf den Nicht-Ausschlussflächen platzierbare Anzahl Windenergieanlagen bestimmt, während erst im Anschluss durch Anwendung der KRW-Faktoren die geringere Realisierbarkeit auf Flächen mit hohem Konfliktrisiko abgebildet wird. Die sich hieraus ergebenden meist sehr großen zusammenhängenden Flächen überschätzen jedoch den spezifischen Flächenbedarf, der mit der Größe der bebauten Flächen zunimmt. Beim zweiten Ansatz wird mit einem konstanten spezifischen Flächenbedarf von 3 ha/MW gerechnet, welcher jedoch die spezifischen Einflüsse von Form, Größe und Anlagentyp nicht abbildet. Analysen für tatsächliche Gebietsausweisungen zeigen, dass der Ansatz mit einem festen spezifischen Flächenbedarf besser die aktuell gültigen Zusammenhänge abbildet. Bei zunehmenden Windparkgrößen oder Anlagen mit geringerer spezifischer Leistungsdichte ist jedoch zu erwarten, dass der spezifische Flächenbedarf in Zukunft tendenziell eher steigt.

Brandenburg (BB)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 20: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Brandenburg.

In **Brandenburg** sind 40,4 % des Landesgebiets nicht innerhalb der Ausschlussflächen, wobei diese Flächen überwiegend mit hohen Konfliktrisikoklassen bewertet wurden. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 und 2 praktisch nicht vorkommen, entfällt auf 7,5 % der Landesfläche KRW 3. Weitere 11,2 % bzw. 14,2 % entfallen auf die KRW 4 und 5, während 7,5 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Grundsätzlich weist das Bundesland recht weite Flächen mit einer vergleichsweise geringen Zersiedelung auf, wobei das Umland um Berlin eine dichtere Besiedelung und damit geringere Potenziale aufweist. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 7,6 % als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 2.246 km².

Weitere 217 km² entsprechend 0,73 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Der im Vergleich eher hohe Wert deutet auf einen großen Bestand an Altanlagen hin, die bis 2030 voraussichtlich das Ende Ihrer Nutzungsdauer erreichen werden.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit ist Brandenburg nicht betroffen, d.h. alle Flächen weisen eine mittlere Windgeschwindigkeit von > 6,5 m/s in 150 m über Grund (nach Global Wind Atlas) auf.

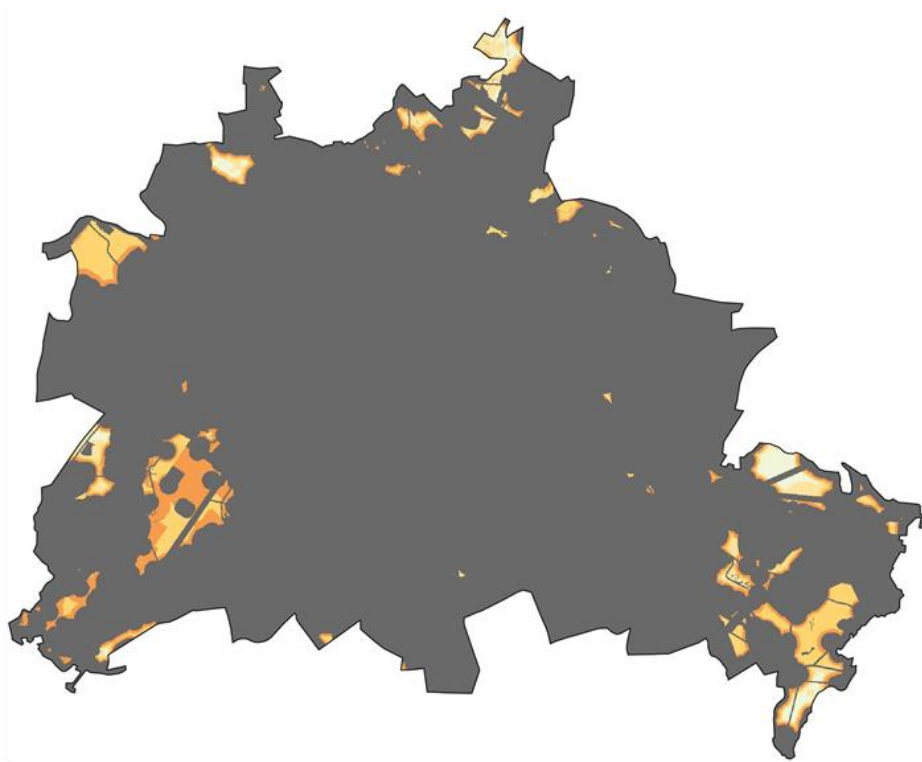
Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 5,7 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 39,6 GW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW beliefe sich die installierbare Leistung hingegen auf 74,9 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 7,3 GW Leistung installieren.

Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 10,5 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 19,8 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Brandenburg eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.932 Volllaststunden, sodass sich aus 39,6 GW installierter Leistung durchschnittlich 116,1 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 197,6 TWh. Weitere 20,5 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhen sich die Flächenpotenziale um 0,11 % der Landesfläche, bzw. um 32,0 km². Der Großteil (0,09 %) dieser Fläche ist auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen, da bereits bei einer Reduktion des Mindestabstands zu Industriegebieten einen Großteil dieses Effekts ausmacht.

Berlin (BE)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 21: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Berlin.

In **Berlin** sind 6,6 % des Landesgebiets außerhalb der Ausschlussflächen, wobei ausschließlich Flächen mit KRW 3 und höher identifiziert wurden. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 und 2 nicht vorkommen, entfällt auf 0,7 % der Landesfläche KRW 3. Weitere 0,8 % bzw. 2,6 % entfallen auf die KRW 4 bzw. KRW 5, während 2,5 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Grundsätzlich weist das Gebiet der Stadt Berlin aufgrund der städtischen Prägung nur sehr eingeschränkt Flächen für einen Zubau von Windenergieanlagen auf, wobei diese Flächen fast ausschließlich am Stadtrand liegen. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 0,73 % als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 6,5 km².

Repoweringflächen machen in Berlin nur einen sehr kleinen Anteil aus, da einerseits nur wenig Windenergieanlagen im Bestand existieren, andererseits diese bis 2030 weitgehend noch nicht zurückgebaut werden. Die ermittelte Repoweringfläche beläuft sich auf lediglich 3 ha, was 0,003 % des Stadtgebiets entspricht.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit ist Berlin nicht betroffen, d.h. alle Flächen weisen eine mittlere Windgeschwindigkeit von > 6,5 m/s in 150 m über Grund (nach Global Wind Atlas) auf.

Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 6,2 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 104 MW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW belief sich die installierbare Leistung hingegen auf 216 MW.

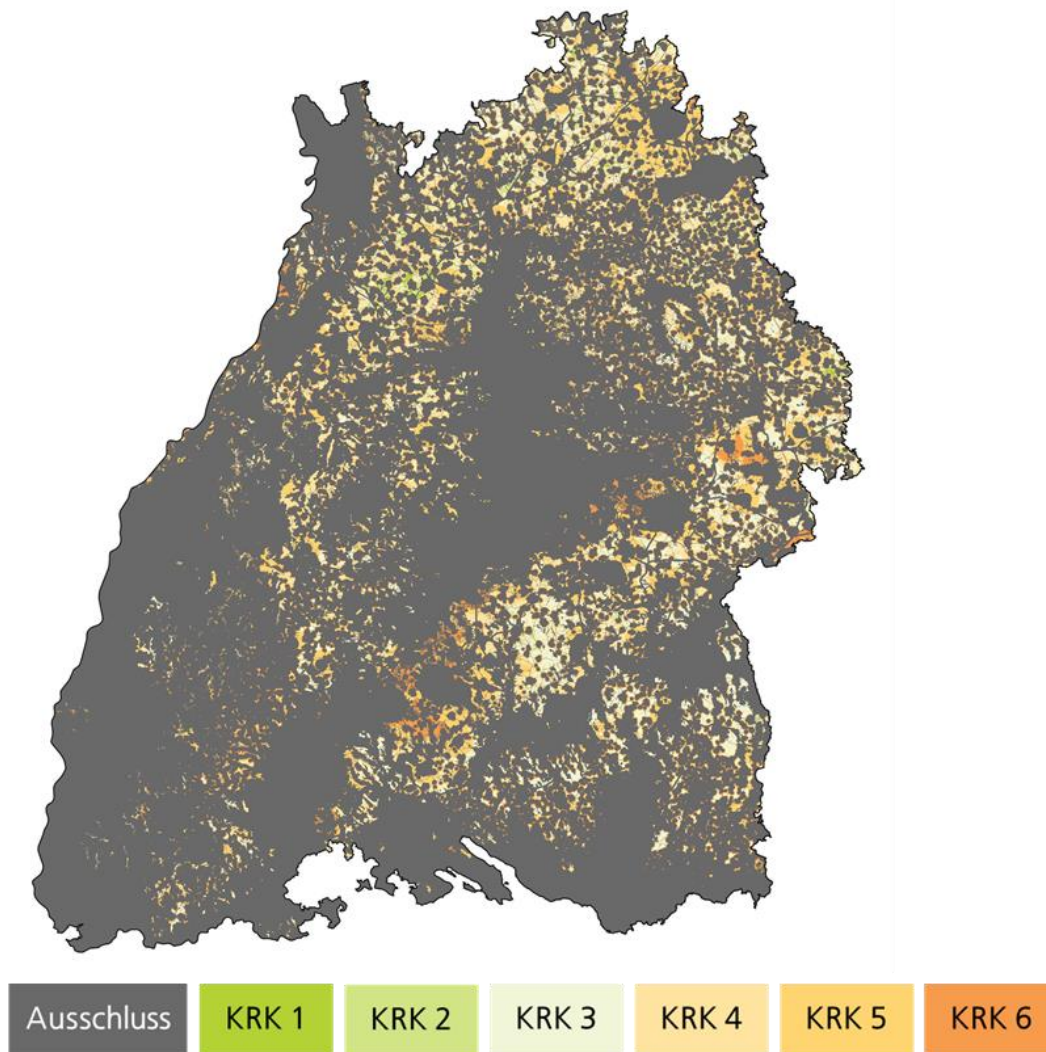
Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 287 MW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 595 MW möglich sind.

Repoweringflächen sind für Berlin von geringer Relevanz. Anhand der Anlagenplatzierung ließe sich eine Windenergieanlage mit 4,3 MW auf der Repoweringfläche installieren, während rechnerisch bei einem spezifischen Flächenbedarf von 3 ha/MW lediglich 1 MW Repoweringleistung möglich wäre.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Berlin eine mittlere Auslastung in Höhe von 3.105 Volllaststunden, sodass sich aus 104 MW installierbarer Leistung durchschnittlich 323 GWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 673 GWh. Weitere 13 GWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhen sich die Flächenpotenziale um 0,02 % der Landesfläche, bzw. um 0,2 km². Dieser sehr geringe Anteil entfällt zur einen Hälfte auf Gebiete, die an Industriegebiete grenzen, sowie zur anderen Hälfte auf Flächen innerhalb der Industriegebiete. Im Gegensatz zu den Stadtstaaten Hamburg und Bremen bietet eine Öffnung der Industriegebiete sowie der Flächen im Bereich bis 300 m an die Industriegebiete nur sehr wenig zusätzliches Flächenpotenzial.

Baden-Württemberg (BW)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 22: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Baden-Württemberg.

In **Baden-Württemberg** sind 17,0 % des Landesgebiets außerhalb der Ausschlussflächen, wobei diese Flächen überwiegend mit hohen Konfliktrisikoklassen bewertet wurden. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 und 2 nur 0,1 % bzw. 0,3 % der Landesfläche ausmachen, wurden 3,5 % der Landesfläche mit KRW 3 bewertet. Weitere 4,1 % bzw. 5,3 % entfallen auf die KRW 4 und 5, während 3,6 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Grundsätzlich weist das Bundesland eine stark heterogene Struktur mit hohen Anteilen an Waldflächen, ausgeprägtem Relief sowie zahlreichen Siedlungsflächen im Außenbereich auf. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 3,6 % als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 1.272 km².

Weitere 15,6 km² entsprechend 0,04 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Dieser im Vergleich eher niedrige Wert ist auf einen geringen Bestand an Altanlagen zurückzuführen, die vor 2010 in Betrieb genommen wurden.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit ist Baden-Württemberg stark betroffen. Auf 47,2 % der Landesfläche beträgt mittlere Windgeschwindigkeit weniger als 6,5 m/s in 150 m über Grund (nach Global Wind Atlas) auf, sodass diese Flächen nicht zu den Flächenpotenzialen beitragen.

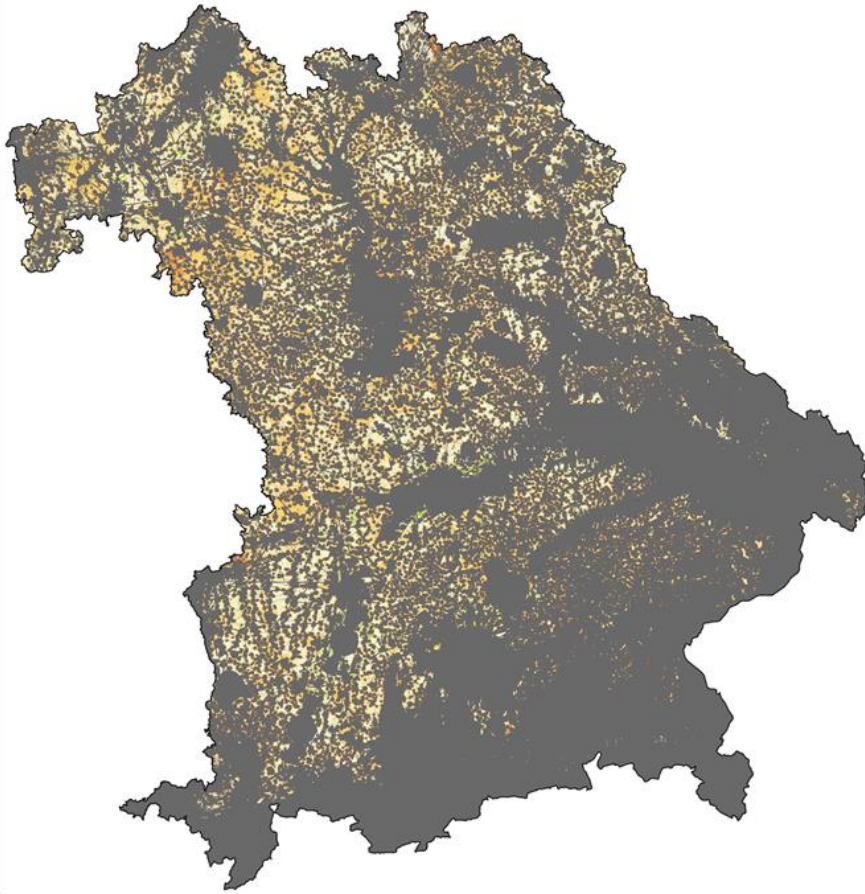
Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 5,3 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 24,2 GW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW belief sich die installierbare Leistung hingegen auf 42,4 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 0,9 GW Leistung installieren.

Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 13,6 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 23,8 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Baden-Württemberg eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.179 Volllaststunden, sodass sich aus 24,2 GW installierter Leistung durchschnittlich 52,7 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 92,4 TWh. Weitere 2,0 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhen sich die Flächenpotenziale um 0,06 % der Landesfläche, bzw. um 22,6 km². Die gesamten 0,06 % Zugewinn an Potenzial sind auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen, da bereits bei einer Reduktion des Mindestabstands zu Industriegebieten diesen Zugewinn an Potenzialfläche beobachtet wird. Würde die Möglichkeit erschaffen, unmittelbar innerhalb der Industriegebiete Windenergieanlagen zu errichten, so bräuchte dies keine nennenswerten weiteren Flächen. Dies deutet darauf hin, dass sich die Industriegebiete überwiegend innerhalb der Mindestabstandspuffer der Siedlungsgebiete befinden.

Bayern (BY)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 23: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Bayern.

In **Bayern** sind 19,5 % des Landesgebiets außerhalb der Ausschlussflächen, wobei diese Flächen überwiegend mit hohen Konfliktrisikoklassen bewertet wurden. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 und 2 nur 0,1 % bzw. 0,4 % der Landesfläche ausmachen, wurden 5,2 % der Landesfläche mit KRW 3 bewertet. Weitere 4,0 % bzw. 5,5 % entfallen auf die KRW 4 und 5, während 4,3 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Das Bundesland ist durch hohe Anteile Waldflächen sowie landwirtschaftlichen Flächen geprägt. Durch eine hohe Anzahl eher kleiner Siedlungsflächen im Außenbereich wird die Nutzbarkeit für die Windenergie stark eingeschränkt und Mindestabstandsvorgaben zu diesen Flächen wirken sich stark auf das Flächenpotenzial aus. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 4,6 % als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 3.255 km². Dies ist nach Niedersachsen der zweithöchste absolute Wert.

Weitere 11,1 km² entsprechend 0,02 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Dieser eher niedrige Wert lässt sich durch einen geringen Bestand an Altanlagen erklären, die vor 2010 in Betrieb genommen wurden.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit ist Bayern ebenso wie Baden-Württemberg stark betroffen. Auf 36,7 % der Landesfläche beträgt mittlere Windgeschwindigkeit weniger als 6,5 m/s in 150 m über Grund (nach Global Wind Atlas) auf, sodass diese Flächen nicht zu den Flächenpotenzialen beitragen.

Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 5,8 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 55,8 GW – etwa so viel, wie Ende 2021 bundesweit installiert war. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW belief sich die installierbare Leistung hingegen auf 108,5 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 0,8 GW Leistung installieren.

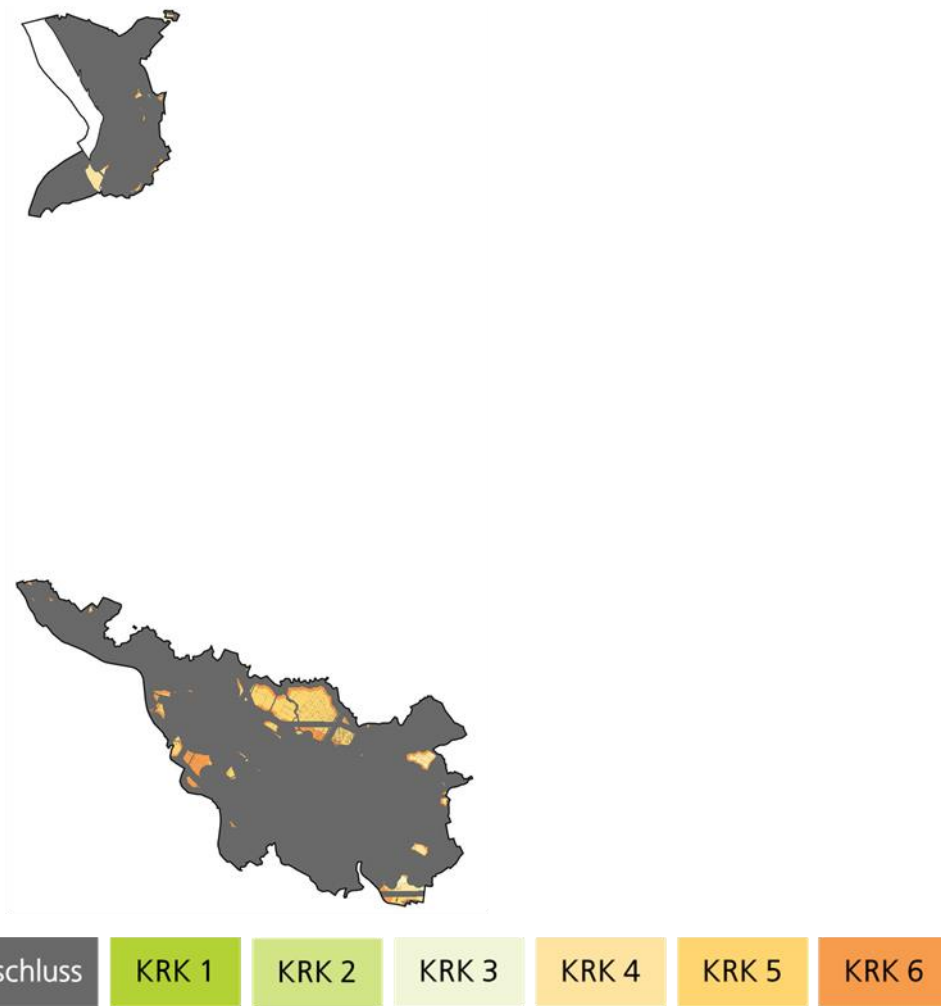
Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 24,2 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 47,0 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Bayern eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.230 Volllaststunden, sodass sich aus 55,8 GW installierter Leistung durchschnittlich 124,4 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 242,0 TWh. Weitere 1,8 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhten sich die Flächenpotenziale um 0,05 % der Landesfläche, bzw. um 36,0 km². Die gesamten 0,05 % Zugewinn an Potenzial sind auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen, da bereits bei einer Reduktion des Mindestabstands zu Industriegebieten diesen Zugewinn an Potenzialfläche beobachtet wird. Würde die Möglichkeit erschaffen, unmittelbar innerhalb der Industriegebiete Windenergieanlagen zu errichten, so brächte dies keine nennenswerten weiteren

Flächen. Dies deutet darauf hin, dass sich die Industriegebiete überwiegend innerhalb der Mindestabstandspuffer der Siedlungsgebiete befinden.

Bremen (HB)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 24: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Bremen.

In **Bremen** befinden sich 7,3 % des Landesgebiets außerhalb der Ausschlussflächen, wobei ausschließlich Flächen mit KRW 3 und höher identifiziert wurden. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 und 2 praktisch nicht vorkommen, entfällt auf 0,1 % der Landesfläche KRW 3. Weitere 0,8 % bzw. 3,6 % entfallen auf die KRW 4 bzw. KRW 5, während 2,2 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Das Gebiet der Städte Bremen und Bremerhaven umfasst neben rein städtisch geprägten Bereichen auch größere Grünlandflächen, die von der Windenergienutzung nicht ausgeschlossen sind. Das Potenzial an diesen Standorten, insbesondere im Bremer Blockland, ist jedoch aufgrund hoher Konfliktrisikowerte stark eingeschränkt. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 0,43 % als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 1,7 km².

Weitere 2,2 km² entsprechend 0,55 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Damit weist Bremen nach Brandenburg und Sachsen-Anhalt den dritthöchsten Anteil an Repoweringflächen auf, also Flächen, die durch einen Rückbau bis 2030 verfügbar werden.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit ist Bremen nicht betroffen, d.h. alle Flächen weisen eine mittlere Windgeschwindigkeit von > 6,5 m/s in 150 m über Grund (nach Global Wind Atlas) auf.

Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 3,3 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 53 MW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW belief sich die installierbare Leistung hingegen auf 57 MW.

Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 246 MW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 268 MW möglich sind.

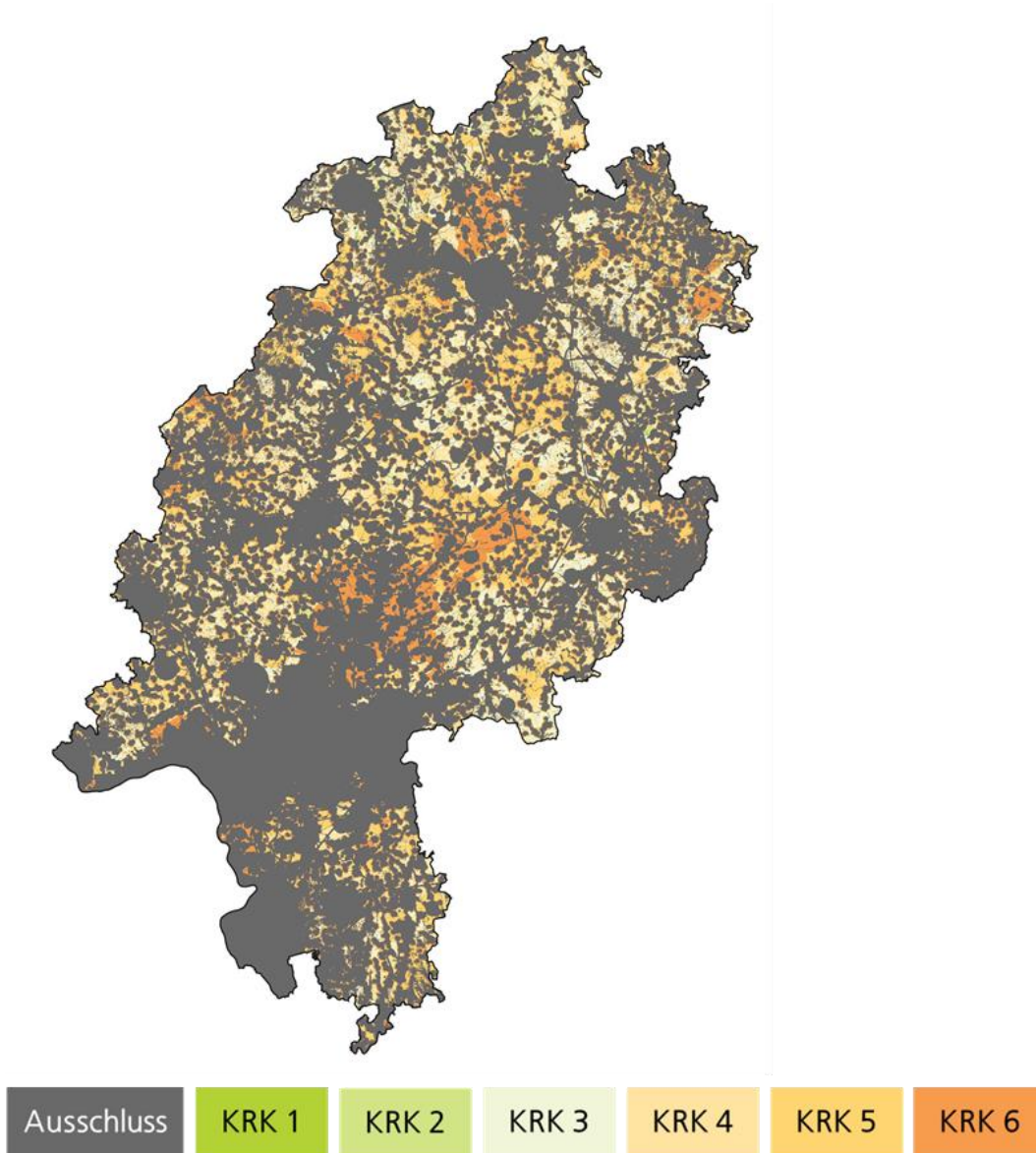
Repoweringflächen bieten für Bremen ein erhebliches zusätzliches Potenzial. Anhand der Anlagenplatzierung ließen sich Windenergieanlagen mit 151 MW auf der Repoweringfläche installieren, während rechnerisch bei einem spezifischen Flächenbedarf von 3 ha/MW lediglich 74 MW Repoweringleistung möglich wäre. Dass mit der Anlagenplatzierung hier höhere Werte ermittelt wurden, ist auf zahlreiche einzeln oder in linearer Anordnung stehende Anlagen zurückzuführen.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Bremen eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.915 Volllaststunden, sodass sich aus 53 MW installierbarer Leistung durchschnittlich 153 GWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 165 GWh. Weitere 451 GWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhen sich die Flächenpotenziale um 0,35 % der Landesfläche, bzw. um 1,4 km². Dies ist ein vergleichsweise hoher Wert, der auf einen vergleichsweise hohen Anteil an Industriegebieten und speziell

Hafengebieten mit großem Abstand zu Siedlungsflächen zurückzuführen ist. Während ein Wegfallen der Mindestabstände zu Industriegebieten ein Potenzial von 0,1 % der Landesfläche freigeben würden, entfallen weitere 0,25 % der Landesfläche auf Potenzialflächen innerhalb der Industriegebiete. Hier weist Bremen zusammen mit Hamburg die höchsten zusätzlichen Potenziale auf.

Hessen (HE)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 25: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Hessen.

In **Hessen** sind 30,3 % des Landesgebiets außerhalb der Ausschlussflächen. Wie in den meisten Flächenländern dominieren Flächen mit eher hoher Konfliktrisikobewertung. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 und 2 nur 0,0 % bzw. 0,3 % der Landesfläche ausmachen, wurden 4,6 % der Landesfläche mit KRW 3 bewertet. Weitere 7,9 % bzw. 9,5 % entfallen auf die KRW 4 und 5, während 7,9 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Das Bundesland ist durch hohe Anteile Waldflächen sowie landwirtschaftlichen Flächen geprägt. Insbesondere die eher windhöffigen Kuppenlagen der Mittelgebirgs-Hügel ist in den überwiegenden Fällen bewaldet. Weiterhin ist das Bundesland durch die dichte Besiedlung in der Rhein-Main-Region geprägt. Trotz vieler kleiner Dörfer finden sich größere Flächen, die hohe Abstände zu Siedlungsflächen aufweisen, wobei diese meist in Wäldern liegen. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 5,1 % der Landesfläche als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 1.068 km².

Weitere 21,5 km² entsprechend 0,10 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Dieser eher niedrige Wert lässt sich durch einen geringen Bestand an Altanlagen erklären, die vor 2010 in Betrieb genommen wurden.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit sind in Hessen 19,9 % der Landesfläche betroffen, wobei diese Gebiete überwiegend in Südhessen liegen. Das ist nach Bayern und Baden-Württemberg der dritthöchste Wert.

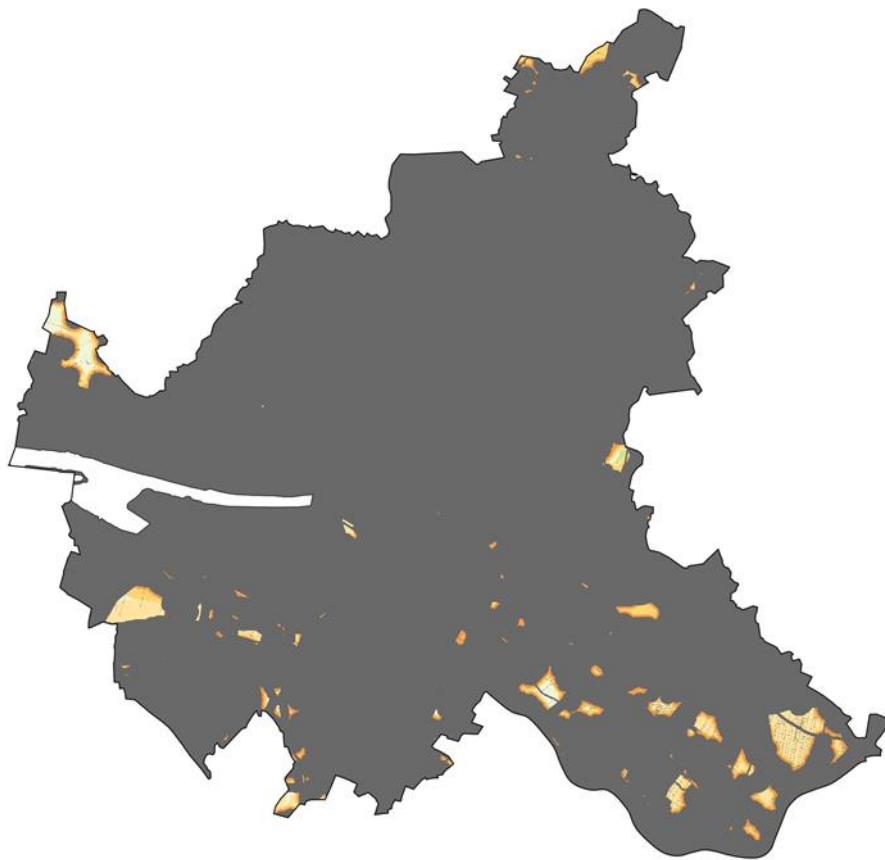
Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 5,6 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 18,9 GW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW beliefe sich die installierbare Leistung hingegen auf 35,6 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 1,0 GW Leistung installieren.

Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 7,5 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 14,1 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Hessen eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.490 Volllaststunden, sodass sich aus 18,9 GW installierter Leistung durchschnittlich 47,1 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 88,6 TWh. Weitere 2,6 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhten sich die Flächenpotenziale um 0,07 % der Landesfläche, bzw. um 14,8 km². Die gesamten 0,07 % Zugewinn an Potenzial sind auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen, da bereits bei einer Reduktion des Mindestabstands zu Industriegebieten dieser Zugewinn an Potenzialfläche beobachtet wird. Würde die Möglichkeit erschaffen, auch innerhalb der Industriegebiete Windenergieanlagen zu errichten, so brächte dies keine nennenswerten weiteren Flächen. Dies deutet darauf hin, dass sich die Industriegebiete überwiegend innerhalb der Mindestabstandspuffer der Siedlungsgebiete befinden.

Hamburg (HH)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 26: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Hamburg.

In **Hamburg** befinden sich lediglich 3,4 % des Stadtgebiets außerhalb der Ausschlussflächen. Dies ist im Bundesvergleich der niedrigste Wert. Es wurden ausschließlich Flächen mit KRW 3 und höher identifiziert – auf KRW 3 entfallen 0,4 % der Fläche von Hamburg, während 1,0 % bzw. 0,9 % Konfliktrisikowerte 4 bzw. 5 entfallen. Weitere 0,9 % der Fläche wurden durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet und tragen damit nicht zu den Potenzialflächen bei.

Das Gebiet der Stadt Hamburg umfasst neben durch Wohnsiedlungsflächen geprägten Bereichen insbesondere auch größere Industrie- und Hafengebiete, die in der Basisbetrachtung von der Windenergienutzung ausgeschlossen sind. Darüber hinaus existieren jedoch auch einige Grünlandflächen, die eine Windenergienutzung ermöglichen, insbesondere im Bereich Altes Land sowie dem Bezirk Bergedorf. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 0,49 % als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 3,6 km².

Weitere 1,2 km² entsprechend 0,16 % des Stadtgebiets wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit ist Hamburg nicht betroffen, d.h. alle Flächen weisen eine mittlere Windgeschwindigkeit von > 6,5 m/s in 150 m über Grund (nach Global Wind Atlas) auf.

Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 3,7 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 98 MW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW belief sich die installierbare Leistung hingegen auf 122 MW. Aufgrund der eher kleinen zusammenhängenden Flächen liegt für Hamburg der mithilfe der Anlagenplatzierung sowie der mittels festen Umrechnungsfaktor berechnete Wert dichter beisammen.

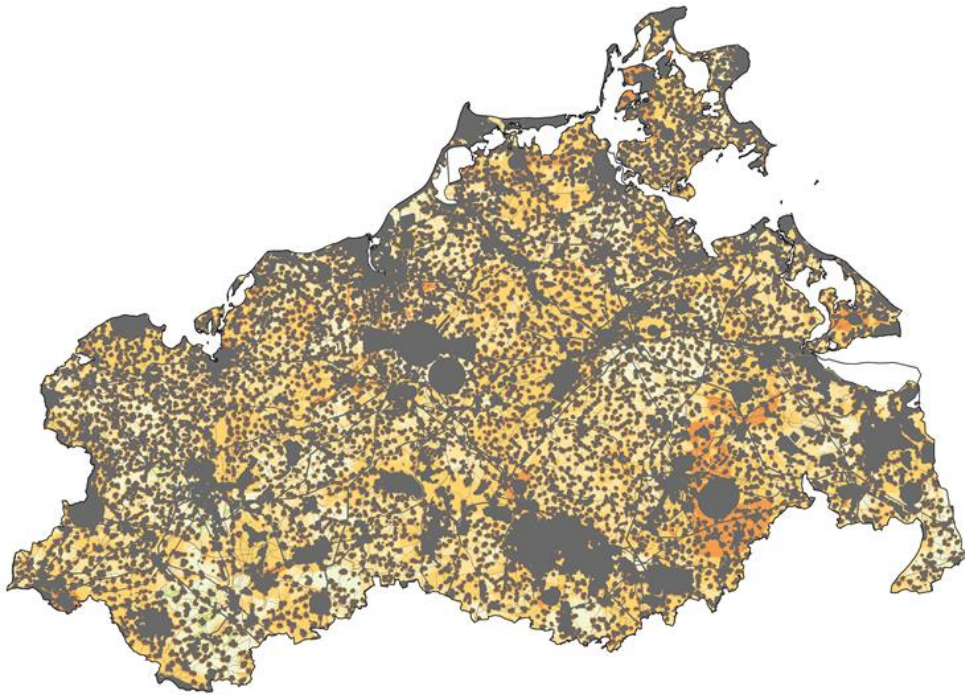
Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 398 MW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 495 MW möglich sind.

Da in Hamburg insbesondere im Alten Land bereits einige Windenergieanlagen installiert sind, die bis 2030 zurückgebaut werden, bietet Repowering in zusätzliches Potenzial für 68 MW. Rechnerisch wären bei einem spezifischen Flächenbedarf von 3 ha/MW lediglich 39 MW Repoweringleistung möglich.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Hamburg eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.830 Volllaststunden, sodass sich aus 98 MW installierbarer Leistung durchschnittlich 277 GWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 340 GWh. Weitere 190 GWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhen sich die Flächenpotenziale um 0,44 % der Landesfläche, bzw. um 3,2 km², was fast einer Verdoppelung des Flächenpotenzials entspricht. Dies der bundesweit höchste Wert, welcher auf einen hohen Anteil an Industriegebieten und speziell Hafengebieten mit großem Abstand zu Siedlungsflächen zurückzuführen ist. Während ein Wegfallen der Mindestabstände zu Industriegebieten ein Potenzial von 0,06 % der Landesfläche freigeben würde, entfallen weitere 0,38 % der Landesfläche auf Potenzialflächen innerhalb der Industriegebiete.

Mecklenburg-Vorpommern (MV)



Ausschluss

KRK 1

KRK 2

KRK 3

KRK 4

KRK 5

KRK 6

© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 27: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Mecklenburg-Vorpommern.

In **Mecklenburg-Vorpommern** ist mit 43,5 % der bundesweit höchste Anteil des Landesgebiets außerhalb der Ausschlussflächen. Vergleichbar hohe Werte wurden für Sachsen-Anhalt und Brandenburg ermittelt. Wie in den meisten Flächenländern dominieren Flächen mit eher hoher Konfliktrisikobewertung. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 und 2 nur 0,0 % bzw. 0,2 % der Landesfläche ausmachen, wurden 4,7 % der Landesfläche mit KRW 3 bewertet. Bewertungen mit KRW 4 und 5 machen in Mecklenburg-Vorpommern besonders hohe Anteile von 12,0 und 16,1 % aus, während 10,1 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Mecklenburg-Vorpommern ist durch eine vergleichsweise geringe Besiedlungsdichte und hohe Anteile landwirtschaftlicher Flächen geprägt. Trotz vieler kleiner Dörfer und Siedlungen finden sich größere Flächen, die hohe Abstände zu Siedlungsflächen aufweisen. Durch die geringen Siedlungsflächenanteile sowie viele naturnahe Flächen ist in diesem Bundesland jedoch der Natur- und Artenschutz von überdurchschnittlicher Bedeutung. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben daher nur 6,2 % der Landesfläche als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 1.435 km².

Weitere 63,3 km² entsprechend 0,27 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Dieser Wert entspricht etwa dem bundesweiten Durchschnitt.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit ist Mecklenburg-Vorpommern nicht betroffen, d.h. alle Flächen weisen eine mittlere Windgeschwindigkeit von > 6,5 m/s in 150 m über Grund (nach Global Wind Atlas) auf.

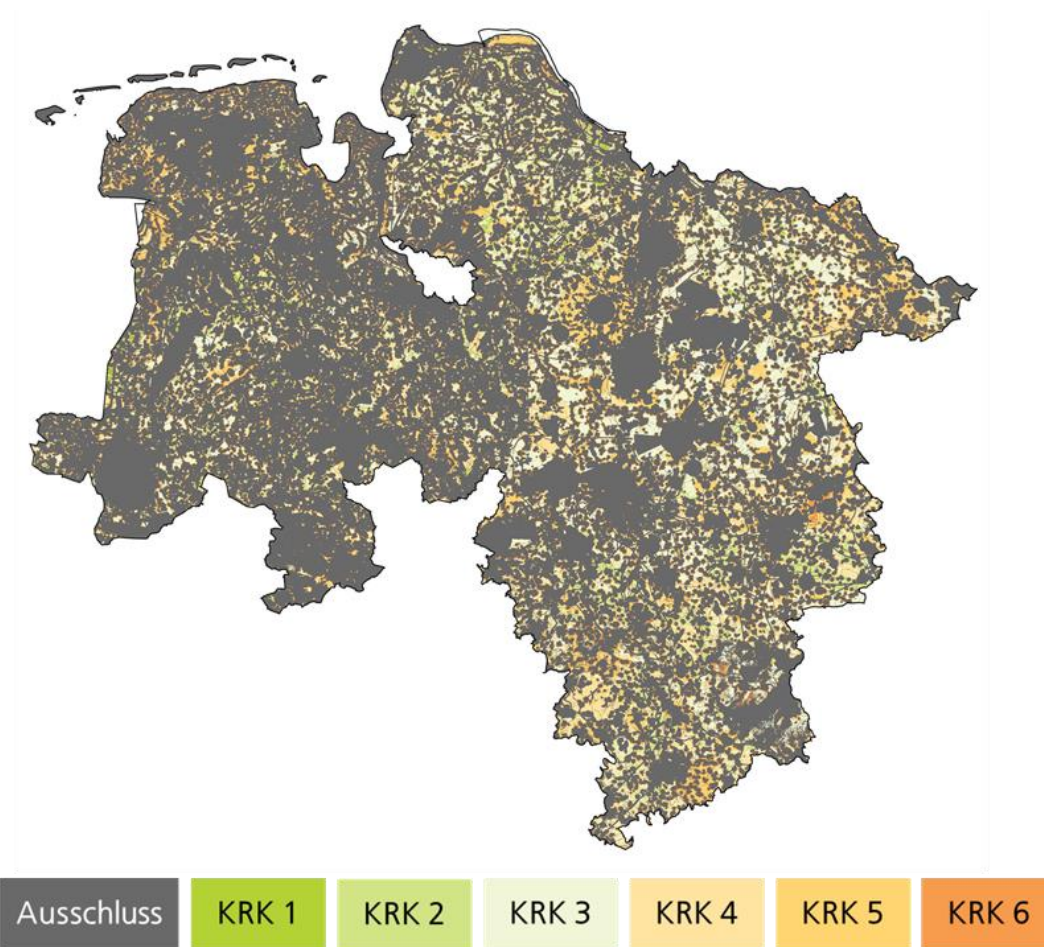
Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 5,1 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 27,9 GW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW beliefe sich die installierbare Leistung hingegen auf 47,8 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 2,8 GW Leistung installieren.

Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 9,0 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 15,4 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Mecklenburg-Vorpommern eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.884 Volllaststunden, sodass sich aus 27,9 GW installierter Leistung durchschnittlich 80,5 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 138,0 TWh. Weitere 8,1 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhten sich die Flächenpotenziale um 0,06 % der Landesfläche, bzw. um 15,1 km². Etwa 0,05 % Zugewinn an Potenzial sind auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen, während die Möglichkeit, auch innerhalb der Industriegebiete Windenergieanlagen zu errichten, lediglich die Flächenpotenziale als Anteil der Landesfläche um weitere 0,01 % erhöhen würde.

Niedersachsen (NI)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 28: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Niedersachsen.

In **Niedersachsen** sind 26,4 % des Landesgebiets außerhalb der Ausschlussflächen, was dem Bundesdurchschnitt entspricht. Im Vergleich zu den anderen Bundesländern hat Niedersachsen vergleichsweise hohe Flächenanteile mit Konfliktrisikowert 1 und 2. Hier liegen die Anteile bei 0,4 % für KRW 1, bzw. 1,4 % für KRW 2. Weiterhin wurden 7,5 % der Landesfläche mit KRW 3 bewertet. Flächen mit KRW 4 und 5 machen in Niedersachsen 5,6 und 6,7 % der Landesfläche aus, während ein Flächenanteil von 4,4 % durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beiträgt.

Niedersachsen ist als zweitgrößtes Bundesland einerseits durch die norddeutsche Tiefebene sowie im südlichen Teil die Mittelgebirge charakterisiert. Die Siedlungsstruktur, Waldflächenanteile sowie landwirtschaftliche Flächen sind eher durchschnittlich, ohne besondere Ausprägung. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben 7,5 % der Landesfläche als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 3.564 km².

Weitere 158,9 km² entsprechend 0,33 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Dieser Wert liegt geringfügig höher als der bundesweite Durchschnitt (0,26 %), was einerseits auf den überdurchschnittlichen Ausbau der Windenergie, andererseits einem hohen Anteil an Altanlagen in Niedersachsen zurückzuführen ist.

Die Mindestwindgeschwindigkeit von 6,5 m/a in 150 m über Grund (nach Global Wind Atlas) wird in Niedersachsen nur auf 0,3 % der Landesfläche nicht erreicht. Diese Flächen befinden sich in Südniedersachsen.

Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 5,2 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 68,7 GW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW beliefe sich die installierbare Leistung hingegen auf 118,8 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 7,9 GW Leistung installieren.

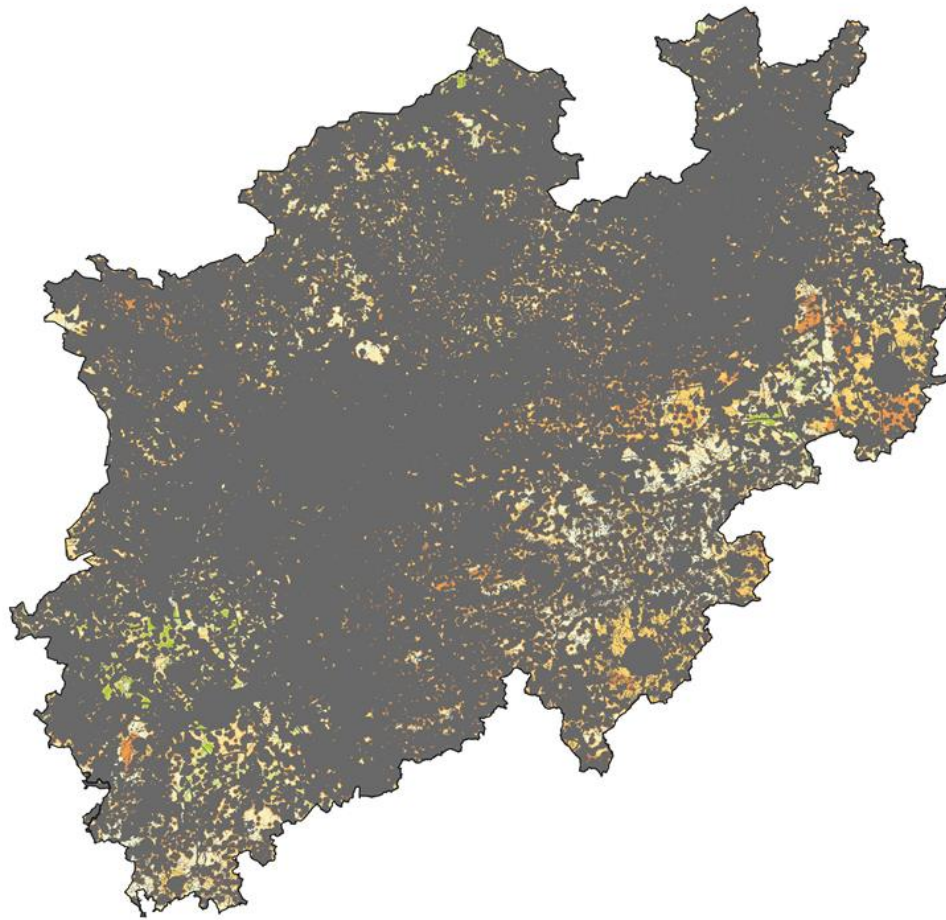
Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 18,4 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 31,8 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Niedersachsen eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.835 Volllaststunden, sodass sich aus 68,7 GW installierter Leistung durchschnittlich 194,7 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 336,8 TWh. Weitere 23,3 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhten sich die Flächenpotenziale um 0,19 % der Landesfläche, bzw. um 89,8 km². Der Großteil des Potenzialzugewinns (0,15 %) ist auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen, während die Möglichkeit, auch innerhalb der Industriegebiete Windenergieanlagen zu errichten, die Flächenpotenziale als Anteil der Landesfläche um weitere 0,04 % erhöhen würde.

Niedersachsen ist damit das Bundesland, das im Ländervergleich die größten (absoluten) Zugewinne des Flächenpotenzials durch Öffnung der Industriegebiete zu verzeichnen hätte.

Nordrhein-Westfalen (NW)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 29: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Nordrhein-Westfalen.

Nordrhein-Westfalen ist mit 11,9 % des Landesgebiets außerhalb der Ausschlussflächen das Flächenland mit dem niedrigsten Wert – nur die Stadtstaaten haben einen noch höheren Anteil Ausschlussflächen. Angesichts des hohen Anteils Ausschlussflächen hat Nordrhein-Westfalen jedoch vergleichsweise hohe Flächenanteile, die mit niedrigen KRW bewertet sind. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 und 2 0,2 % bzw. 0,4 % der Landesfläche ausmachen, wurden 2,3 % der Landesfläche mit KRW 3 bewertet. Weitere 2,0 % bzw. 3,6 % entfallen auf die KRW 4 und 5, während 3,1 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Das Bundesland ist einerseits durch eine starke Zersiedelung mit einer hohen Anzahl einzelstehender landwirtschaftlicher Betriebe sowie durch das Ruhrgebiet geprägt. Die Flächenpotenziale sind insbesondere in den östlichen Regionen des Bundeslandes verortet. Auffällig ist weiterhin ein relativ hoher Anteil an Flächen mit niedriger Konfliktrisikobewertung in der Planungsregion Köln. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 2,5 % der Landesfläche als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 844 km².

Weitere 82,8 km² entsprechend 0,24 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Dieser Wert entspricht etwa dem Bundesdurchschnitt (0,26 %).

Die Mindestwindgeschwindigkeit von 6,5 m/a in 150 m über Grund (nach Global Wind Atlas) wird in Niedersachsen nur auf 0,5 % der Landesfläche nicht erreicht. Diese Flächen befinden sich im überwiegend im Siegerland.

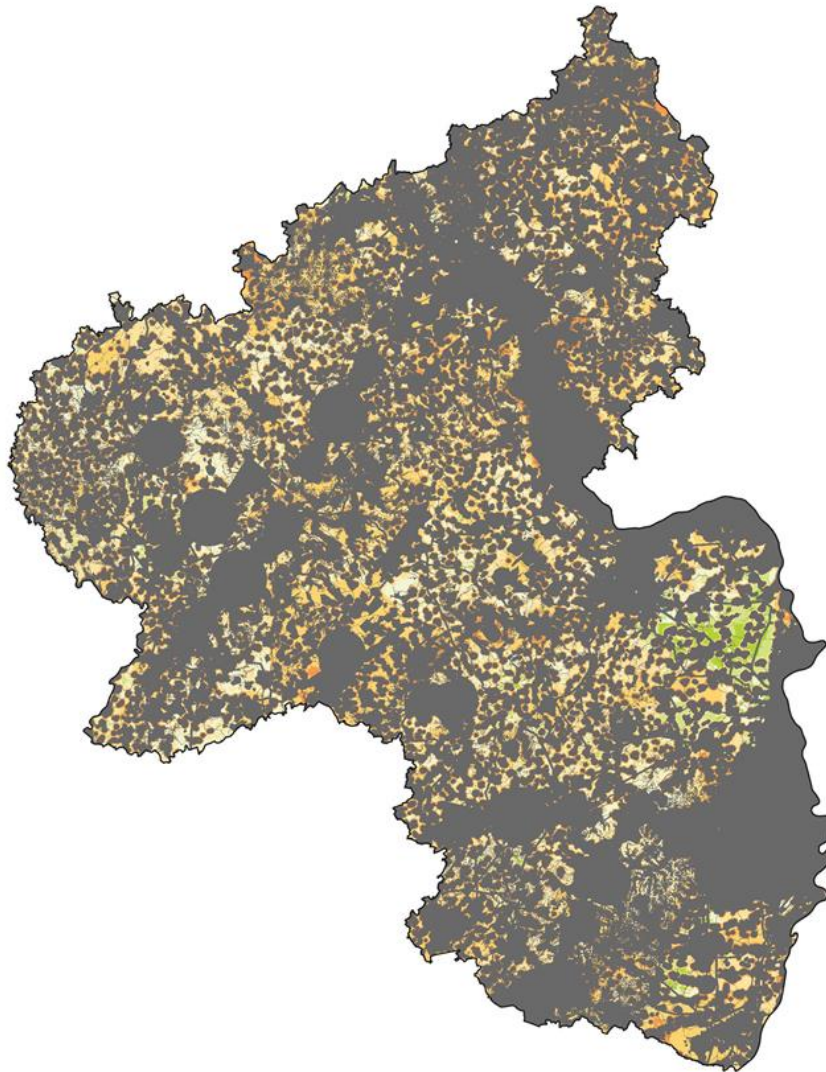
Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 4,5 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 18,6 GW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW beliefen sich die installierbare Leistung hingegen auf 28,1 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 4,5 GW Leistung installieren.

Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 15,1 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 22,7 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Nordrhein-Westfalen eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.757 Volllaststunden, sodass sich aus 18,6 GW installierter Leistung durchschnittlich 47,1 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 52,2 TWh. Weitere 4,5 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhten sich die Flächenpotenziale um 0,08 % der Landesfläche, bzw. um 27,2 km². Der Großteil dieser Fläche ist auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen. Während ein Wegfallen der Mindestabstände zu Industriegebieten ein Potenzial von 0,07 % der Landesfläche freigeben würden, entfallen weitere 0,01 % der Landesfläche auf Potenzialflächen innerhalb der Industriegebiete.

Rheinland-Pfalz (RP)



Ausschluss

KRK 1

KRK 2

KRK 3

KRK 4

KRK 5

KRK 6

© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 30: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Rheinland-Pfalz.

In **Rheinland-Pfalz** sind 23,3 % des Landesgebiets außerhalb der Ausschlussflächen. Ähnlich wie in Nordrhein-Westfalen wurden Flächen mit KRW 1 und 2 geringfügig häufiger ermittelt als im Bundesdurchschnitt. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 und 2 0,3 % bzw. 0,6 % der Landesfläche ausmachen, wurden 3,3 % der Landesfläche mit KRW 3 bewertet. Weitere 6,1 % bzw. 7,4 % entfallen auf die KRW 4 und 5, während 5,4 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Das Bundesland ist vergleichbar mit Hessen durch hohe Anteile Waldflächen sowie landwirtschaftliche Flächen geprägt. Insbesondere die eher windhöflichen Kuppen der Mittelgebirgslagen ist in den überwiegenden Fällen bewaldet. Trotz vieler kleiner Dörfer finden sich größere Flächen, die hohe Abstände zu Siedlungsflächen aufweisen. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 4,4 % der Landesfläche als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 866 km².

Weitere 41,7 km² entsprechend 0,21 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Dieser leicht unterdurchschnittliche Wert lässt sich durch einen leicht unterdurchschnittlichen Bestand an Altanlagen erklären, die vor 2010 in Betrieb genommen wurden.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit sind in Rheinland-Pfalz 14,4 % der Landesfläche betroffen. Das ist nach Bayern, Baden-Württemberg und Hessen der vierthöchste Wert.

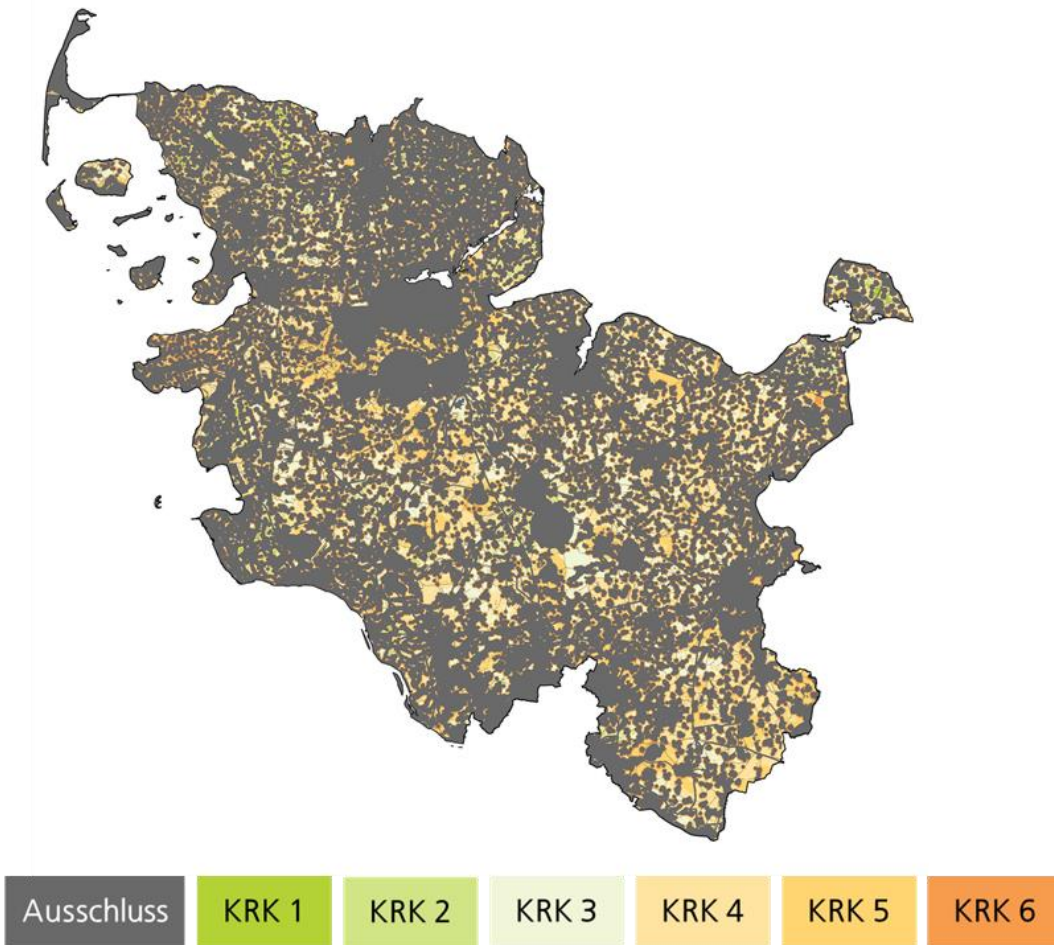
Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 5,1 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 16,8 GW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW beliefe sich die installierbare Leistung hingegen auf 28,9 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 2,0 GW Leistung installieren.

Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 7,7 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 13,2 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Rheinland-Pfalz eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.438 Volllaststunden, sodass sich aus 16,8 GW installierter Leistung durchschnittlich 41,1 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 70,4 TWh. Weitere 4,9 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhten sich die Flächenpotenziale um 0,08 % der Landesfläche, bzw. um 14,4 km². Der Großteil dieser Fläche ist auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen. Während ein Wegfallen der Mindestabstände zu Industriegebieten ein Potenzial von 0,07 % der Landesfläche freigeben würden, entfallen weitere 0,01 % der Landesfläche auf Potenzialflächen innerhalb der Industriegebiete.

Schleswig-Holstein (SH)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 31: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Schleswig-Holstein.

In **Schleswig-Holstein** sind 25,5 % des Landesgebiets außerhalb der Ausschlussflächen. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 und 2 0,1 % bzw. 0,5 % der Landesfläche ausmachen, wurden 4,4 % der Landesfläche mit KRW 3 bewertet. Weitere 5,9 % bzw. 7,7 % entfallen auf die KRW 4 und 5, während 6,4 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Das Bundesland ist vergleichbar mit Sachsen und Nordrhein-Westfalen relativ stark zersiedelt, während die Flächen außerhalb der Siedlungsflächen überwiegend aus Ackerflächen und Grünland bestehen. Zahlreiche landwirtschaftliche Betriebe sind im Außenbereich verstreut. Der Waldanteil in Schleswig-Holstein ist gering. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 4,8 % der Landesfläche als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 743 km².

Weitere 66,6 km² entsprechend 0,43 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Dieser überdurchschnittliche Wert lässt sich durch den bisherigen starken Ausbau der Windenergie in Schleswig-Holstein erklären.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit ist Schleswig-Holstein nicht betroffen. Aufgrund der Küstennähe und weitgehend flachem Gelände, ist Schleswig-Holstein das Bundesland mit der höchsten Windhöffigkeit.

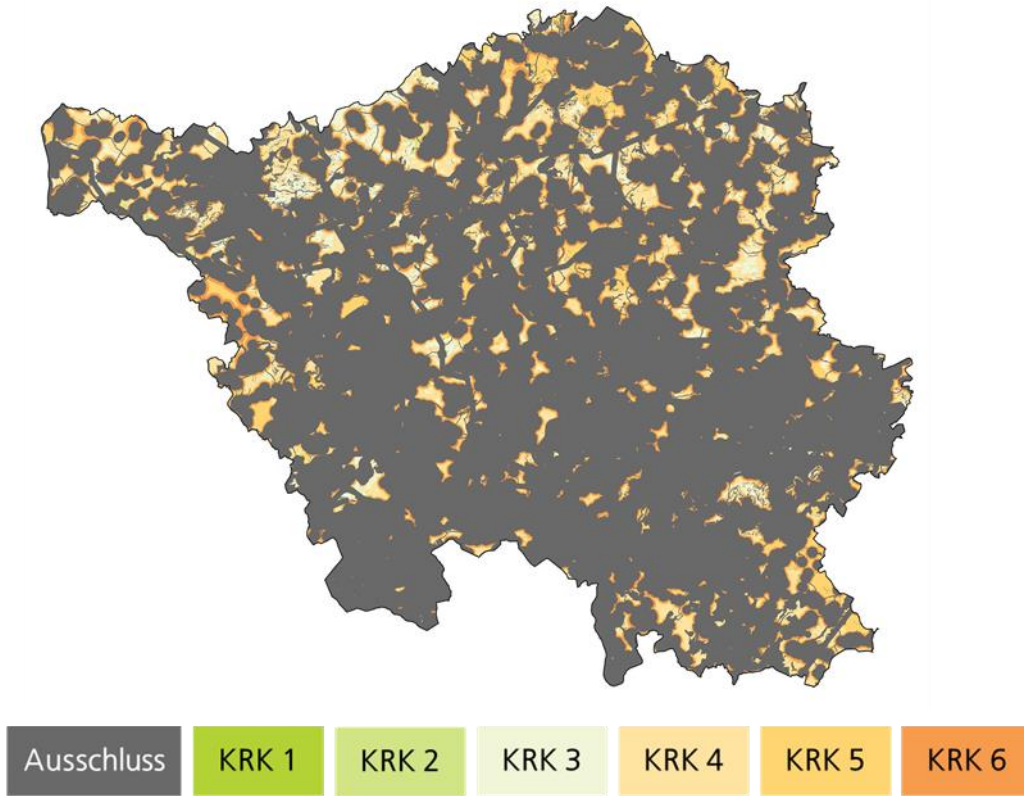
Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 5,2 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 14,3 GW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW beliefe sich die installierbare Leistung hingegen auf 24,8 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 3,3 GW Leistung installieren.

Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 6,0 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 10,4 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Schleswig-Holstein eine mittlere Auslastung in Höhe von 3.224 Volllaststunden, sodass sich aus 14,3 GW installierter Leistung durchschnittlich 46,0 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 79,8 TWh. Weitere 11,3 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhten sich die Flächenpotenziale um 0,06 % der Landesfläche, bzw. um 8,9 km². Der Großteil dieser Fläche ist auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen. Während ein Wegfallen der Mindestabstände zu Industriegebieten ein Potenzial von 0,05 % der Landesfläche freigeben würden, entfallen weitere 0,01 % der Landesfläche auf Potenzialflächen innerhalb der Industriegebiete.

Saarland (SL)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 32: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für das Saarland.

Im **Saarland** sind 18,1 % des Landesgebiets außerhalb der Ausschlussflächen. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 und 2 0,0 % bzw. 0,1 % der Landesfläche ausmachen, wurden 2,0 % der Landesfläche mit KRW 3 bewertet. Weitere je 5,4 % entfallen auf die KRW 4 und 5, während 5,2 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Das Saarland ist das Flächenland mit der zweithöchsten Besiedlungsdichte nach Nordrhein-Westfalen. Das Bundesland ist relativ stark zersiedelt, während die Flächen außerhalb der Siedlungsflächen überwiegend Wälder sowie zum Teil Ackerflächen sind. Nach Anwendung der KRW-Faktoren aus der Raumbewertung verbleiben noch 2,6 % (66,8 km²) der Landesfläche als Potenzialfläche. Dies ist nach Nordrhein-Westfalen der zweitniedrigste Wert für ein Flächenbundesland.

Weitere 2,7 km² entsprechend 0,11 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Der unterdurchschnittliche Anteil an Repoweringflächen spiegelt eine geringe Zahl älterer Bestandsanlagen wider, während der Ausbau der Windenergie hingegen leicht über dem Bundesdurchschnitt liegt.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit ist das Saarland nur in geringem Umfang betroffen. Auf 3,1 % der Landesfläche beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit in 150 m über Grund nach Global Wind Atlas weniger als 6,5 m/s.

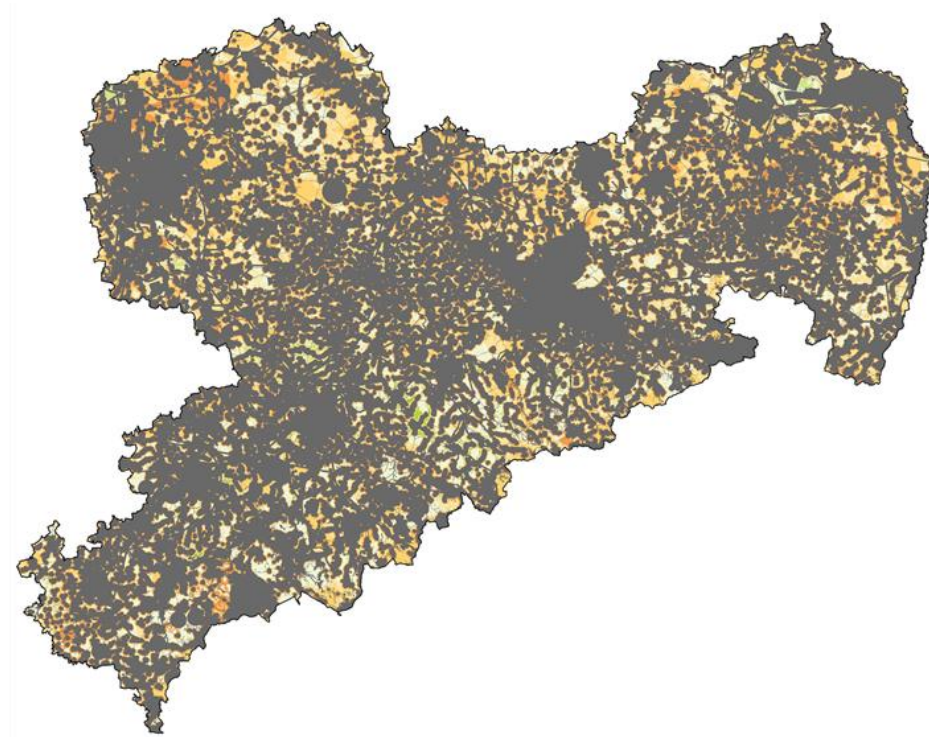
Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 5,1 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 1,3 GW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW beliefe sich die installierbare Leistung hingegen auf 2,2 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 0,1 GW Leistung installieren.

Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 1,0 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 1,7 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte im Saarland eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.347 Volllaststunden, sodass sich aus 1,3 GW installierter Leistung durchschnittlich 3,1 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 5,2 TWh. Weitere 0,3 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhten sich die Flächenpotenziale um 0,11 % der Landesfläche, bzw. um 2,7 km². Der größere Teil dieser Fläche ist auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen. Während ein Wegfallen der Mindestabstände zu Industriegebieten ein Potenzial von 0,05 % der Landesfläche freigeben würden, entfallen weitere 0,03 % der Landesfläche auf Potenzialflächen innerhalb der Industriegebiete.

Sachsen (SN)



Ausschluss

KRK 1

KRK 2

KRK 3

KRK 4

KRK 5

KRK 6

© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 33: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Sachsen.

In **Sachsen** sind 27,5 % des Landesgebiets nicht innerhalb der Ausschlussflächen, wobei diese Flächen überwiegend mit hohen Konfliktrisikoklassen bewertet wurden. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 und 2 0,1 % bzw. 0,3 % der Landesfläche ausmachen, wurden 5,2 % der Landesfläche mit KRW 3 bewertet. Weitere je 6,3 % bzw. 8,4 % entfallen auf die KRW 4 bzw. KRW 5, während 7,0 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Das Bundesland ist einerseits durch die drei Großstädte Dresden, Leipzig und Chemnitz geprägt, andererseits zeichnen sich die Ortschaften oftmals durch eine langgestreckte Ausdehnung entlang der Hauptverkehrsstraßen aus. Außerhalb der Ausschlussflächen ist der Waldanteil vergleichsweise hoch. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 5,2 % als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 957 km².

Weitere 32 km² entsprechend 0,18 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Der im Vergleich eher niedrige Wert spiegelt den bis 2010 eher unterdurchschnittlichen Ausbau der Windenergie bis 2010 wider.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit ist das Saarland nur in geringem Umfang betroffen. Auf 1,0 % der Landesfläche beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit in 150 m über Grund nach Global Wind Atlas weniger als 6,5 m/s.

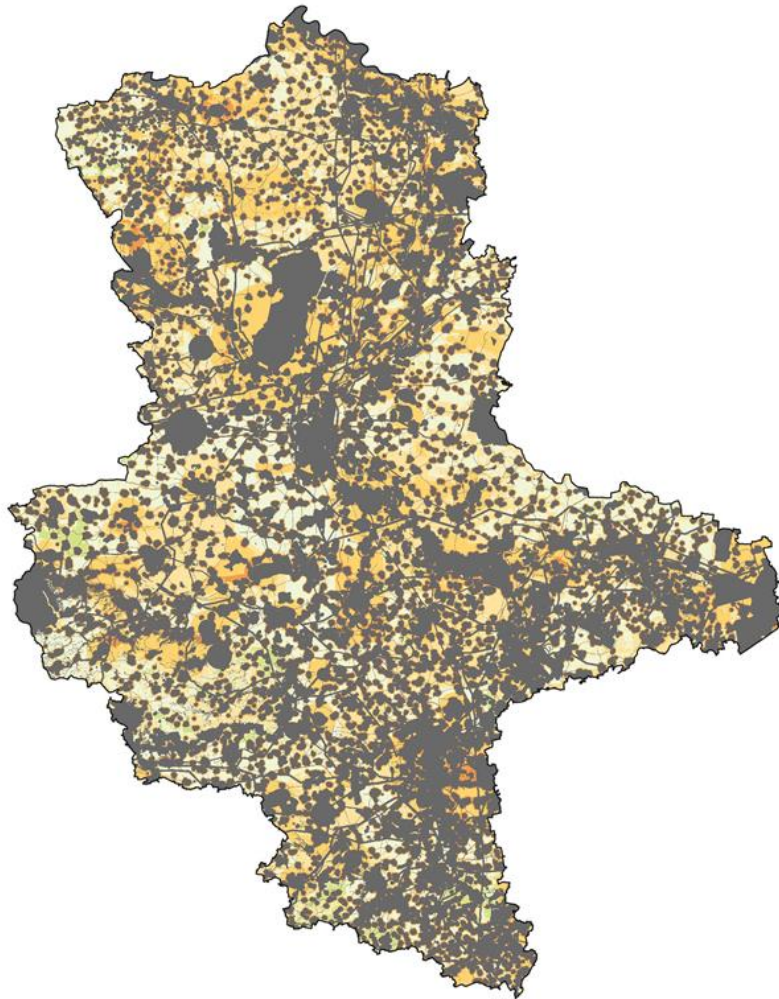
Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 5,7 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 16,7 GW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW beliefe sich die installierbare Leistung hingegen auf 31,9 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 1,6 GW Leistung installieren.

Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 6,4 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 12,3 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Sachsen eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.804 Volllaststunden, sodass sich aus 16,7 GW installierter Leistung durchschnittlich 46,7 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge auf 91,1 TWh. Weitere 4,4 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhen sich die Flächenpotenziale um 0,09 % der Landesfläche, bzw. um 17,0 km². Der Großteil (0,07 %) dieser Fläche ist auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen, da bereits bei einer Reduktion des Mindestabstands zu Industriegebieten einen Großteil dieses Effekts ausmacht. Weitere 0,02 % des Zugewinns an Potenzialfläche befinden sich innerhalb der Industrieflächen.

Sachsen-Anhalt (ST)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 34: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Sachsen-Anhalt.

In **Sachsen-Anhalt** sind 43,1 % des Landesgebiets nicht innerhalb der Ausschlussflächen, wobei diese Flächen überwiegend mit hohen Konfliktrisikoklassen bewertet wurden. Vergleichbar hohe Werte wurden für Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg ermittelt. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 praktisch nicht vorkommen, kommen Flächen mit KRW 2 bzw. KRW 3 zu auf 0,7 bzw. 11,6 % der Landesfläche vor. Weitere 10,5 % bzw. 13,2 % entfallen auf die KRW 4 und 5, während 6,3 % der Landesfläche durch Hochstufung mit KRW 6 bewertet wurden und damit nicht zu den Potenzialflächen beitragen.

Grundsätzlich weist das Bundesland recht weite Flächen mit einer vergleichsweise geringen Zersiedelung auf. Durch oftmals sehr große Abstände zwischen einzelnen Siedlungen verbleiben umfassende Flächen die für die Windenergie geeignet sind. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 10,3 % als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 2.109 km².

Weitere 175,2 km² entsprechend 0,85 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Damit ist Sachsen-Anhalt das Bundesland mit dem höchsten Anteil an Repoweringflächen, was den großen Bestand an Altanlagen widerspiegelt, die bis 2030 voraussichtlich das Ende Ihrer Nutzungsdauer erreichen werden.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit ist Sachsen-Anhalt praktisch nicht betroffen, lediglich 0,1 % der Landesfläche weisen eine mittlere Windgeschwindigkeit von < 6,5 m/s in 150 m über Grund (nach Global Wind Atlas) auf.

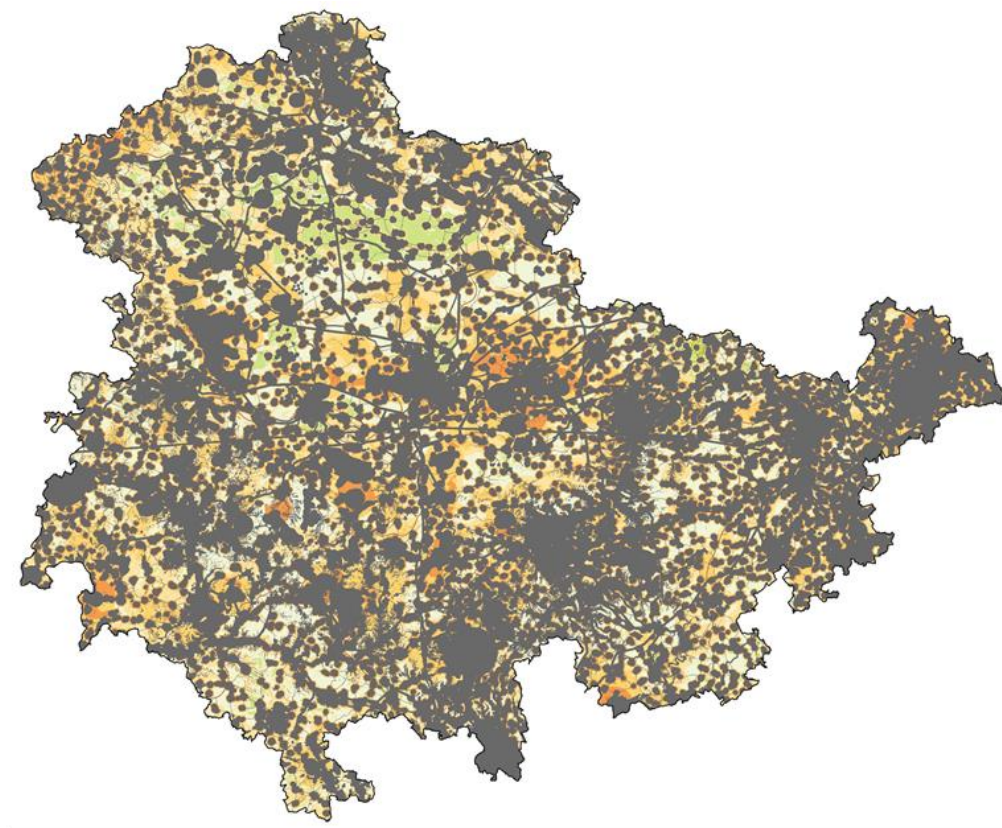
Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 5,8 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 36,3 GW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW beliefe sich die installierbare Leistung hingegen auf 70,3 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 5,5 GW Leistung installieren.

Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 7,1 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 13,7 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Sachsen-Anhalt eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.732 Volllaststunden, sodass sich aus 36,3 GW installierter Leistung durchschnittlich 99,1 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge aus 70,3 GW installierter Leistung auf 192,1 TWh. Weitere 14,5 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhen sich die Flächenpotenziale um 0,21 % der Landesfläche, bzw. um 43,3 km². Der Großteil (0,17 %) dieser Fläche ist auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen, da bereits bei einer Reduktion des Mindestabstands zu Industriegebieten einen Großteil dieses Effekts ausmacht. Weitere 0,04 % entstünden durch eine Öffnung der Industriegebietsflächen für die Windenergienutzung.

Thüringen (TH)



© GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 35: Kartendarstellung der Ausschlussflächen (grau) sowie der Raumbewertung für Thüringen.

In **Thüringen** sind 36,7 % der Landesfläche außerhalb der Ausschlussflächen, wobei diese Flächen überwiegend mit hohen Konfliktrisikoklassen bewertet wurden. Vergleichbar hohe Werte wurden für Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg ermittelt. Während Flächen mit Konfliktrisikowert 1 praktisch nicht vorkommen, machen mit KRW 2 bewertete Flächen 1,8 % der Landesfläche aus, was bundesweit der höchste Wert ist. Weiterhin sind 9,5 % der Flächen mit KRW 3 sowie 8,9 % bzw. 9,7 % mit KRW 4 und 5 bewertet. Aufgrund einer Hochstufung sich überlagernder hoher Bewertungen unterschiedlicher Schutzgutgruppen wurden 6,5 % der Landesfläche mit KRW 6 bewertet und tragen damit nicht zu den Potenzialflächen bei.

Grundsätzlich weist das Bundesland recht weite Flächen mit einer vergleichsweise geringen Zersiedelung auf. In den Planungsregionen Südwestthüringen und Ostthüringen liegen die verbleibenden Flächen überwiegend im Wald, während in Nordthüringen größere Ackerflächen mit niedrigem Konfliktrisiko (KRW 2) identifiziert wurden. Nach Anwendung der KRW-Faktoren auf Basis der Raumbewertung verbleiben noch 9,5 % als Potenzialfläche. Dies entspricht einer Fläche von 1.531 km².

Weitere 28,9 km² entsprechend 0,18 % der Landesfläche wurden als Repoweringflächen identifiziert, also Flächen, die nach Rückbau von Bestandsanlagen bis 2030 für ein Repowering von Windenergieanlagen geeignet sind. Dies ist ein eher unterdurchschnittlicher Wert, der den eher geringen bisherigen Ausbau der Windenergie bis 2010 widerspiegelt.

Von der Mindestwindgeschwindigkeit ist in Thüringen ein Flächenanteil von 6,9 % betroffen. Dieser Flächenanteil weist nach Global Wind Atlas eine mittlere Windgeschwindigkeit < 6,5 m/s in 150 m über Grund auf.

Auf den identifizierten Flächenpotenzialen wurde auf Basis der Anlagenplatzierung ein spezifischer Flächenbedarf von 5,8 ha/MW ermittelt. Hieraus folgt ein Leistungspotenzial für die Windenergienutzung von 26,5 GW. Bei einem angenommenen mittleren Flächenbedarf von 3 ha/MW beliefe sich die installierbare Leistung hingegen auf 51,1 GW. Auf den Repoweringflächen lassen sich zusätzliche 1,1 GW Leistung installieren.

Dem folgend ließen sich auf 2 % der Landesfläche anhand der Anlagenplatzierung 5,6 GW installieren, während nach Anwendung eines durchschnittlichen spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW ca. 10,8 GW möglich sind.

Die Modellierung liefert für die Standorte in Thüringen eine mittlere Auslastung in Höhe von 2.548 Volllaststunden, sodass sich aus 26,5 GW installierter Leistung durchschnittlich 67,6 TWh Ertrag erzielen ließen. Analog, bei Berücksichtigung eines spezifischen Flächenbedarfs von 3 ha/MW, belaufen sich die Erträge aus 51,0 GW installierter Leistung auf 130 TWh. Weitere 2,9 TWh Ertrag sind auf den Repoweringflächen möglich.

Bei einer vollständigen Öffnung der Industriegebiete für die Windenergienutzung erhöhen sich die Flächenpotenziale um 0,17 % der Landesfläche, bzw. um 43,3 km². Der Großteil (0,15 %) dieser Fläche ist auf Gebiete zurückzuführen, die an Industriegebiete grenzen, da bereits bei einer Reduktion des Mindestabstands zu Industriegebieten einen Großteil dieses Effekts ausmacht. Weitere 0,02 % entstünden durch eine Öffnung der Industriegebietsflächen für die Windenergienutzung.

6 Literatur

- [Stemmer et al. (in Veröffentlichung)]: Stemmer, B.; Peters, W.; Bernstein, F.; Schicketanz, S.; Thylmann, M. (in Veröffentlichung): Planspiel EE. Planspiel zur räumlichen Verteilung der erneuerbaren Energien-Anlagen in Beispielregionen: Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf Natur und Landschaft. BfN.
- [Bernotat & Dierschke 2016]: Bernotat, D.; Dierschke, V. (2016): Übergeordnete Kriterien zur Bewertung der Mortalität wildlebender Tiere im Rahmen von Projekten und Eingriffen. 3. Fassung.
- [BKG]: GeoBasis-DE / BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie).
- [BMWK 2022]: Bons, M.; Jakob, M.; Sach, T.; Klessmann, C.; Pape, C.; Zink, C.; Geiger, D.; Häckner, B.; Wegner, N.; Benz, S.; Peters, W.; Schicketanz, S.; Thylmann, M. (2022): Analyse der Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.
- [Bollmeyer et al. 2015]: Bollmeyer, C.; Keller, J. D.; Ohlwein, C.; Wahl, S.; Crewell, S.; Friederichs, P.; Hense, A.; Keune, J.; Kneifel, S.; Pscheidt, I.; Redl, S.; Steinke, S. (2015): Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain, Q. J. R. Meteorol. Soc., 141, 1–15, 2015, <https://doi.org/10.1002/qj.2486>.
- [Bons & Pape 2021]: Bons, M.; Pape, C. (2021): Gutachten Netzausbau und Regionalplanung. Studie im Auftrag des Ministeriums für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung Schleswig-Holstein. Guidehouse und Fraunhofer IEE, Oktober 2021.
- [Busch et al. 2017]: Busch, M.; Trautmann, S.; Gerlach, B. (2017): Overlap between breeding season distribution and wind farm risks: a spatial approach. VOGELWELT 137: 169–180 (2017).
- [BWE 2012]: Bofinger, B.; Callies, D.; Scheibe, M.; Saint-Drenan, Y.-M.; Spiekermann, R.; Rohrig, K. (2011): Studie zum Potenzial der Windenergienutzung an Land. Studies des Fraunhofer-Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik im Auftrag des Bundesverbands Windenergie BWE.
- [Gedeon et al. 2014]: Gedeon, K.; Grüneberg, C.; Mitschke, A.; Sudfeldt, C.; Eickhorst, W.; Fischer, S.; Flade, M.; Frick, S.; Geiersberger, I.; Koop, B.; Kramer, M.; Krüger, T.; Roth, N.; Ryslavy, T.; Stübing, S.; Sudmann, S. R.; Steffens, R.; Vökler, F.; Witt, K. (2014): Atlas Deutscher Brutvogelarten. Herausgegeben von der Stiftung Vogelmonitoring und dem Dachverband Deutscher Avifaunisten. Münster 2014.
- [ISE 2021]: Kost, C.; Shammugam, S.; Fluri, V.; Peper, D.; Memar, A.D., Schlegel, T. (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien, Juni 2021. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme.
- [Formulierungshilfe WaLG, 2022]: Entwurf der Formulierungshilfe für ein Wind-an-Land-Gesetz zur gesetzlichen Umsetzung des 2-Prozent-Flächenziels für die Windenergie an Land aus dem Koalitionsvertrag – Referentenentwurf des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. (<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/entwurf-einer->

formulierungshilfe-der-bundesregierung-wind-an-land-gesetz.pdf?__blob=publicationFile&v=4, abgerufen am 30.6.2022).

- [Kigle et al. 2022]: Kigle, S.; Jetter, F.; Ebner, M.; Schmid, T. (2022): 2 % der Landesfläche für Windenergie: ein geeignetes Maß? FfE Discussion Paper 2022-01. (<https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/ffe-discussion-paper-2-der-landesflaeche-fuer-wind-ein-geeignetes-mass/>, abgerufen am 12.6.2022).
- [Norgaard & Holtinnen, 2004]: Norgaard P.; Holttinen H. (2004): A Multi-Turbine Power Curve Approach. Proceedings of Nordic Wind Power Conference, Gothenburg, 1-2 March 2004, pp. 1-5.
- [Riedl et al. 2020]: Riedl, U.; Stemmer, B.; Philipper, S.; Peters, W.; Schicketanz, S.; Thylmann, M.; Pape, C.; Gauglitz, P.; Mülder, J.; Westarp, C.; Moczek, N. (2020): Szenarien für den Ausbau der erneuerbaren Energien aus Naturschutzsicht. BfN-Skripten 570.
- [Thiele et al. 2021]: Thiele, J.; Wiehe, J.; Gauglitz, P.; Pape, C. et al. (2021): Konkretisierung von Ansatzpunkten einer naturverträglichen Ausgestaltung der Energiewende, mit Blick auf strategische Stellschrauben. "Naturverträgliche Ausgestaltung der Energiewende" (EE100-konkret). BfN-Skripten 614.
- [UBA 2019]: Bons, M.; Döring, M.; Klessmann, C. et al. (2019): Analyse der kurz- und mittelfristigen Verfügbarkeit von Flächen für die Windenergienutzung an Land. Studie von Guidehouse und Fraunhofer IEE für das Umweltbundesamt.
- [UBA 2021]: Umweltbundesamt – Nationales Treibhausgasinventar 2021, 12/2020; Presseinformation 07/2021 vom 15.3.2021 (<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#f-gase-und-losemittel>, abgerufen am 24.7.2022)
- [UBA 2022]: Bons, M.; Sach, T.; Pape, C.; Wegner (2022): Auswirkungen einer Rotor-in-Planung auf die Verfügbarkeit von Windflächen. (<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/auswirkungen-einer-rotor-in-planung-auf-die>, abgerufen am 19.9.2022)
- [UBA (in Veröffentlichung)]: Bons, M.; Jakob, M.; Sach, T.; Pape, C.; Zink, C.; Geiger, D.; Wegner, N.; Boinski, O.; Benz, S. (in Veröffentlichung): Flächenverfügbarkeit und Flächenbedarfe für den Ausbau der Windenergie an Land. Studie im Auftrag des Umweltbundesamts.
- [ZENSUS2011 2012]: ZENSUS2011 - Bevölkerungs- und Wohnungszählung 2011. (https://www.zensus2011.de/DE/Home/home_node.html, zuletzt aktualisiert 19.08.2012, abgerufen am 25.07.2011)