

IMPULSPAPIER

Baden-Württembergs Beitrag zur Windenergie-Komplementarität in Deutschland

Maike Schmidt · Dirk Schindler · Almut Arneth · Sven Kesselring · Martin Pehnt

STAND

30.11.2025



KLIMA-SACHVERSTÄNDIGENRAT
BADEN-WÜRTTEMBERG

IMPRESSUM

Klima-Sachverständigenrat Baden-Württemberg
z. Hd. Geschäftsstelle
Kernerplatz 9
70182 Stuttgart
klima-sachverstaendigenrat@um.bwl.de

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

KLIMA-SACHVERSTÄNDIGENRAT

Dipl.-Ing. Maike Schmidt (Vorsitzende)

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Meitnerstr. 1, 70563 Stuttgart

E-Mail: maike.schmidt@zsw-bw.de

Telefon: +49 711 78 70-250

Professor Dr. Dirk Schindler (Stellvertretender Vorsitzender)

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Werthmannstrasse 10, 79085 Freiburg

E-Mail: dirk.schindler@meteo.uni-freiburg.de

Telefon: +49 761 203 3588

Professor Dr. Almut Arneth

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kreuzeckbahnstraße 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen

E-Mail: almut.arneth@kit.edu

Telefon: +49 8821 183-131

Professor Dr. Sven Kesselring

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU)

Parkstraße 4, 73312 Geislingen

E-Mail: sven.kesselring@hfwu.de

Telefon: +49 7331 22525

Professor Dr. Martin Pehnt

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu)

Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg

E-Mail: martin.pehnt@ifeu.de

Telefon: +49 6221 4767 0

Diese Stellungnahme beruht auch auf der sachkundigen und engagierten Arbeit unserer wissenschaftlichen Mitarbeiter:

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW): **Patrick Wolf**

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: **Dr. Christopher Jung**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT): **Tobias Laimer**

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU): **Rafael Labanino**

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu): **Yanik Acker**

Zusammenfassung

Baden-Württemberg hat sich mit dem Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz (Klimagesetz Baden-Württemberg – KlimaG BW) dazu verpflichtet, bis 2040 netto-treibhausgasneutral zu werden. Dafür muss die Stromerzeugung nahezu vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Neben der Photovoltaik spielt dabei die Windenergie die zentrale Rolle. Damit die Versorgungssicherheit auch mit sehr hohen Anteilen von Wind- und Solarenergie gesichert werden kann, muss der Ausbau beider Energieträger im Land noch erheblich gesteigert werden.

Das Windenergieflächenbedarfsgesetz (WindBG) schreibt vor, dass 1,8 Prozent der Landesfläche für Windenergie ausgewiesen werden müssen. Damit soll nicht nur das baden-württembergische, sondern auch das gesamtdeutsche Ausbauziel erreicht werden. Gleichzeitig soll diese Vorgabe für eine gerechte Verteilung der Windenergieanlagen zwischen den Bundesländern sorgen. Baden-Württemberg hat die Vorgabe von 1,8 Prozent der Landesfläche in das KlimaG BW übernommen und eine relative Gleichverteilung über die zwölf Regionen vorgesehen.

Die Windverhältnisse in Deutschland zeigen eine ausgeprägte räumliche und zeitliche Variabilität. Im Norden tritt durch die Nähe zur Küste im Mittel eine höhere Windgeschwindigkeit auf. Im Süden, insbesondere in Baden-Württemberg, treten dagegen häufig günstige Windbedingungen zu Zeiten auf, in denen der Norden ein schwächeres Windaufkommen verzeichnet. Durch dieses wechselseitige Muster kann sich die Verfügbarkeit von Windenergie zwischen verschiedenen Regionen Deutschlands ergänzen, was als Komplementarität bezeichnet wird. Trotz geringerer mittlerer Windgeschwindigkeit und damit geringerer mittlerer gekappter Windleistungsdichte leistet Baden-Württemberg damit einen wichtigen Beitrag zur komplementären Nutzbarkeit von Windenergie. Besonders im Schwarzwald und in der Region Bodensee-Oberschwaben treten Windverhältnisse auf, die dazu beitragen können, Schwankungen in der Windstromerzeugung anderer Regionen Deutschlands auszugleichen.

Der Ausbau der Windenergie in Baden-Württemberg ist somit nicht nur ein Beitrag zum Klimaschutz, sondern auch ein wichtiger Baustein für ein faires und solidarisches Energiesystem in ganz Deutschland. Er ergänzt die starke Solarstromerzeugung im Land, erhöht die Versorgungssicherheit und reduziert den Bedarf an Redispatch-Maßnahmen und Netzausbau.

Damit diese Potenziale nicht nur für den Klimaschutz in Baden-Württemberg, sondern auch zugunsten der Versorgungssicherheit in Deutschland genutzt werden können, ist es entscheidend, den geplanten Windenergieausbau konsequent voranzutreiben – so wie es die im Dashboard Windenergie für die kommenden Jahre verzeichneten Genehmigungsanträge erwarten lassen. Bürgerinnen und Bürger, Politik und Verwaltung müssen den eingeschlagenen Weg gemeinsam mit Nachdruck weiterverfolgen. Dazu gehört auch, auf Bundesebene politischen Einfluss zu nehmen, um zu verhindern, dass Änderungen am Förderregime den Windenergieausbau in Baden-Württemberg ausbremsen oder gar ganz verhindern. Nur mit einem konsequent verfolgten, ambitionierten Ausbaupfad kann Baden-Württemberg einen bedeutenden Beitrag zur Energiewende leisten und die Grundlage für eine sichere, klimafreundliche Energieversorgung in Deutschland schaffen – eine Grundvoraussetzung um Baden-Württemberg als Industrieland zu erhalten.

1 Einleitung

Baden-Württemberg hat sich gesetzlich verpflichtet, bis 2040 netto-treibhausgasneutral zu werden [KlimaG BW, 2023]. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die Stromversorgung nahezu vollständig auf Basis erneuerbarer Energien erfolgen [UM, 2024]. Einen entscheidenden Beitrag zur Deckung des zukünftigen Strom- und Energiebedarfs sollen Wind- und Sonnenenergie leisten. Dafür muss die installierte Leistung von Windenergie- und Photovoltaikanlagen im Land in den kommenden Jahren weiter deutlich erhöht werden.

Zur Gewährleistung einer gerechten und ausgewogenen Verteilung von Windenergieanlagen schreibt das WindBG für Baden-Württemberg einen verbindlichen Flächenbeitragswert von 1,8 Prozent der Landesfläche für den Ausbau der Windenergie vor [WindBG, 2023]. Damit soll sichergestellt werden, dass die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) festgelegten Ausbaupfade erreicht werden [EEG, 2023]. Das KlimaG BW überträgt diesen Flächenbeitragswert auf die zwölf Regionen und erweitert diesen um Photovoltaik-Freiflächenanlagen, um eine faire Lastenverteilung zu gewährleisten [KlimaG BW, 2023].

Die Nutzung der Windenergie in Baden-Württemberg wird weiterhin kontrovers diskutiert. Ein zentrales Argument gegen den Ausbau ist die im Vergleich zu den küstennahen Regionen Norddeutschlands geringere Windhöffigkeit. Zwar trifft dieses Argument grundsätzlich zu, doch wird es durch die technologische Entwicklung zunehmend relativiert. Vor allem die heute möglichen Nabenhöhen von bis zu 175 Metern sowie moderne Schwachwindanlagen, mit längeren Rotorblättern und einer angepassten spezifischen Flächenleistung (Generatorleistung pro Quadratmeter Rotorkreisfläche), ermöglichen es, auch in Baden-Württemberg Standorte mit ausreichend hoher und relativ konstanter Windgeschwindigkeit wirtschaftlich zu erschließen.

Auch wenn die Stromerzeugung aus Windenergie in Baden-Württemberg spezifisch teurer bleibt als an anderen Standorten, sprechen mehrere systemorientierte Aspekte für ihren Ausbau. Dazu zählen insbesondere die mögliche Reduktion von Netzüberlastungen und der damit verbundenen Redispatch-Maßnahmen. Derzeit müssen Windenergieanlagen in Norddeutschland häufig abgeregelt werden, während in Süddeutschland gleichzeitig konventionelle Kraftwerke hochgefahren werden, um die Netzstabilität zu sichern. Zudem kann mehr Windenergie in Süddeutschland den Bedarf an neuen Übertragungsleitungen von Nord nach Süd begrenzen. Beides, weniger Netzausbau und ein geringerer Redispatch-Bedarf, wirkt langfristig dämpfend auf die Netzentgelte.

Damit rücken Fragen nach der räumlichen Verfügbarkeit und zeitlichen Dynamik von Windenergie in den Fokus. Ein wesentliches Kennzeichen der Windenergie ist ihre raumzeitlich variable Verfügbarkeit, die zu Schwankungen in der Stromerzeugung führt [Marquis et al., 2011]. Diese Variabilität wird durch großräumige atmosphärische Strömungen verursacht, die von regionalen und lokalen Zirkulationen überlagert werden. In Europa prägt die nordhemisphärische Westwinddrift die großräumigen Windverhältnisse mit einem ausgeprägten Jahresgang. Im Winter treten die höchsten Windgeschwindigkeitswerte auf, im Sommer sind sie deutlich geringer [Schindler et al., 2021].

Da häufig mehrere Wetterlagen gleichzeitig auf Mitteleuropa wirken, entstehen regional unterschiedliche Windenergieverfügbarkeiten. Neben dem Jahresgang zählen Wetterlagen daher zu den wichtigsten Einflussfaktoren auf die zeitliche und räumliche Variabilität der Windressourcen

[Mockert et al., 2023]. Sie bestimmen nicht nur kurzfristige Schwankungen der Windgeschwindigkeit, sondern modulieren auch deren saisonalen Verlauf.

Die raumzeitliche Variabilität atmosphärischer Strömungen führt dazu, dass Windenergie in Deutschland nicht überall und zu jeder Zeit in gleichem Maße nutzbar ist. Während großräumige Wettersysteme und der Jahresgang die saisonale Verfügbarkeit bestimmen, können regionale Zirkulationen diese Muster zeitweise überlagern und lokal die Windenergienutzung verbessern.

Flauten bilden einen wichtigen Teil dieser Variabilität. Sie bezeichnen Zeiträume, in denen die Windstromerzeugung über mehrere Stunden, Tage oder Wochen hinweg und über größere Regionen deutlich unter dem Durchschnitt liegt. Auf Bundesebene (BRD) treten solche Flauten seltener und kürzer auf als in den einzelnen Bundesländern (Abbildung 1), da sich regionale Defizite im bundesweiten Mittel teilweise ausgleichen. Daraus lässt sich schließen, dass auf dem gesamten Bundesgebiet Windenergieanlagen errichtet werden müssen, um das Auftreten von Flauten zu reduzieren.

In dieser Studie werden Flauten über die gekappte Windleistungsdichte an den Standorten der Windenergieanlagen definiert. Die gekappte Windleistungsdichte, hier mit WPD_{kapp} bezeichnet, ist eine aus der Windgeschwindigkeit abgeleitete Leistungsdichte (in Watt pro Quadratmeter, W/m^2), die auf den Betriebsbereich typischer Windenergieanlagen begrenzt wird. Berücksichtigt werden nur Windgeschwindigkeiten zwischen einer Anlaufgeschwindigkeit von 3 m/s und einer Nenngeschwindigkeit von 12 m/s, ab der eine typische Anlage Volllast erreicht.

Bei einer Definition von Flauten als Zeiträume, in denen die WPD_{kapp} unter $65 W/m^2$ (20. Perzentil der Verteilung) liegt, zeigen die Jahre 2015 bis 2024, dass in Nordrhein-Westfalen (NW), Bayern (BY), Rheinland-Pfalz (RP), Hessen (HE) und Baden-Württemberg (BW) häufiger und länger andauernde Flauten auftraten als im Bundesdurchschnitt (Abbildung 1a). Dagegen verzeichneten Niedersachsen (NI), Schleswig-Holstein (SH) und das Saarland (SL) zwar mehr, jedoch kürzere Flauten.

Werden stärker ausgeprägte Flauten mit $25 W/m^2$ (5. Perzentil der Verteilung) betrachtet, zeigt sich, dass die Windressource auf Länderebene deutlich volatiler ist als im bundesweiten Durchschnitt (Abbildung 1b). Da diese Flauten in den Bundesländern zeitlich versetzt auftreten, können sich Regionen gegenseitig ausgleichen, beispielsweise, wenn süddeutsche Windenergieanlagen Phasen geringer Windstromerzeugung im Norden kompensieren und umgekehrt.

Mit dem fortschreitenden Klimawandel ist zu erwarten, dass sich Häufigkeit und Dauer solcher Flauten verändern [Jung und Schindler, 2025]. Daher ist es entscheidend, die raumzeitliche Variabilität der Windenergie sowohl auf Bundes- als auch auf Länderebene in den Blick zu nehmen, um Strategien für eine resiliente und ausgewogene erneuerbare Energieversorgung in Deutschland zu entwickeln.

Aus dieser räumlich und zeitlich ungleichmäßigen Windverfügbarkeit ergibt sich die Möglichkeit, Windenergie über größere Regionen hinweg ergänzend zu nutzen, wodurch raumzeitliche Schwankungen der erneuerbaren Stromversorgung abgeschwächt werden können [Hart et al., 2012].

Wenn in einer Region wenig Windenergie zur Stromerzeugung verfügbar ist, kann in einer anderen, komplementären Region durch eine höhere Windverfügbarkeit der Stromertrag, zumindest teilweise, ausgeglichen werden.

Es lassen sich verschiedene Formen der Komplementarität unterscheiden [Jurasz et al., 2020]:

- Räumliche Komplementarität ergibt sich daraus, dass verschiedene Regionen und Standorte über unterschiedlich produktive Windressourcen verfügen.
- Zeitliche Komplementarität bezieht sich auf Unterschiede in der Windenergieverfügbarkeit innerhalb von Zeiträumen wie Minuten, Stunden, Tagen, mehreren Tagen oder Jahreszeiten.
- Werden räumliche und zeitliche Komplementarität gemeinsam betrachtet, spricht man von raumzeitlicher Komplementarität.

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden dargestellt, welchen Beitrag Baden-Württemberg zur komplementären Windenergienutzung in Deutschland leisten kann. Der Beitrag des Landes wird abgeleitet aus

- den Eigenschaften der Windressource in Deutschland, beschrieben über WPD_{kapp} an Windenergieanlagenstandorten,
- dem geplanten Windenergieausbau, der im baden-württembergischen Dashboard Windenergie und im Marktstammdatenregister dokumentiert ist.

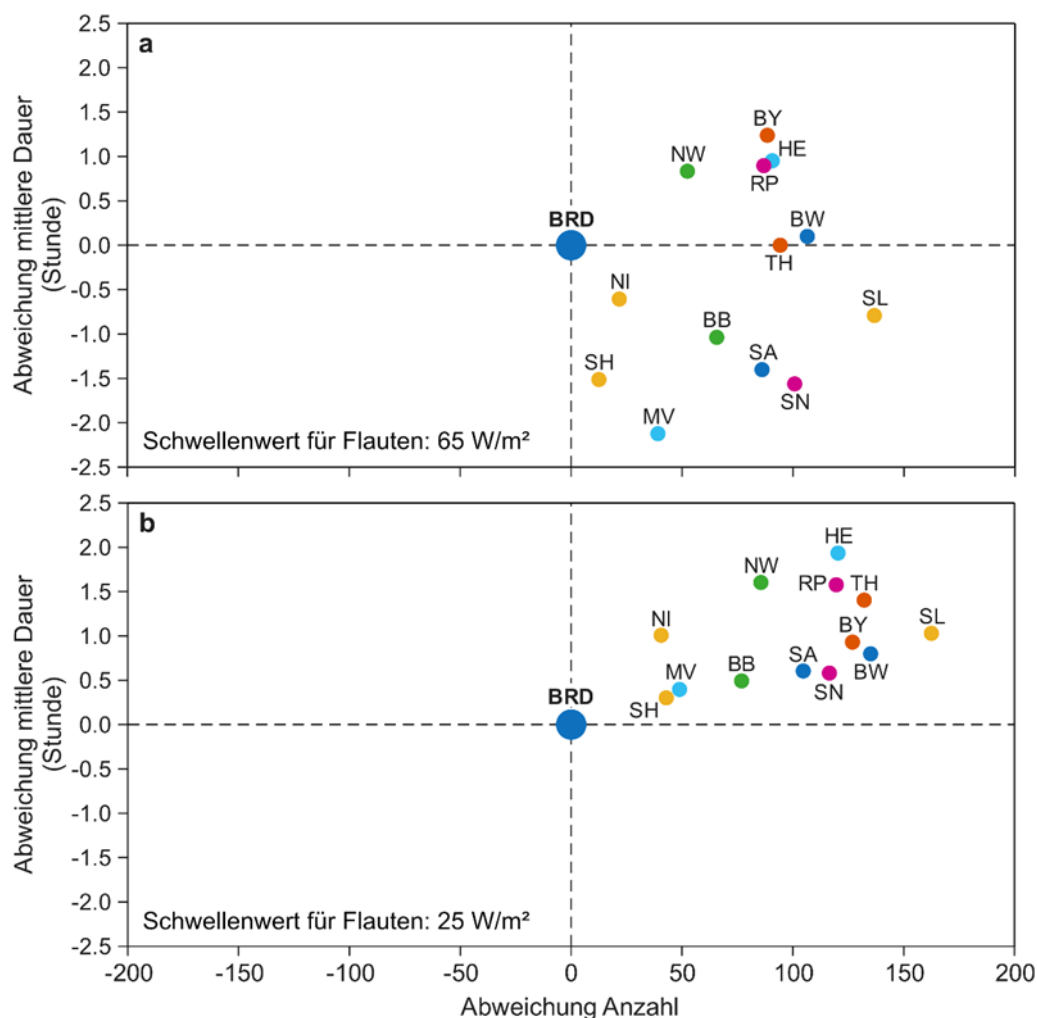


Abbildung 1: Abweichung der Dauer und Anzahl von Flauten in den Bundesländern vom Bundesdurchschnitt (BRD) pro Jahr bei einer Flautendefinition auf der Grundlage der gekappten Windleistungsdichte von (a) 65 W/m² (20. Perzentil), (b) 25 W/m² (5. Perzentil) 2015 bis 2024 in Deutschland ohne Berlin, Bremen und Hamburg. Abkürzungen der Bundesländer sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Da WPD_{kapp} in Baden-Württemberg aufgrund seiner küstenfernen Lage im Südwesten Deutschlands grundsätzlich geringer als im Norden Deutschlands ist, liegt der Schwerpunkt der Analyse auf Situationen, in denen der natürliche Windressourcengradient von der Küste landeinwärts weitgehend aufgehoben ist und sich die Windressourcenverfügbarkeit in Deutschland stärker regional ausdifferenziert.

Die methodischen Details, die Herleitung von WPD_{kapp} , die Zerlegung in raumzeitliche Grundmuster (Komponenten K_1 bis K_6) mithilfe der Singulärwertzerlegung (SVD) und die Definition von Aktivitätsanteilen und Komplementaritätsbeiträgen, werden in Kapitel 4 erläutert.

2 Beiträge zur Windenergienutzung in Deutschland

2.1 Mittlere Beiträge

Die Analyse basiert auf den Standorten von insgesamt 35.646 Windenergieanlagen in Deutschland. Dazu gehören sowohl bestehende Anlagen als auch Anlagen, deren Status in den zugrunde liegenden Datenquellen als „In Planung“ geführt wird. Die Anlagenstandorte sind ungleich über Deutschland verteilt. Die höchste Standortdichte findet sich im Nordwesten und Westen Deutschlands, mit abnehmender Dichte in Richtung Osten und Süden (Abbildung 2a).

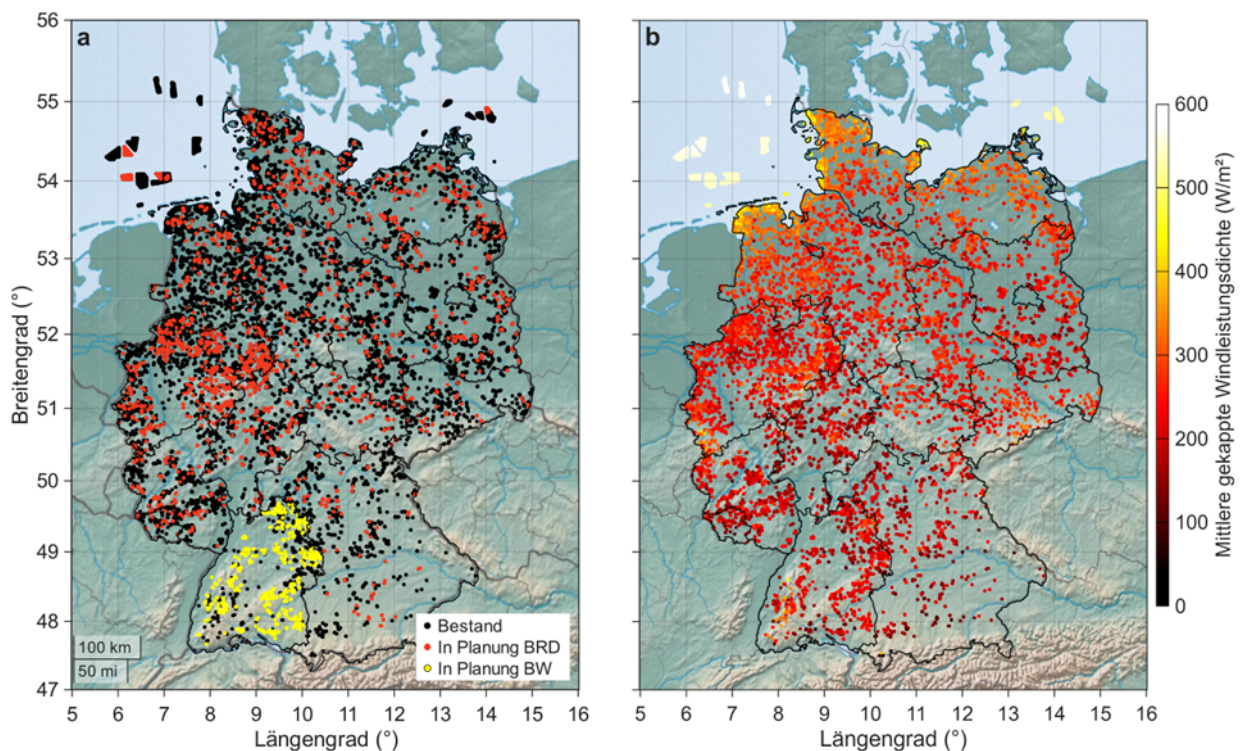


Abbildung 2: (a) Standorte von Bestandswindenergieanlagenstandorten (schwarze Punkte), Standorte, deren Status im Marktstammdatenregister „In Planung“ ist (rote Punkte), Standorte des „Dashboard Windenergie“, deren Status „Windenergieanlagen in Planung“ ist (gelbe Punkte), (b) modellierte mittlere gekappte Windleistungsdichte (WPD_{kapp}) an 35.646 Windenergieanlagenstandorten 2015 bis 2024 in Deutschland (W/m^2).

Die mittlere gekappte Windleistungsdichte der Jahre 2015 bis 2024 ist an den Offshore-Standorten in der Nord- und Ostsee am höchsten, mit Werten von bis zu 575 W/m². Diese hohen Werte gehen mit hohen mittleren Windgeschwindigkeiten über der See einher. Weiter im Landesinneren nehmen die Mittelwerte von WPD_{kapp} mit wachsender Distanz zur Küste und zunehmender Rauigkeit der Erdoberfläche ab, sodass im Binnenland mittlere Werte bis zu etwa 40 W/m² auftreten. In Höhenlagen, insbesondere in Mittelgebirgen, erreichen Binnenlandstandorte ähnlich hohe mittlere WPD_{kapp} -Werte wie küstennahe Regionen (Abbildung 2b).

Den höchsten Anteil an den Onshore-Standorten weist Niedersachsen mit 19,2 % auf (Tabelle 1). In Nordrhein-Westfalen befinden sich 14,0 %, in Brandenburg 12,4 % und in Schleswig-Holstein 10,1 % der Onshore-Standorte. Der Anteil der Windenergieanlagenstandorte, die Baden-Württemberg zugeordnet werden, beträgt 4,4 %. In den Stadtstaaten Bremen, Hamburg und Berlin ist die Zahl der Windenergieanlagen deutlich geringer.

Tabelle 1: Sortierte Aufstellung von Bundesländern und Offshore-Windparks nach ihrem Anteil an der Gesamtzahl untersuchter Windenergieanlagenstandorte sowie ihrem Anteil an der Varianz der analysierten Matrix der gekappten Windleistungsdichte (WPD_{kapp}) 2015 bis 2024 in Deutschland (%).

Rang	Bundesland	Abkürzung Bundesland	Standortanteil (%)	Varianzanteil (%)
1	Niedersachsen	NI	19,2	19,9
2	Nordrhein-Westfalen	NW	14,0	12,4
3	Brandenburg	BB	12,4	9,4
4	Schleswig-Holstein	SH	10,1	13,3
5	Sachsen-Anhalt	ST	8,1	7,1
6	Mecklenburg-Vorpommern	MV	6,3	6,8
7	Rheinland-Pfalz	RP	5,5	3,9
8	Offshore-Parks	Off	5,3	13,9
9	Baden-Württemberg	BW	4,4	2,9
10	Hessen	HE	4,2	2,6
11	Bayern	BY	3,7	2,0
12	Thüringen	TH	3,0	2,7
13	Sachsen	SN	2,6	2,4
14	Saarland	SL	0,7	0,4
15	Bremen	HB	0,2	0,2
16	Hamburg	HH	0,2	0,1
17	Berlin	BE	0,0	0,0

Neben der Standortzahl ist entscheidend, wie stark die Standorte zur Gesamtvariabilität der gekappten Windleistungsdichte beitragen. Dieser Beitrag wird über die Varianz der WPD_{kapp} -Werte beschrieben. Für jedes Bundesland und die Offshore-Gebiete kann er als prozentualer Anteil an der Gesamtvarianz der WPD_{kapp} -Matrix angegeben werden. Die größten Beiträge liefern Niedersachsen (19,9 %), die Offshore-Windparks (13,9 %), Schleswig-Holstein (13,3 %) und Nordrhein-Westfalen

(12,4 %). Diese hohen Anteile spiegeln die höhere mittlere Windgeschwindigkeit über der Nord- und Ostsee und in Küstennähe sowie die große Anzahl von Standorten wider. Baden-Württemberg trägt 2,9 % zur Gesamtvarianz bei. Aufgrund der geringeren mittleren WPD_{kapp} -Werte und der niedrigeren Standortzahl ist der Beitrag zur Varianz der Windressource kleiner als in den nördlichen Bundesländern, aber nicht vernachlässigbar.

2.2 Raumzeitliche Grundmuster

Um die Variabilität der Windressource in Deutschland besser zu verstehen, wird WPD_{kapp} in raumzeitliche Grundmuster zerlegt. Diese Grundmuster werden als Komponenten K_1 bis K_6 bezeichnet. Mathematisch ergeben sie sich aus einer Singulärwertzerlegung (SVD) der WPD_{kapp} -Matrix.

Für die Interpretation K_1 bis K_6 ist wichtig:

- Jede Komponente beschreibt ein charakteristisches raumzeitliches WPD_{kapp} -Muster in Deutschland.
- K_1 stellt das dominante Grundmuster dar und kann als großräumiges „Basisniveau“ der Windressource verstanden werden.
- K_2 bis K_6 zeigen Abweichungen vom Basisniveau. Sie verstärken K_1 in bestimmten Situationen (positive Beiträge) oder schwächen es in anderen Situationen ab (negative Beiträge). Solche Abweichungen entstehen durch wechselnde Wetterlagen, regionale Druckverteilungen oder Reliefinflüsse.

Für jede Komponente lässt sich angeben, wie groß ihr Beitrag zur Gesamtvariabilität der Windressource ist. Dieser relative Anteil an der Gesamtvarianz wird mit EV_k bezeichnet. Die Summe aller EV_k entspricht 100 % der Varianz der WPD_{kapp} -Matrix.

Die Analyse zeigt, dass K_1 mit $EV_1 = 87,2$ % den mit Abstand größten Teil der Varianz erklärt. Damit dominiert K_1 das WPD_{kapp} -Muster in ganz Deutschland. Die Komponenten K_2 bis K_6 erklären zusammen 12,8 % der Varianz. Ihre Einzelbeiträge belaufen sich auf $EV_2 = 5,6$ %, $EV_3 = 3,6$ %, $EV_4 = 1,8$ %, $EV_5 = 1,1$ % und $EV_6 = 0,8$ %. Sie sind damit deutlich weniger dominant als K_1 , aber entscheidend, wenn es darum geht, komplementäre Windverhältnisse zu identifizieren.

In der Komponente K_1 weisen die baden-württembergischen Windenergieanlagenstandorte einen mittleren WPD_{kapp} -Wert von 204 W/m² auf (Abbildung 3a). Die höchsten mittleren WPD_{kapp} -Werte in K_1 werden den küstennahen Bundesländern Schleswig-Holstein (331 W/m²), Niedersachsen (301 W/m²) und Mecklenburg-Vorpommern (298 W/m²) zugeordnet.

In den Komponenten K_2 (Abbildung 3b) bis K_6 (Abbildung 3f) ändert sich die Reihung der Bundesländer hinsichtlich der mittleren WPD_{kapp} -Beiträge. Insbesondere in K_2 und K_4 nimmt die Bedeutung Baden-Württembergs zu. In K_2 liegt der mittlere Beitrag Baden-Württembergs (41 W/m²) knapp hinter Rheinland-Pfalz und dem Saarland (jeweils 42 W/m²). In K_4 liefert Baden-Württemberg im Mittel den größten Beitrag (31 W/m²). In K_3 und K_5 sind die baden-württembergischen Beiträge jeweils geringer.

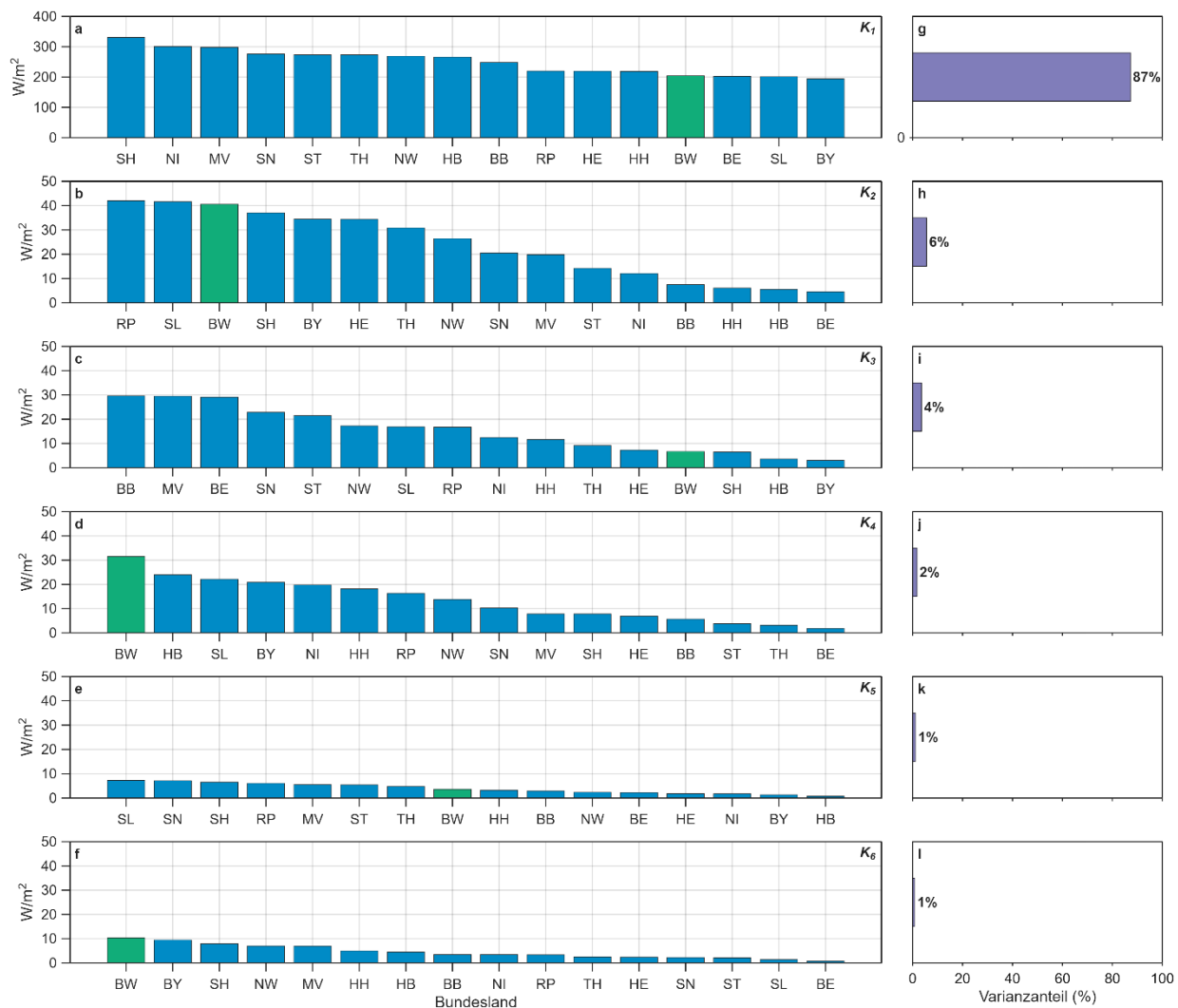


Abbildung 3: Beiträge zur gekappten Windleistungsdichte (WPD_{kapp}) der Onshore-Windenergieanlagenstandorte in den Bundesländern in den Komponenten (a) K_1 bis (f) K_6 (W/m^2). Die Teilabbildungen (g) bis (l) zeigen die Anteile von K_1 bis K_6 an der Gesamtvarianz der WPD_{kapp} -Matrix (%). Die Kürzel der Bundesländer sind in Tabelle 1 aufgeführt.

2.3 Aktivitätsanteil und Komplementaritätsbeitrag

Um zu bewerten, wie stark ein Standort zur komplementären Windenergienutzung beiträgt, werden zwei abgeleitete Größen eingeführt:

- Der Aktivitätsanteil eines Windenergieanlagenstandorts beschreibt, wie häufig die Komponenten K_2 bis K_6 an diesem Standort besonders stark ausgeprägt sind. Die Komponenten K_2 bis K_6 gelten an einem Standort als „aktiv“, wenn ihre Stärke (bzw. ihr Beitrag zur WPD_{kapp}) zu den oberen 20 % aller Werte dieser Komponente gehört. Aus der Häufigkeit dieser aktiven Phasen ergibt sich der Aktivitätsanteil.
- Der Komplementaritätsbeitrag eines Standorts bestimmt, wie stark K_2 bis K_6 zusätzliche gekappte Windleistungsdichte bereitstellen, wenn das Basisniveau K_1 gering ist. Dazu werden Zeitpunkte betrachtet, an denen der Beitrag von K_1 zu den unteren 30 % seiner Werte gehört. In diesen

Situationen werden die positiven Beiträge von K_2 bis K_6 aufsummiert. Der resultierende Komplementaritätsbeitrag (in W/m^2) gibt an, wie viel Zusatzleistung in Phasen geringen Basisniveaus K_1 durch die Modulationskomponenten bereitgestellt wird.

Die räumliche Verteilung dieser Größen zeigt, dass an allen Windenergieanlagenstandorten in Deutschland zunächst die raumzeitliche Ausprägung von K_1 das WPD_{kapp} -Muster dominiert und damit die Verfügbarkeit des Basisniveaus von Windenergie bestimmt (Abbildung 4a).

Werden jedoch die positiven Abweichungen von K_2 bis K_6 betrachtet, ergibt sich ein deutlich differenzierteres Bild. Die höchsten positiven Abweichungen vom K_1 -Muster, und damit die größten Potenziale für komplementäre Beiträge, treten im Saarland, in Rheinland-Pfalz, in Baden-Württemberg und in Teilen Bayerns auf (Abbildung 4b). Diese Standorte sind in besonderem Maße in der Lage, windarme Phasen in anderen Regionen Deutschlands abzufedern.

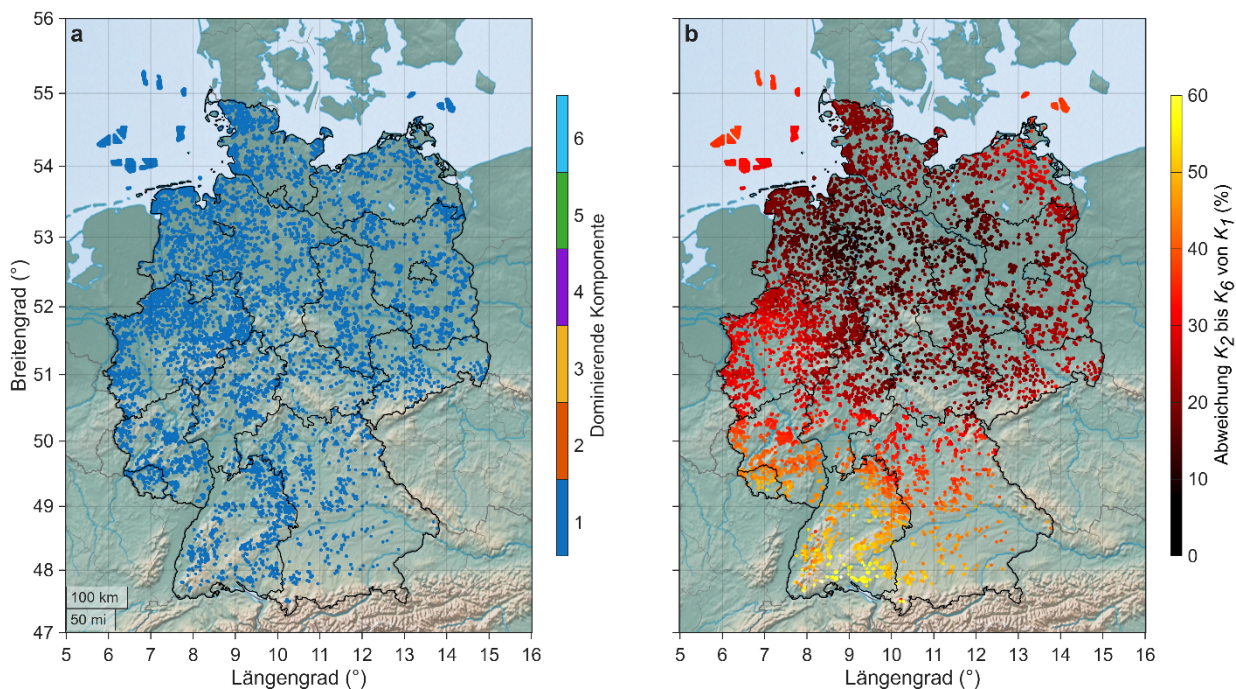


Abbildung 4: (a) Dominante SVD-Komponente an den untersuchten Windenergieanlagenstandorten, (b) Stärke der Abweichung der Komponenten K_2 bis K_6 vom dominanten K_1 -Muster (%).

Die Standorte, die besonders häufig starke Abweichungen von K_1 aufweisen, liegen in der Nord- und Ostsee, in den küstennahen Regionen landeinwärts sowie im Südwesten Deutschlands. In Baden-Württemberg gehören insbesondere Standorte im Schwarzwald, auf der Schwäbischen Alb und in der Region Bodensee-Oberschwaben zu den Standorten mit hohem Aktivitätsanteil (Abbildung 5a).

In der Region zwischen dem 51. und 54. Breitengrad, in der sich die meisten Windenergieanlagenstandorte Deutschlands befinden, ist der Aktivitätsanteil dagegen am geringsten. Die geringen Aktivitätsanteile und die geringen Abweichungen von K_1 lassen den Schluss zu, dass dort die geringsten Komplementaritätsbeiträge erzielt werden können und neue Windenergieanlagenstandorte vor allem die räumliche Ausprägung des K_1 -Musters verstärken (Abbildung 5b). Die insgesamt kompletärsten Standorte befinden sich offshore in der Nord- und Ostsee. Sie liefern rund 45 % des gesamten Komplementaritätsbeitrags. Die kompletärsten Onshore-Standorte befinden sich in

den nordöstlichen und südwestlichen Grenzgebieten Deutschlands sowie im Schwarzwald, auf der Schwäbischen Alb und im Südosten Baden-Württembergs.

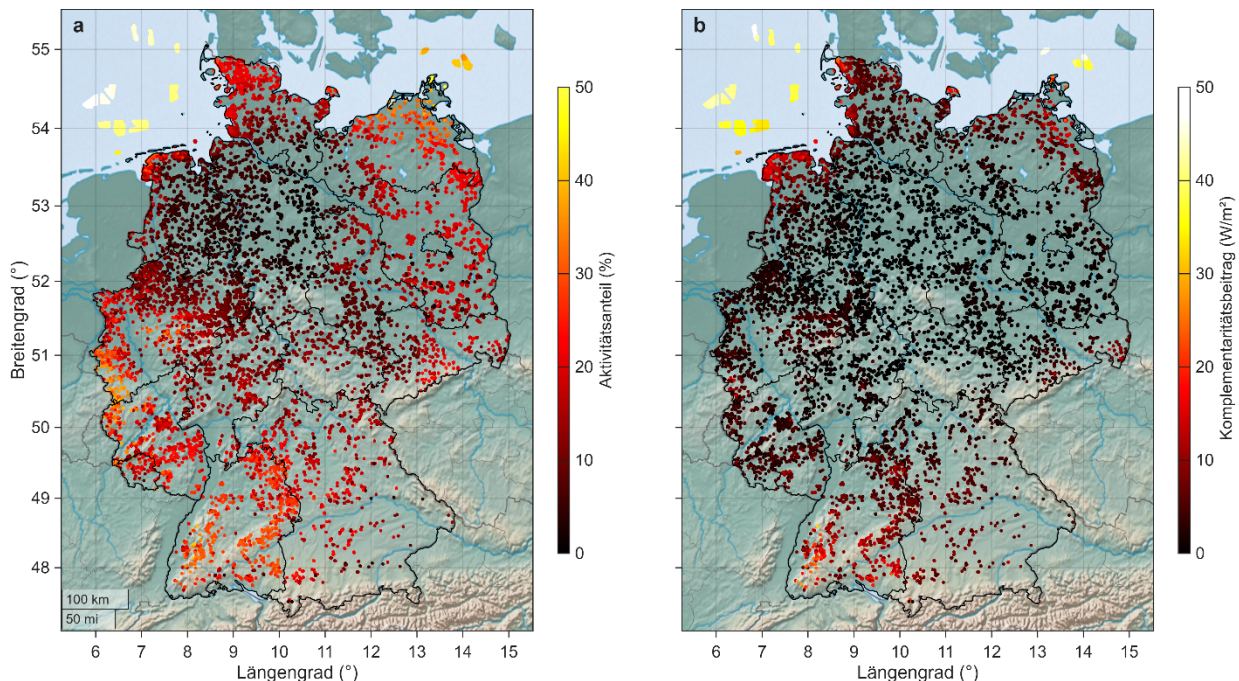


Abbildung 5: (a) Aktivitätsanteil (%), der angibt, welche Windenergieanlagenstandorte in den Komponenten K_2 bis K_6 häufig vom dominanten K_1 -Muster abweichen, (b) phasengleicher Komplementaritätsbeitrag (W/m^2) der Komponenten K_2 bis K_6 , wenn K_1 schwach ausgeprägt ist.

Summiert man die Komplementaritätsbeiträge der Windenergieanlagenstandorte auf Ebene der Bundesländer, stammen, aufgrund der Kombination aus hoher Standortzahl und hoher Windgeschwindigkeitswerte, 11,3 % des gesamten Onshore-Komplementaritätsbeitrags aus Schleswig-Holstein und 9,2 % aus Niedersachsen (Abbildung 6). Der dritthöchste Anteil stammt aus Baden-Württemberg (8,6 %), obwohl das Land nur 4,4 % der Standorte stellt. Damit leistet Baden-Württemberg einen überproportionalen Beitrag zur komplementären Nutzung von Windenergie.

3 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Aus der Analyse lässt sich schließen, dass Baden-Württemberg trotz seiner vergleichsweise geringen mittleren Windressourcenverfügbarkeit einen wichtigen Beitrag zur komplementären Windenergienutzung in Deutschland leisten kann. Die raumzeitlichen Muster der gekappten Windleistungsdichte und die aus den Komponenten K_1 bis K_6 abgeleiteten Aktivitätsanteile und Komplementaritätsbeiträge zeigen, dass Standorte im Südwesten – insbesondere im Schwarzwald, auf der Schwäbischen Alb und in der Region Bodensee–Oberschwaben – häufig dann überdurchschnittliche Windbedingungen aufweisen, wenn das übergeordnete Basisniveau der Windressource in Deutschland niedrig ist. Dadurch leistet Baden-Württemberg einen überproportionalen Beitrag zur Pufferung windarmer Phasen und steigert die Stabilität der erneuerbaren Stromversorgung in ganz Deutschland.

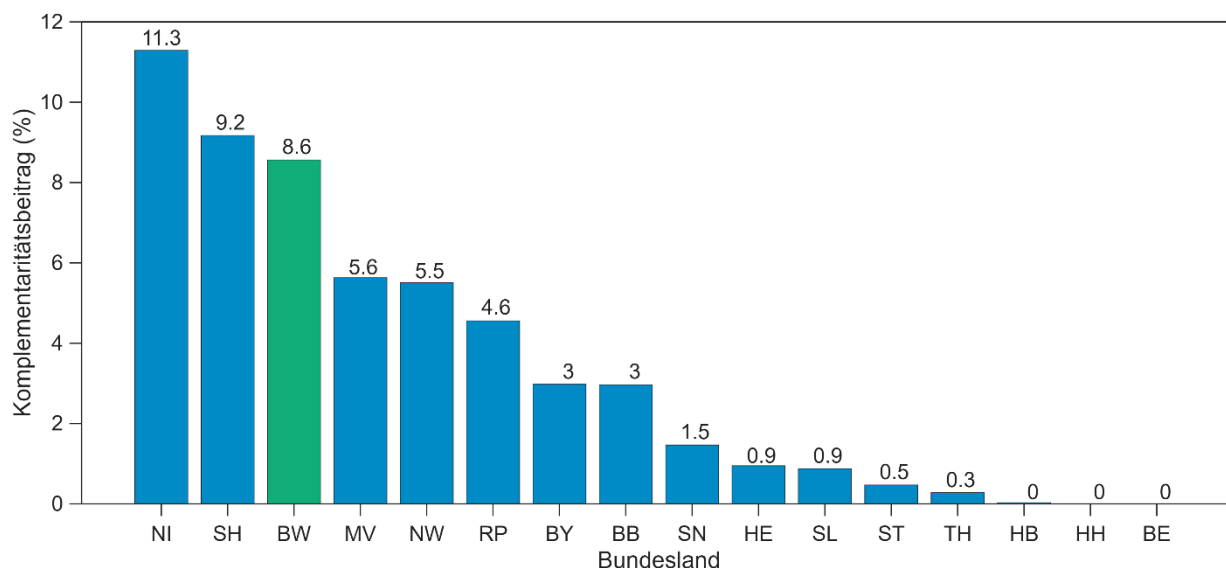


Abbildung 6: Anteil der Onshore-Windenergieanlagenstandorte in den Bundesländern (ohne Offshore-Standorte) am Komplementaritätsbeitrag (%).

Der Ausbau der Windenergie im Land ist somit nicht nur aus landespolitischer Perspektive, sondern auch im gesamtdeutschen Energiesystem von großer Bedeutung. Neben dieser systemischen Rolle spricht auch der Grundsatz der Verteilungsgerechtigkeit für eine stärkere Nutzung der Windenergie in Baden-Württemberg. Durch das Windenergieflächenbedarfsgesetz und das Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg wird das Land verpflichtet, einen angemessenen Anteil am nationalen Ausbauziel zu übernehmen. Eine gleichmäßigere räumliche Verteilung von Windenergieanlagen stärkt die Solidarität zwischen den Bundesländern und gewährleistet eine faire Lastenteilung beim Erreichen der Klimaschutzziele.

Der Ausbau der Windenergie in Baden-Württemberg ist, trotz geringerer mittlerer Windgeschwindigkeit, aus Gründen der Komplementarität, der Versorgungssicherheit und der Verteilungsgerechtigkeit unverzichtbar und sollte von allen politischen Kräften konsequent vorangetrieben werden. Eine strategisch geplante Nutzung besonders windhöflicher Standorte kann wesentlich dazu beitragen, die energiepolitischen Ziele des Landes und der Bundesrepublik zu erreichen.

Vor diesem Hintergrund ist es von zentraler Bedeutung, den geplanten Ausbau der Windenergie in Baden-Württemberg mit Nachdruck umzusetzen und Planungssicherheit für Investitionen zu schaffen. Das im Dashboard Windenergie dargestellte Ausbauziel bildet hierfür eine entscheidende Grundlage, um die identifizierten Potenziale auch tatsächlich zu realisieren. Damit Baden-Württemberg seinen Beitrag zur Netto-Treibhausgasneutralität leisten kann, müssen die vorgesehenen Ausbaupfade konsequent verfolgt und bestehende Hemmnisse in Planung, Genehmigung und Umsetzung weiter abgebaut werden. Ein entschlossenes Handeln von Politik und Verwaltung ist erforderlich, um den Ausbaupfad dauerhaft abzusichern und das im Windenergieflächenbedarfsgesetz verankerte Flächenziel von 1,8 % der Landesfläche tatsächlich zu erreichen. Nur so kann das Land seine (1) systemische und faire Rolle im gesamtdeutschen Energiesystem erfüllen, (2) gleichzeitig seine eigenen Klimaschutzziele erreichen und (3) die Voraussetzungen schaffen, um Baden-Württemberg als Industrieland zu erhalten.

4 Methodik

4.1 Datengrundlage

Die Windenergieanlagenflotte Deutschlands besteht aus Onshore- und Offshore-Windenergieanlagen. Für diese Analyse wurden

- bis Ende 2024 bestehende 29.807 Windenergieanlagenstandorte, davon 1.664 Offshore-Standorte, die größtenteils in Windparks gruppiert sind, verwendet,
- Windenergieanlagenstandorte einbezogen, deren Status „In Planung“ ist, um den zukünftigen Ausbau der Windenergie zu berücksichtigen.

Informationen zu Windenergieanlagen „In Planung“, die zukünftig in Baden-Württemberg errichtet werden sollen, wurden vom Dashboard Windenergie bezogen [Dashboard Windenergie, 2025]. Für die deutschen Offshore-Gebiete und die anderen Bundesländer wurden Angaben zu geplanten Windenergieanlagen aus dem Marktstammdatenregister übernommen [MaStR, 2025].

Da die genauen Standorte für die geplanten Windenergieanlagen zum Planungsbeginn nicht feststehen, wurden 819 im baden-württembergischen Dashboard Windenergie und im Marktstammdatenregister aufgeführten Anlagen anteilig auf die besten Standorte in den Landkreisen verteilt [Schmidt et al., 2024].

Das Marktstammdatenregister führt zum Zeitpunkt der Analyse 4.808 Onshore-Windenergieanlagen außerhalb Baden-Württembergs und 212 Offshore-Windenergieanlagen mit dem Status „In Planung“ auf. Insgesamt wurden 35.646 Windenergieanlagen in die Analyse einbezogen.

Da Betriebsdaten von Windenergieanlagen nicht für eine umfassende Komplementaritätsanalyse zur Verfügung stehen, wurde auf modellierte Windgeschwindigkeitswerte zurückgegriffen, um die Windverhältnisse in Deutschland an den Windenergieanlagenstandorten abzubilden. Die modellierten Werte stammen vom dreidimensionalen statistisch-empirischen *Wind Speed Complementarity Model* (WiCoMo), mit dem in Deutschland stündliche Windgeschwindigkeitswerte auf einem 25 m × 25 m-Raster berechnet werden können [Jung und Schindler, 2023]. Die Analyse basiert auf Windgeschwindigkeitswerten im Zeitraum 1. Januar 2015 bis 31. Dezember 2024.

4.2 Singulärwertzerlegung

Aus den an den Windenergieanlagenstandorten modellierten Windgeschwindigkeitswerten (WS) wurde in der Höhe 100 m über Grund stündliche Werte der gekappten Windleistungsdichte (WPD_{kapp}) berechnet:

$$WPD_{kapp} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot WS_{kapp}^3 \quad (1)$$

Für die Luftdichte ρ wurde der konstante Wert $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ angenommen.

Die Kappung wurde auf den Betriebsbereich einer typischer Windenergieanlage zwischen der Anlaufgeschwindigkeit von 3 m/s und der Nennwindgeschwindigkeit von 12 m/s, ab der Vollast erreicht wird, festgelegt.

Um die raumzeitliche Komplementarität der Windressourcen in Deutschland zu analysieren, wurde die Singulärwertzerlegung (SVD) auf die WPD_{kapp} -Matrix angewendet [Schindler et al., 2025]. Die SVD zerlegt die Datenmatrix in wenige Grundmuster (Komponenten), die zusammen die wesentlichen Variationen der Windressourcen erklären. Für diese Untersuchung wurde die WPD_{kapp} -Matrix in die sechs Komponenten K_1 bis K_6 zerlegt, die die räumliche Ausprägung von WPD_{kapp} in Deutschland repräsentieren:

$$WPD_{kapp} \approx U \cdot \Sigma \cdot V^T = \sum_{k=1}^6 s_k \cdot u_k \cdot v_k^T \quad (2)$$

Dabei beschreibt V die räumlichen Muster (v_k), U deren zeitliche Verläufe (u_k) und Σ die zugehörigen Stärken (s_k) der Komponenten. Das hochgestellte T deutet die Transposition von V an.

5 Quellenverzeichnis

Dashboard Windenergie, 2025. Windenergieausbau in Baden-Württemberg. Zuletzt abgerufen am 11.08.2025; abrufbar unter: https://umweltdaten.lubw.baden-wuerttemberg.de/repositories/energie_windenergie,7C1pAhtTDpA00YwQGcVz/workbooks/Stand-des-Windenergieausbaus,HVkeV1PiHZnNuLxtOLvS/worksheets/Dashboard-Windenergieausbau,cGEX-qcxsY7hw87gLB2P8

EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz), 2023. Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Zuletzt abgerufen am 20.11.2025; abrufbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/

Hart EK, Stoutenberg ED, Jacobson MZ, 2012. The potential of intermittent renewables to meet electric power demand: Current methods and emerging analytical techniques. Proceedings IEEE 100, 322–334. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2144951>

Jung C, Schindler D, 2023. Introducing a new wind speed complementarity model. Energy 265, 126284. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126284>

Jung C, Schindler D, 2025. Global future onshore wind energy droughts intensify under climate change. Journal of Cleaner Production 523, 146391. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146391>

Jurasz J, Canales, FA, Kies, A, Guezgouz, M, Beluco A, 2020. A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. Solar Energy 195, 703–724. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087>

KlimaG BW (Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg), 2023. Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg (KlimaG BW). Zuletzt abgerufen am 20.11.2025; abrufbar unter: <https://www.landesrecht-bw.de/bsbw/document/jlr-KlimaSch-GBW2023rahmen>

Marquis M, Wilczak J, Ahlstrom M, Sharp J, Stern A, Smith JC, Calvert S, 2011. Forecasting the wind to reach significant penetration levels of wind energy. Bulletin of the American Meteorological Society 92, 1159–1171. <https://doi.org/10.1175/2011BAMS3033.1>

MaStR (Marktstammdatenregister), 2025. Marktstammdatenregister. Zuletzt abgerufen am 11.08.2025; abrufbar unter: <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/>

Mockert F, Grams CM, Brown T, Neumann F, 2023. Meteorological conditions during periods of low wind speed and insolation in Germany: The role of weather regimes. Meteorological Applications 30, e2141. Abrufbar unter: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/met.2141>

Schindler D, Schmidt-Rohr S, Jung C, 2021. On the spatiotemporal complementarity of the European onshore wind resource. Energy Conversion and Management 237, 114098. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114098>

Schindler D, Wehrle J, Sander S, Schlemper C, Bekel K, Jung C, 2025. Assessment of spatiotemporal wind complementarity. Energies 18, 3715. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.3390/en18143715>

Schmidt M, Schindler D, Arneth A, Kesselring S, Löbbe S, Pehnt M, 2024. Landesflächen Baden-Württemberg – Aufwind durch Nutzung für erneuerbare Energien. Impulspapier des Klima-Sachverständigenrats Baden-Württemberg. Zuletzt abgerufen am 20.11.2025; abrufbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/4_Klima/Klimaschutz/Klima-Sachverstaendigenrat/240912-Impulspapier-KSR-LandesflaechenBW.pdf

UM (Umweltministerium Baden-Württemberg), 2024. Energiekonzept Baden-Württemberg. Zuletzt abgerufen am 20.11.2025; Abrufbar unter: <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/alle-meldungen/meldung/pid/energiekonzept-fuer-baden-wuerttemberg-1>

WindBG (Windenergieflächenbedarfsgesetz), 2023. Gesetz zur Festlegung von Flächenbedarfen für Windenergieanlagen an Land. Zuletzt abgerufen am 20.11.2025; abrufbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/windbg/>

MEHR INFORMATIONEN

Klima-Sachverständigenrat Baden-Württemberg
Kernerplatz 9 · 70182 Stuttgart
E-Mail: klima-sachverstaendigenrat@um.bwl.de



KLIMA-SACHVERSTÄNDIGENRAT
BADEN-WÜRTTEMBERG