

NATUR UND LANDSCHAFT

Zeitschrift für Naturschutz und Landschaftspflege

96. Jahrgang 2021 Heft

Seiten

DOI:

© 2021 W. Kohlhammer, Stuttgart

Verlag W. Kohlhammer

Kohlhammer

100 % erneuerbare Energien in Deutschland: Kann der Energiebedarf 2050 im Einklang mit Mensch und Natur gedeckt werden?

100% renewable energy in Germany: Can energy demand in 2050
be met in a way that is compatible with people and nature?

Julia Thiele, Julia Wiehe, Philip Gauglitz, Clemens Lohr, Astrid Bensmann,
Richard Hanke-Rauschenbach und Christina von Haaren

Zusammenfassung

Die Energiewende genießt in Deutschland sehr hohe Zustimmung in der Bevölkerung. Allerdings sind bei diesem Transformationsprozess auch andere Belange wie der Schutz der biologischen Vielfalt und die Interessen der Anwohnerinnen und Anwohner zu berücksichtigen. Die vorliegende Studie zeigt mit Szenarien Wege zur Lösung dieser Konflikte. Dazu wurde ein GIS-Modell entwickelt, das die Empfindlichkeiten von Mensch und Natur berücksichtigt und flächenkonkret sowie summativ für Deutschland Potenziale für erneuerbare Energien berechnet und einem für 2050 projizierten Bedarf gegenüberstellt. Das Modell dient der Entscheidungsunterstützung: Sowohl der Energiebedarf als auch die eingegebenen Daten können als Variablen behandelt werden. Die Projektionen zeigen, dass der Strombedarf von 1 500 Terawattstunden (TWh)/a im Jahr 2050 bei einer intelligenten Verteilung von On-Shore-Windenergieanlagen und einer sehr ambitionierten Nutzung von Dachflächen mit Photovoltaik gedeckt werden kann. Das Modell liefert die Grundlage für ein Werkzeug, das einer wissensbasierten Lenkung der Energiewende dient und in Zukunft bereitgestellt werden kann.

Erneuerbare Energiepotenziale – Naturschutz – GIS-Modellierung – Windenergie – Energiewende – Szenario

Abstract

In Germany, the energy transition enjoys a very high degree of public consent. However, other concerns such as the conservation of biodiversity and interests of local residents must also be taken into account in this transformation process. The present study uses scenarios to show ways to solve these conflicts. To this end, a GIS model has been developed that considers the vulnerabilities of people and nature and calculates renewable energy potentials in scenarios for Germany – both with reference to specific locations and overall – and compares them to the demand projected for 2050. The model serves as a decision support tool: Both energy demand and the input data as well as some assessment criteria can be treated as variables. The projections for 2050 show that an electricity demand of 1 500 TWh/a in 2050 can be met by means of an intelligent distribution of onshore wind turbines and a very ambitious use of roof areas. The model provides the basis for a tool that serves a knowledge-based approach to energy transition and can be made available in the future.

Renewable energy potentials – Nature conservation – GIS modelling – Wind power – Energy transition – Scenario

Manuskripteinreichung: 22.7.2020, Annahme: 17.8.2021

DOI: 10.19217/NuL2021-11-02

1 Einleitung

Die schnelle Umstellung der Energieversorgung auf 100 % erneuerbare Energien (EE) ist eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts, um die Treibhausgasemissionen zu vermindern und die Klimakrise zu bewältigen. Die notwendige Energiewende muss mit Zielen des Naturschutzes verbunden werden (Walter et al. 2018; Riedl et al. 2020), denn der Biodiversitätsverlust ist eine mindestens ebenso gravierende Krise (IPBES 2019).

Auch der Schutz von Gesundheit und Wohlbefinden der Menschen muss in diesem Prozess berücksichtigt werden. Zwar wird die Energiewende von 93 % der Bevölkerung als „wichtig“ bis „außerordentlich wichtig“ angesehen (AEE 2018), jedoch bestimmen Konflikte wie die Konkurrenz um Flächen, akustische Effekte oder Auswirkungen auf die Landschaftsästhetik das Tempo der konkreten Umsetzung. Darüber hinaus steigt der Rückbau von Windenergieanlagen (WEA) und der Zubau ist im Vergleich zu den Jahren 2013–2017 weiterhin auf einem niedrigen Niveau

(Deutsche WindGuard GmbH 2020). Es gilt also, eine nachhaltige Energiewende zu gestalten, die eine vollständige Deckung des Energiebedarfs spätestens im Jahr 2050 ermöglicht und die Erzeugung mit den lokalen Ansprüchen von Mensch und Natur vereinbart.

Bisherige nationale und internationale Studien zur Transformation des Energiesystems konzentrieren sich vor allem auf die Berechnung des Energiepotenzials (Ghorbani et al. 2017), sind nicht ausreichend flächenscharf oder ohne Berücksichtigung der Landschaftsästhetik angelegt (Klaus et al. 2010; Allen, Varga 2014; BMVI 2015). Die Studien berechnen nationale Potenziale auf Basis eher grober Eingangsdaten oder gehen von heutigen Bedingungen aus: Die zukünftige Entwicklung des Naturschutzes, die Stromnachfrage, technologische Innovationen oder die Verfügbarkeit von Flächen in den nächsten 30 Jahren werden nicht berücksichtigt (Güngör-Demirci 2015; Barrington-Leigh, Ouliaris 2017; Drechsler et al. 2017; Rinne et al. 2018). Gauglitz et al. (2019) entwickelten zwar ein flächendeckendes Modell für Deutschland und nahmen ein zukünftiges Energiesystem zur Grundlage, die Studie konzentriert sich jedoch auf die Windenergie.

Tab. 1: Kennzahlen der Windenergieanlagentypen und der Photovoltaik(PV)-Module in den Varianten.

Table 1: Key data of the wind power turbine types and the photovoltaic modules of the variants.

Szenario	Leistung (MW)	Rotor-durchmesser (m)	Nabenhöhe (m)	Max. Schallleistungspegel (dB[A])	Sonstiges	Wirkungsgrad der PV-Module
Ausgangsszenario (Walter et al. 2018) und Szenariovariante „hochaufgelöste Eingangsdaten“	7,58	127	200	108,5	Abschaltalgorithmen für Fledermäuse	30 %*
Szenariovariante „Trendfortschreibung heutiger Technologien“	Starkwind	7,20	172	109,8		24 %
	Mittelwind	6,04	172	170		
	Schwachwind	4,88	172	195	109,8	

* Brendel, Niepelt (2018)

Tab. 2: Eingangsdaten zur Berechnung von Flächenpotenzialen für On-Shore-Windenergie im Einklang mit Mensch und Natur.

Table 2: Input data of the variants for the calculation of people- and nature-compatible area potentials for onshore wind energy.

Flächenkategorien	Ausgangsszenario (Walter et al. 2018)	Szenariovariante „hochaufgelöste Eingangsdaten“ und Szenariovariante „Trendfortschreibung heutiger Technologien“
Infrastruktur, Siedlungen etc.	DLM 250	Basis-DLM* GeoBasis-DE/BKG 2018
Vorkommen windenergiesensibler Vogelarten	Atlas Deutscher Brutvogelarten (ADEBAR) (Gedeon et al. 2014)	ADEBAR (Gedeon et al. 2014), CORINE Land Cover 2018 (v.20b2, EEA, Download 11.1.2019)
Laub- und Mischwälder, Gewässer, Truppenübungsplätze und Bergbaufolgelandschaften, Grünland, Ackerflächen, Nadelwälder	DLM 250*	Basis-DLM* GeoBasis-DE/BKG 2018
Schutzgebiete	Daten des BfN	Aktualisierte Daten des BfN
Morphologische Auen	Daten des BfN	BfN 2009
Wildnisgebiete, historische Waldstandorte	Daten des BfN	BfN 2016, 2002
Grünes Band, UZVR	Daten des BfN	BfN 2013
Topographie	DGM200 GeoBasis-DE/BKG 2014 Genauigkeit: Lage: ± 5 m Höhe: ± 3 – 10 m (BKG 2018)	DGM50 GeoBasis-DE/BKG 2017 Genauigkeit: Lage: ± 1 – 3 m Höhe: ± 2 – 4 m (BKG 2018)

* Das Digitale Landschaftsmodell (DLM 250) hat eine Auflösung von 1 : 250 000, während das Digitale Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM) eine Lagegenauigkeit von ± 3 m vorweist und sich am Inhalt der Topographischen Karten 1 : 10 000/1 : 25 000 orientiert.

BfN = Bundesamt für Naturschutz, DGM = Digitales Geländemodell, DLM = Digitales Landschaftsmodell, UZVR = Unzerschnittene verkehrsfähige Räume

Ziel der hier vorgestellten Untersuchung ist es deshalb, mithilfe von Szenarien für das Jahr 2050 unter Berücksichtigung von Naturschutz sowie Gesundheit und Wohlbefinden der Menschen verfügbare Flächen zu ermitteln und darauf aufbauend einen möglichen bundesweiten Ausbau von EE zu modellieren. Damit soll die Frage beantwortet werden, ob auch unter diesen Bedingungen genug erneuerbare Energie für den Bedarf 2050 erzeugt werden kann. Ein weiteres Ziel ist es, die Unsicherheiten in einem bestehenden Szenario (Walter et al. 2018) zu verringern. Damit werden Erkenntnisse darüber gewonnen, welche Daten- und Methodenqualität für eine effiziente Weiterentwicklung der Modelle mit Blick auf verschiedene Anwendungen notwendig sind. Aufbauend auf dem Ausgangsszenario werden zwei Szenariovarianten entworfen, um diejenigen strategischen Stellschrauben zu identifizieren, die eine erfolgreiche Energiewende maßgeblich beeinflussen. Die Vereinbarkeit der Energiewende mit dem Naturschutz wird als Flächenkonflikt aufgegriffen und es werden Lösungsvorschläge aufgezeigt.

Das Modell soll Entscheidungsträgerinnen und -träger der verschiedenen politischen Ebenen dabei unterstützen, einen nachhaltigen Energiewendepfad und Umsetzungsmaßnahmen zu identifizieren.

2 Methoden: Annahmen und Vorgehen im Ausgangsszenario und den Szenariovarianten

2.1 Annahmen für die Szenarien

In allen Varianten wurde eine Energieversorgung für 2050 modelliert, die Deutschland vollständig aus EE versorgt. Dies geschah mit einem multikriteriellen, flächenbasierten Bewertungsansatz, der Risiken für Mensch und Natur berücksichtigt. Windenergie und Photovoltaik (PV) auf Dächern sind – ebenso wie in anderen Studien (Matthes et al.

2018; Günther et al. 2019) – die tragenden Säulen. Die zu erwartenden Technologieentwicklungen bis zum Zieljahr wurden dargestellt, indem eine WEA mit einem für das Jahr 2050 plausiblen, hohen technischen Niveau ausgewählt und für PV ein hoher Modulwirkungsgrad angenommen wurde (Tab. 1). Das Potenzial der PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA) wurde noch nicht quantifiziert – auch um zu unterstreichen, dass für PV zunächst urbane Flächen genutzt werden sollen.

Gegenüber dem Ausgangsszenario (Walter et al. 2018) wurden zur Ermittlung von Unsicherheiten und Handlungsoptionen folgende Szenariovarianten gerechnet:

1. Die Szenariovariante „hochaufgelöste Eingangsdaten“ ermittelte Flächen- und potenzielle Stromerträge unter Berücksichtigung differenzierterer Geodaten; dabei wurde eine anspruchsvollere Methode der Ertragspotenzialberechnung als im Ausgangsszenario verwendet. Damit sollten datenbedingte Unsicherheiten bestimmt und reduziert werden. Statt des Digitalen Landschaftsmodells 250 (DLM 250) und des Digitalen Geländemodells 200 (DGM 200) wurden hochaufgelöste Geodaten aus dem Basis-DLM und dem Digitalen Geländemodell 50 (DGM 50) in das Modell eines Geoinformationssystems (GIS) integriert (Tab. 2). Dies ermöglichte deutlich differenziertere Betrachtungen: So konnten z.B. Straßen nach Breitenklassen gepuffert und Bahntrassen nach ihrer Gleisanzahl dargestellt werden. Ferner wurden Splittersiedlungen einbezogen sowie Flughäfen und Flugplätze unterschieden und so differenzierte Schutzabstände berücksichtigt (Lütkehus et al. 2013).
2. Auch in der Szenariovariante „Trendfortschreibung heutiger Technologien“ wurden die genaueren Eingangsdaten genutzt, aber die Erzeugungstechnologien variiert. Es wurden drei WEA-Typen (Stark-, Mittel- und Schwachwindanlage) in das GIS-Modell integriert (Tab. 1) und analog zur heutigen Praxis entsprechend den Windverhältnissen am Standort auf Potenzialflächen verteilt.

Tab. 3: Raumwiderstandsklassen der Szenariovarianten abgeleitet aus Walter et al. (2018). Die einzuhaltenden Abstände sind anlagen-spezifisch und beziehen sich auf die Windenergieanlagen (WEA) der Szenariovariante „hochaufgelöste Eingangsdaten“. Fett hervorgehobene Flächenkategorien markieren Unterschiede zum Ausgangsszenario (Walter et al. 2018).

Table 3: Spatial vulnerability classes of the scenario variants derived from Walter et al. (2018). The distances to be maintained are plant-specific and refer to the wind turbine type of the „high-resolution input data“ scenario variant. Area categories in bold font indicate differences to Walter et al. (2018).

Raumwiderstandsklasse	Flächenkategorien
Sehr hoher Raumwiderstand	<ul style="list-style-type: none"> • Flächen mit einem Neigungswinkel $\geq 30^\circ$ ^a • Siedlungsflächen ^b • Infrastrukturen ^{b, c} • Erholungsflächen ^b • Wasserflächen ^b • Nationalparks ^d • Naturschutzgebiete ^d • Natura-2000-Netzwerk: Fauna-Flora-Habitat (FFH)-Gebiete, Vogelschutzgebiete ^d • Grünes Band Deutschland ^{d, *} • Truppenübungsplätze und Bergbaufolgelandschaften ^{b, *} • Wildnis- und Waldentwicklungsgebiete ^{b, *} <p>Pufferzone um Siedlungs- und Infrastrukturf lächen, berechnet nach der Nabenhöhe, dem Rotordurchmesser und dem Schallpegel der Beispielanlage in der Szenariovariante „hochaufgelöste Eingangsdaten“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wohngebiete: 750 m (TA-Lärm bei 40 dB[A]) ⁱ • Industrie/Gewerbe: 75 m (TA-Lärm bei 60 dB[A]) ⁱ • Autobahnen: 103,5 m \rightarrow 40 m + ($\frac{1}{2}$ \times Rotordurchmesser) ^g • Bundesstraßen: 83,5 m \rightarrow 20 m + ($\frac{1}{2}$ \times Rotordurchmesser) ^g • Leitungen: 127 m \rightarrow entspricht dem Rotordurchmesser ^h • Trassen nach Bundesnetzagentur: 127 m ^h • Seilbahnen: 381 m \rightarrow 3 \times Rotordurchmesser ⁱ • Bahntrassen: 263,5 m \rightarrow Nabenhöhe + ($\frac{1}{2}$ \times Rotordurchmesser) ⁱ • Flughäfen: 5 000 m und Flugplätze 1 760 m ⁱ
Hoher Raumwiderstand	<ul style="list-style-type: none"> • Ramsar-Feuchtgebiete ^d • Historische Waldstandorte ^e • Vorkommen empfindlicher Vogelarten außerhalb von Schutzgebieten der Raumwiderstandsklasse „sehr hoch“ zzgl. Pufferzonen ^k • 200-m-Pufferzone um Nationalparks, Naturschutzgebiete, Natura-2000-Gebiete • Biosphärenreservate (Kernzone) ^d • Hohe Landschaftsbildbewertung > 54 auf einer Skala von 100 ^l
Mittlerer Raumwiderstand	<ul style="list-style-type: none"> • Landschaftsschutzgebiete ^d • Laub- und Mischwald ^b • Biosphärenreservate (Pflege- und Entwicklungszone) ^d • Puffer um Erholungsflächen: 1 000 m ^m • Morphologische Auen ^{n, *} • Nationaler Biotopverbund ^{n, *} • Unzerschnittene Verkehrsarme Räume ^{d, *}
Geringer Raumwiderstand	<ul style="list-style-type: none"> • Grünland ^b • Ackerfläche ^b • Nadelforst ^b • Geringe Landschaftsbildbewertung < 54 auf einer Skala von 100 ^l

a) Digitale Geländemodelle (DGM 50, Gitterweite von 50 m): Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (© GeoBasis-DE/BKG 2017)

b) Digitales Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM): Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (© GeoBasis-DE/BKG 2018)

c) Netzausbau: Bundesnetzagentur (© BNetzA 2016)

d) Bundesamt für Naturschutz (BfN) (© BfN 2016–2018)

e) Geodaten bereitgestellt vom BfN nach Rosenthal et al. (2015)

f) Nach Walter et al. (2018)

g) Abstand berechnet nach dem Bundesfernstraßengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. Juni 2007 (BGBl. I S. 1 206), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2 237) geändert worden ist, zit. nach Walter et al. (2018)

h) Abstand berechnet nach DIN EN 50341-3-4 VDE 0210-3:2011-01, zit. nach Walter et al. (2018)

i) Abstand berechnet nach Lütkehus et al. (2013)

j) Geodaten bereitgestellt vom BfN (© BfN 2002) nach Glaser, Hauke (2004)

k) Atlas Deutscher Brutvogelarten (ADEBAR) und CORINE Land Cover 2018 (CLC v18_5_1, EEA); nach Busch et al. (2017)

l) Hermes (in Vorb.)

m) FA Wind (2019)

n) Geodaten bereitgestellt vom BfN (© BfN 2009) nach Brunotte et al. (2009)

o) Geodaten bereitgestellt vom BfN nach Fuchs et al. (2010)

* Flächen mit Naturschutzpotenzial nach der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt (vgl. Walter et al. 2018)

Dabei wurde eine Technologieentwicklung der Erzeugungsanlagen angenommen, die dem aktuellen Trend entspricht.

2.2 Ermittlung der im Einklang mit Mensch und Natur nutzbaren Flächenpotenziale für On-Shore-Windenergie und Dach-PV

2.2.1 On-Shore-Windenergie

Für die Ermittlung von Flächenpotenzialen der On-Shore-Windenergie wurde in Anlehnung an die Methode der Umweltverträglichkeitsprüfung eine Raumwiderstands (RWS)-Analyse in einem GIS durchgeführt (Walter et al. 2018). Für die Standortuche relevante Flächenkategorien wurden dabei jeweils einer von insgesamt vier RWS-Klassen zugeordnet (Tab. 3). Dabei wurde zunächst die potenzielle Belastung durch die Erzeugungsanlage in Verbindung mit der belastungsspezifischen Empfindlichkeit des Standorts bzw. dessen Nutzung ermittelt. Über die Empfindlichkeit hinaus sind auch rechtliche sowie bautechnische und geologische Anforderungen abgebildet.

Einen „geringen“ RWS haben diejenigen Flächen, die aller Voraussicht nach ohne größere Konflikte mit Mensch und Natur für den Bau von WEA zur Verfügung stehen. Ein hoher RWS wurde

Flächen zugewiesen, die aufgrund von sehr stark legitimierte, „harten“ rechtlichen Regelungen für den Bau von WEA ausgeschlossen sind.

Die Einteilung der RWS-Klassen wurde in Abstimmung mit der interdisziplinär besetzten, projektbegleitenden Arbeitsgruppe überprüft und in den Szenariovarianten gegenüber dem Ausgangsszenario aktualisiert (Tab. 3, S. 519). Um die Ziele des Naturschutzes für 2050 zu berücksichtigen, sind in die RWS-Analyse neben derzeitigen Schutzgebieten, landschaftsästhetisch wertvollen Gebieten und Vorkommen windenergiesensibler Vogelarten auch Ziele der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt (z. B. natürliche Waldentwicklung) eingeflossen (BMU 2007; Walter et al. 2018).

Die landschaftsästhetisch wertvollen Räume – hier als das „schönste Drittel“ Deutschlands definiert – wurden auf Grundlage eines vorhandenen Modells identifiziert (Hermes et al. 2018; Hermes in Vorb.). Vorkommen windenergiesensibler Vogelarten wurden aufgrund des Atlas Deutscher Brutvogelarten lokalisiert (ADEBAR) (Gedeon et al. 2014), in dem ein Artvorkommen je 11 km × 11 km-Kachel angegeben wird. Folgende windenergiesensible Vogelarten aus dem Helgoländer Papier wurden berücksichtigt, für die Informationen zu potenziellen Landnutzungen als Bruthabitat nach Busch et al. (2016, 2017) vorliegen: Alpenschneehuhn (*Lagopus muta*), Auerhuhn (*Tetrao urogallus*), Baumfalke (*Falco subbuteo*), Bekassine (*Gallinago gallinago*), Birkhuhn (*Tetrao tetrix*), Goldregenpfeifer (*Pluvialis apricaria*), Großer Brachvogel (*Numenius arquata*), Großstrappe (*Otis tarda*), Haselhuhn (*Tetrastes bonasia*), Kiebitz (*Vanellus vanellus*), Kornweihe (*Circus cyaneus*), Kranich (*Grus grus*), Rohrweihe (*Circus aeruginosus*), Rotmilan (*Milvus milvus*), Rotschenkel (*Tringa totanus*), Schreiadler (*Clanga pomarina*), Schwarzmilan (*Milvus migrans*), Schwarzstorch (*Ciconia nigra*), Steinadler (*Aquila chrysaetos*), Sumpfohreule (*Asio flammeus*), Uferschnepfe (*Limosa limosa*), Uhu (*Bubo bubo*), Wachtelkönig (*Crex crex*), Waldschnepfe (*Scolopax rusticola*), Wanderfalke (*Falco peregrinus*), Weißstorch (*Ciconia ciconia*), Wespenbussard (*Pernis apivorus*), Wiedehopf (*Upupa epops*), Wiesenweihe (*Circus pygargus*), Ziegenmelker (*Caprimulgus europaeus*).

Im Ausgangsszenario wurde die Lage der Brutplätze zufällig in den Kacheln verteilt und mit artspezifischen Abstandspuffern (LAG VSW 2014) versehen, womit erhebliche Unsicherheiten verbunden waren. In den Szenariovarianten wurden dagegen Brutplätze nur noch auf Flächen verteilt, deren Landnutzung sich nach Busch et al. (2016, 2017) als Bruthabitat einer Art potenziell eignet.

Zu Siedlungen wurde im Ausgangsszenario genauso wie in der Variante „hochaufgelöste Eingangsdaten“ aufgrund des angenommenen Immissionsrichtwerts von 40 dB(A) und eines maximalen

Schalleistungspegels von 108,5 dB(A) ein Lärmschutzabstand von 750 m nach der TA Lärm berechnet (Walter et al. 2018). Industrie- und Gewerbeflächen erhielten einen Schutzabstand von 75 m. In der Variante „Trendfortschreibung heutiger Technologien“ wurden die einzuhaltenden Schutzabstände neu berechnet (Tab. 4), da die Anlagenkonfiguration geändert wurde (Tab. 1, S. 518). Alle Annahmen, die bei diesen Flächenberechnungen eingesetzt wurden, können bei veränderten rechtlichen oder technischen Setzungen im Modell variiert werden.

2.2.2 Dach-PV

Für die Berechnung des Flächenpotenzials von Dach-PV wurde der Datensatz der Hausumringe (beschreiben georeferenzierte Umringspolygone von Gebäudegrundrissen) des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) aus dem Jahr 2014 verwendet. Im Ausgangsszenario galt die pauschale Annahme, dass in Industriegebieten Flachdächer zur Verfügung stehen und außerhalb von Industriegebieten Schrägdächer. Nutzbar für eine Belegung mit PV-Modulen waren bei Flachdächern 80 % und bei Schrägdächern 60 % der Dachfläche (Walter et al. 2018).

In den Szenariovarianten wurden zur Konkretisierung der Dachtypeneinteilung 3D-Gebäudemodelle einbezogen. Die Gebäudemodelle beinhalten standardisierte Dachformen entsprechend der tatsächlichen Firstverläufe (BKG o.J.). Aus diesen Daten wurden

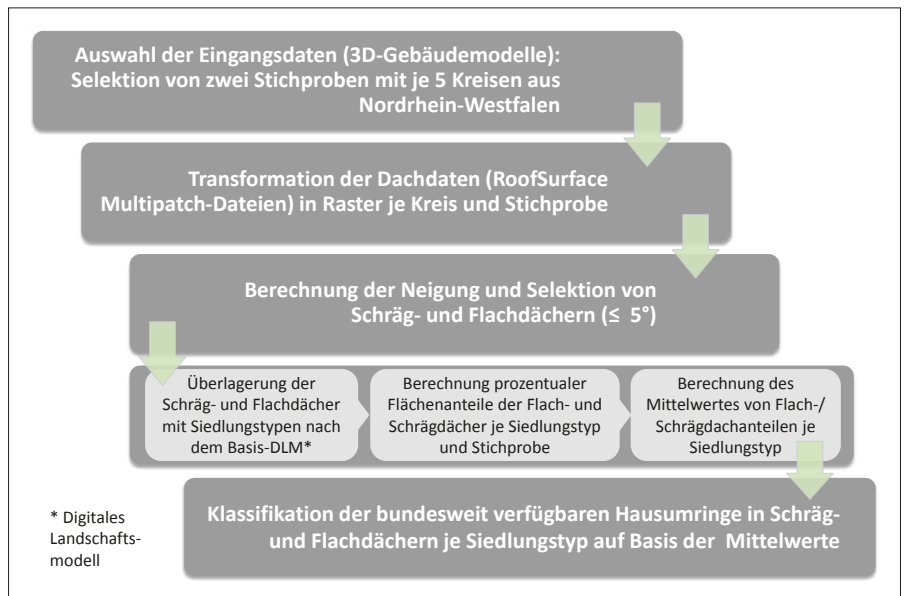


Abb. 1: Geoverarbeitungs-Workflow zur Klassifizierung der Dachform anhand von 3D-Gebäudemodellen (Datenquelle: OpenGeodata.NRW 2019).

Fig. 1: Geoprocessing workflow for roof shape classification based on 3D building models (data source: OpenGeodata.NRW 2019).

Tab. 4: Schutzabstände von Infrastruktureinrichtungen, Siedlungsflächen, Industrie- und Gewerbeflächen sowie Freizeit- und Erholungsflächen zu den angenommenen Windenergieanlagen (WEA).

Table 4: Protective distances from infrastructure facilities, settlement areas, industrial and commercial areas, as well as leisure and recreation areas to the assumed wind energy plants.

Szenario	Schutzabstände der WEA zu ...							
	Siedlungen	Industrie-/ Gewerbeflächen	Freizeit-/ Erholungsflächen	Bahnstrecken	Autobahnen	Bundesstraßen	Freileitungen	
Ausgangsszenario (Walter et al. 2018)	750 m	75 m	1 334 m	264 m	104 m	84 m	127 m	
Szenario- variante „Trend- fortschreibung heutiger Technologien“	Starkwind	871 m	87 m	1 000 m	211 m	126 m	106 m	172 m
	Mittelwind	871 m	87 m	1 000 m	256 m	126 m	106 m	172 m
	Schwachwind	871 m	87 m	1 000 m	281 m	126 m	106 m	172 m

zunächst zwei Stichproben mit 3D-Gebäudemodellen der Detailebene LoD2 (Level of Detail) aus je fünf Kreisen in Nordrhein-Westfalen ausgewählt (OpenGeodata. NRW 2019) und Dachflächen aus den Gebäudemodellen extrahiert (Abb. 1). Die Datensätze der Dächer wurden mit Siedlungstypen (z. B. Wohnbauflächen, Flächen gemischter Nutzung) des Basis-DLM überlagert und es wurde der prozentuale Anteil von Flach- und Schrägdachflächen je Siedlungstyp berechnet. Aus beiden Stichproben wurde ein Mittelwert gebildet und auf die bundesweit verfügbaren Hausumringe übertragen.

Von den so ermittelten Schrägdächern können aufgrund von baulichen Einrichtungen und Abschattungseffekten 70 % für Module genutzt werden (Kaltschmitt, Wiese 1993). Zur Berechnung der PV-Erträge wurde eine Dachneigung von 35° angenommen (Lödl et al. 2010). Es wurden keine Dachflächen aufgrund der Gebäudeausrichtung ausgeschlossen (Mainzer et al. 2014). Bei Flachdächern wurden 65 % als Potenzialfläche berücksichtigt, wobei die Module eine Ost-West-Ausrichtung und eine Aufständigung mit 10°-Neigung erhalten (Lödl et al. 2010).

2.3 Berechnungen potenzieller Stromerträge

Im Ausgangsszenario wurden WEA für die Berechnung der Energieerträge auf den Flächen des geringen RWS nach pauschalen Mindestabständen von 508 m verortet und ihre potenziellen Stromerträge entsprechend der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit in 200 m Höhe berechnet (Walter et al. 2018). In den Szenariovarianten wurde hierfür ein Modell des Fraunhofer Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) genutzt (Modellmethodik nach Böttger et al. 2019); dieses berücksichtigt bei der Platzierung windrichtungsabhängige Mindestabstände und eine effiziente Nutzung der Flächen vom „Rand“ her (Abb. 2) (Meyer 2018).

Für diese WEA-Standorte wurden Zeitreihen erstellt, mit einer Auflösung von 1 h, einem zeitlichen Umfang von einem Jahr und einer räumlichen Auflösung des Cosmo-DE-Modells (Wettermodell, ca. 3 km × 3 km). Als Berechnungsgrundlage wurden die Winddaten des Wetterjahrs 2012 genutzt, da das Jahr bezüglich Solarstrahlung und Windstärken verhältnismäßig durchschnittlich ist. Die anschließende Ertragspotenzialberechnung bestimmte für jeden Zeitschritt und jedes Wettermodell-Pixel die Leistung der WEA. Die Eingangsdaten der Windgeschwindigkeit lagen raumspezifisch (als Rasterkarte), zeitspezifisch (mit stündlicher Auflösung) und höhenpezifisch vor (Zwischenhöhen wurden interpoliert, um auch die genaue Nabenhöhe zu berücksichtigen).

Für die Berechnung potenzieller Stromerträge von Dach-PV wurden ebenfalls für das Wettermodell flächenscharfe, stündlich aufgelöste Zeitreihen erstellt. Die Zeitreihen berücksichtigten die zeitlich und räumlich spezifische Einstrahlung, temperaturabhängige Verluste und Inverterverluste. Im Ausgangsszenario und der Variante „hochaufgelöste Eingangsdaten“ wurde ein Modulwirkungsgrad von 30 % (Brendel, Niepelt 2018) angenommen, in der Variante „Trendfortschreibung heutiger Technologien“ von 24 % (Tab. 1, S. 518).

Für Off-Shore-Wind wurde eine für das Wettermodell flächenscharfe Einspeisesimulation eines Zubaus bis zu einer Gesamtleistung von 35 Gigawatt (GW) vorgenommen (Setzung der Grenze aufgrund von Befragung von Expertinnen und Experten des

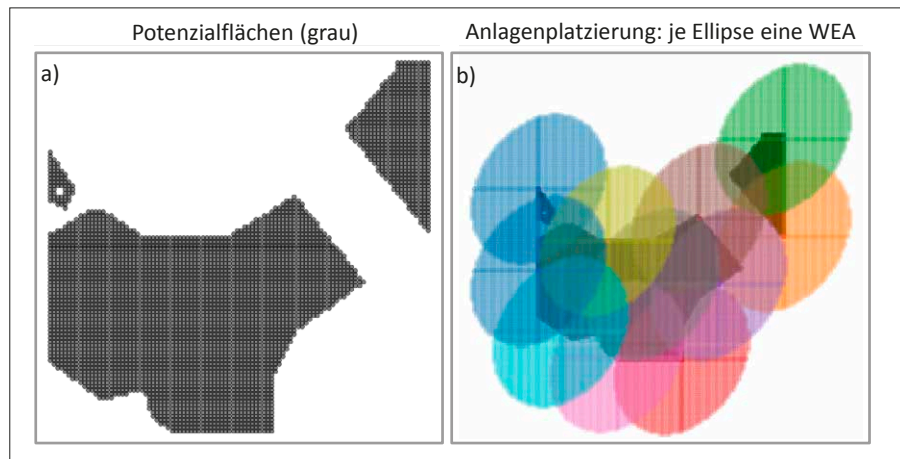


Abb. 2: a) Beispiel für Flächen des geringen Raumwiderstands im Rasterformat (graue Flächen), die zur Platzierung von Windenergieanlagen (WEA) genutzt wurden. b) Im Zentrum der farbigen Ellipsen wird eine Anlage angenommen; jede farbige Ellipse zeigt den (windrichtungsabhängigen) Mindestabstand der jeweiligen Anlage zur nächsten; die längere Ellipsenachse liegt dabei in Hauptwindrichtung; jedes Ellipsenzentrum befindet sich außerhalb aller anderen Ellipsenflächen.

Fig. 2: a) Example of areas of the low spatial vulnerability class in grid format (grey areas) used for placement of wind turbines. b) A turbine is assumed in the centre of the coloured ellipses; each coloured ellipse shows the (wind direction dependent) minimum distance of the respective turbine to the next one; the longer ellipse axis is in the main wind direction; each ellipse centre is located outside of all other ellipse areas.

Bundesamts für Naturschutz). Eine detaillierte Anlagenplatzierung war nicht notwendig, da die Windverhältnisse aufgrund der flachen Meeresoberfläche gleichmäßig und die konkreten Standorte für die Berechnung nicht relevant sind. Der Off-Shore-Ausbau ist geringer als in anderen Szenarien (z. B. 51 GW in Matthes et al. 2018), um mögliche Flächenrestriktionen für eine Naturverträglichkeit einzukalkulieren. Ertragspotenziale aus Geothermie und Laufwasserkraftwerken nach Klaus et al. (2010) ergänzten für die Bilanzierung die Potenziale von Off-/On-Shore-Wind und Dach-PV.

Die berechneten Stromertragspotenziale wurden als Dateneingang genutzt, um mithilfe eines mathematischen Optimierungsmodells die Speicher- und Umwandlungsverluste sowie benötigte Speicherkapazitäten zu ermitteln.

Die Ertragspotenziale aus allen Szenarien wurden anschließend einem projizierten Energiebedarf für das Jahr 2050 gegenübergestellt. Für die Bedarfsschätzung wurde von einer weitgehenden Elektrifizierung des Energiesystems ausgegangen, mit 88 % Elektrifizierung im Verkehrssektor und einer ambitionierten Gebäudesanierungsrate von 2,6 % pro Jahr. Darüber hinaus wurde eine Bevölkerungsdegression von rund 12 % zusammen mit einer Steigerung des Bruttoinlandsprodukts um 0,7 % pro Jahr (WWF 2009; UBA 2014) angenommen.

Die Projektion des Energiebedarfs im Jahr 2050 ergibt einen direkten Strombedarf von 751 Terawattstunden (TWh)/a und 59 TWh/a Strom für Wärmepumpen (Wärmepumpen und Kraft-Wärme-Kopplung [KWK]). Die Umwandlungsverluste durch Stromspeicher betragen 4,2 TWh/a. Schwer elektrifizierbare Prozesse, z. B. in der chemischen Industrie oder im Verkehrssektor, können biogene Reststoffe oder Power-to-X – d. h. „die Wandlung von Strom als Primärenergie und Rohstoff in einen Energieträger, also in Wärme, Kälte, Produkt, Kraft- oder Rohstoff“ (Stern et al. 2017: 185) – als Energiequelle nutzen. Um die benötigten 255 TWh Power-to-X herzustellen, müssen zusätzlich rund 430,9 TWh/a Strom aufgrund der Umwandlungsverluste eingerechnet werden (Summe 686 TWh/a). Insgesamt müssen demnach 1 500 TWh/a Strom gedeckt werden. Als Primärenergie werden darüber hinaus 229 TWh/a Umgebungswärme und 60 TWh/a biogene Reststoffe (vgl. Walter et al. 2018) benötigt (Gesamtenergiebedarf 1 789 TWh/a).

3 Ergebnisse: Flächenpotenziale und Stromertragspotenziale

Die Ergebnisse der Flächen- und Stromertragsberechnungen in den Varianten zeigen, dass auch unter Verwendung genauerer Daten und Methoden grundsätzlich eine Deckung des projizierten Energiebedarfs für 2050 nur mit WEA im Außenbereich und Dach-PV unter anspruchsvollen Auflagen zum Schutz von Mensch und Natur möglich ist (Abb. 3). Es zeigt sich aber auch, dass die Verwendung detaillierter Daten zu erheblichen und entscheidungsrelevanten Unterschieden in der Potenzialflächenberechnung führt. Beispielsweise vergrößert sich die Flächenkategorie „Neigung von $\geq 30^\circ$ “ (6 570 km²) im Vergleich zum Ausgangsszenario um 1 150 %. Industrie- und Gewerbeflächen nehmen im Vergleich zum Ausgangsszenario um 240 % zu.

Die Flächen des geringen RWS in der Szenariovariante „hochaufgelöste Eingangsdaten“ reduzieren sich im Vergleich zum Ausgangsszenario um 2 981 km². Sie umfassen 5 320 km² (Thiele et al. 2021), dies entspricht ca. 1,5 % der Fläche Deutschlands (Ausgangsszenario: 2,3 %; Walter et al. 2018) (Abb. 4). Dennoch können potenziell 391 Gigawatt (GW) WEA installiert und damit ein potenzieller Ertrag von 884 TWh/a gewonnen werden (Tab. 5).

Die Szenariovariante „Trendfortschreibung heutiger Technologien“ ergibt mit 3 930 km² im geringen RWS (1,1 % der Fläche Deutschlands) das geringste im Einklang mit Mensch und Natur nutzbare Flächenpotenzial für On-Shore-Windenergie, da sich durch die veränderten WEA-Eigenschaften die einzuhaltenden Abstände zu Siedlungs- und Industrieflächen sowie Infrastrukturen vergrößern. In den Potenzialflächen sind 1 384 km² geringer RWS der Schwachwindanlage, 2 182 km² geringer RWS der Mittelwindanlage und 364 km² geringer RWS der Starkwindanlage enthalten. Der potenzielle Stromertrag beläuft sich auf lediglich 414 TWh/a bei einer installierten Leistung von 149 GW (Tab. 5). Für Off-Shore-Wind wird in beiden Szenariovarianten aus der installierten Leistung von 35 GW ein Stromertragspotenzial von 139 TWh/a berechnet, das deutlich höher liegt als im Ausgangsszenario mit 113 TWh/a (Walter et al. 2018).

Die differenziertere Selektion von Schräg- und Flachdächern nach Siedlungstypen ergibt mit 1 699 km² potenziell nutzbarer Flachdachfläche eine wesentlich größere Fläche als im Ausgangsszenario (Abb. 5). Auf Schrägdächern sind 2 745 km² potenziell nutzbar. In der Variante „hochaufgelöste Eingangsdaten“ ergibt sich daraus ein potenzieller PV-Stromertrag von 937 TWh/a (Tab. 5). Der geringere Wirkungsgrad der Module, wie in Variante „Trendfortschreibung heutiger Technologien“ angenommen, würde das Ertragspotenzial auf 749 TWh/a verringern.

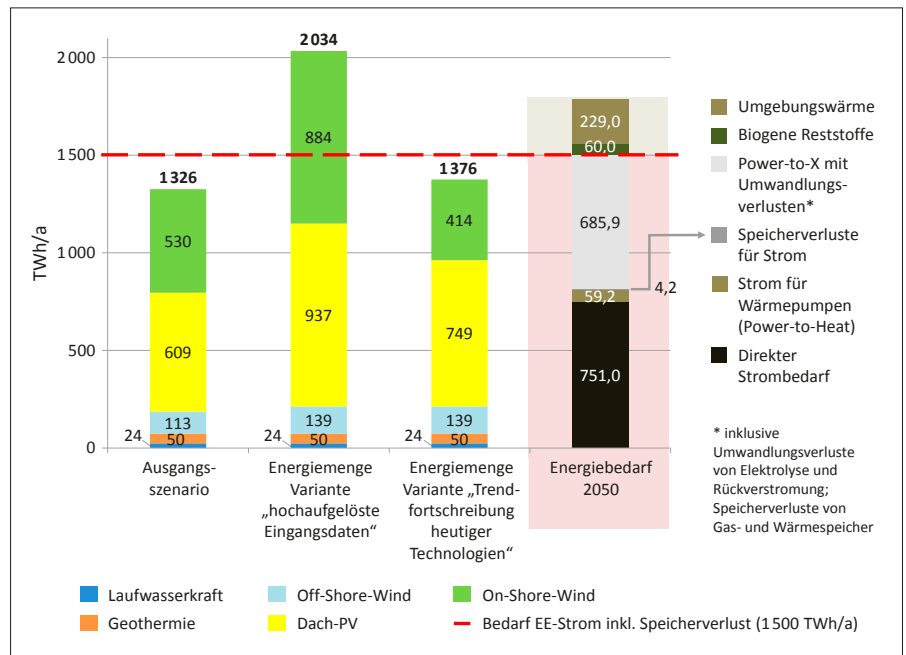


Abb. 3: Vergleich der potenziellen Stromerträge in den Szenariovarianten mit dem projizierten Endenergiebedarf im Jahr 2050; EE = erneuerbare Energien, PV = Photovoltaik.

Fig. 3: Comparison of potential electricity yields in the scenario variants with projected final energy demand in 2050; EE = renewable energies, PV = photovoltaics.

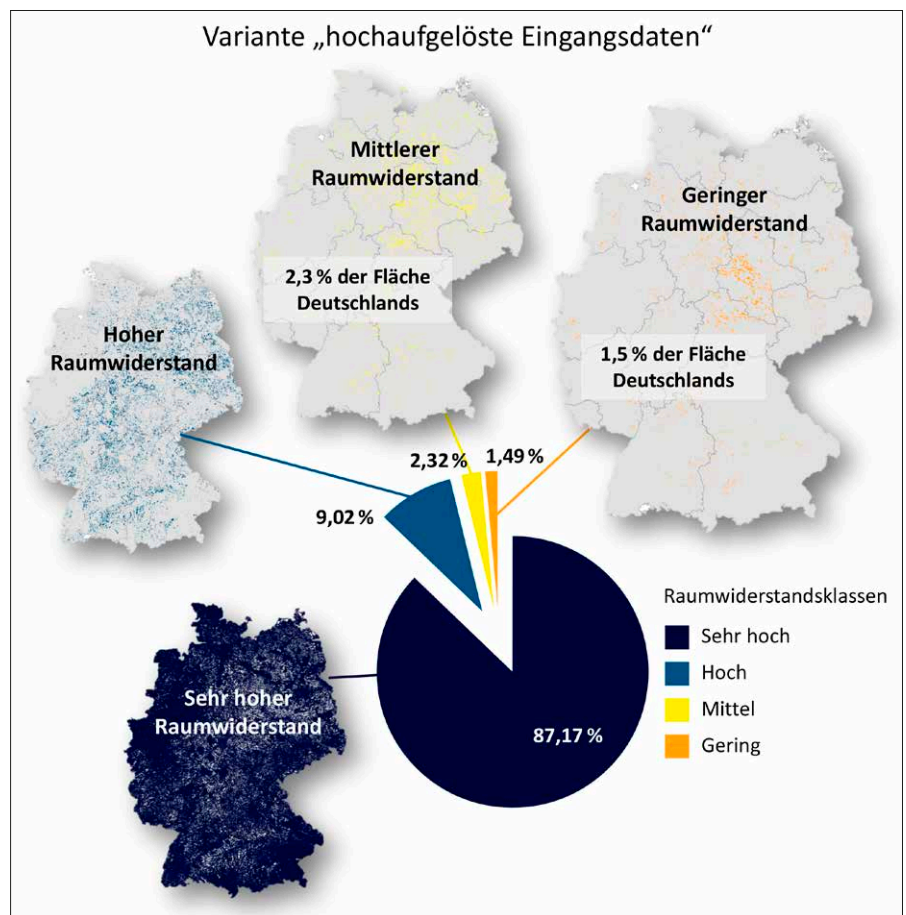


Abb. 4: Flächen der Raumwiderstandsklassen der Variante „hochaufgelöste Eingangsdaten“ dargestellt mit ihren prozentualen Anteilen an der Fläche Deutschlands.

Fig. 4: Areas of the spatial vulnerability classes of the “high-resolution input data” variant shown with their shares in percent of the area of Germany.

Tab. 5: Flächenpotenziale und Zeitreihenberechnungen für Onshore-Windenergie und Dach-Photovoltaik (Dach-PV) in den Szenariovarianten.

Table 5: Area potentials and time series calculations for onshore wind energy and rooftop photovoltaics in the scenario variants.

		Szenariovariante „hochaufgelöste Eingangsdaten“	Szenariovariante „Trendfortschreibung heutiger Technologien“
On-Shore-Windenergie	Flächen mit geringem Raumwiderstand	5 320 km ²	3 930 km ²
	Leistung	391 GW	149 GW
	Energiemenge	884 TWh/a	414 TWh/a
	Volllaststunden	2 264 kWh/kW	2 765 kWh/kW
Dach-PV	Dachflächenpotenzial	4 444 km ²	4 444 km ²
	Leistung	1 156 GW	924 GW
	Energiemenge	937 TWh/a	749 TWh/a
	Volllaststunden	811 kWh/kW	811 kWh/kW

Bilanziell reichen die Stromertragspotenziale der Szenariovariante „hochaufgelöste Eingangsdaten“ aus, um den projizierten Strombedarf von 1 500 TWh/a zu decken (Abb.3). Mit weniger leistungsstarker Erzeugungstechnologie, wie in der Variante „Trendfortschreibung heutiger Technologien“ angenommen, ist dieses Ziel nicht zu erreichen.

4 Diskussion

Die Studie zeigt, dass unter den beschriebenen Annahmen der Szenariovariante „hochaufgelöste Eingangsdaten“ ausreichend im Einklang mit Mensch und Natur nutzbare Flächen zur Verfügung stehen, um den Energiebedarf Deutschlands im Jahr 2050 durch EE zu decken. Dies ist möglich, auch wenn u.a. Wildnis- und Waldentwicklungsgebiete als Ausschlussflächen für On-Shore-Windenergie gelten, um neben derzeit schon geschützten Flächen auch die Ziele der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt in der RWS-Analyse abzubilden.

Der Vergleich der Szenariovarianten zeigt auch die Bedeutung der Qualität von Geodaten im GIS-Modell. Um die optimalen Anlagenstandorte verlässlich zu ermitteln, ist eine hohe Auflösung essenziell. Mit diesen Datensätzen wird darüber hinaus ein Downscaling von der Bundes- auf die unteren Planungsebenen möglich. In den Regionen könnten auf dieser Grundlage nach bundesweit einheitlichen Kriterien bewertete Eignungs- und Ausschlussflächen sowie flächenkonkrete Energiepotenziale vorgeschlagen werden. Die Potenzialflächen könnten um national nicht verfügbare Daten, wie z. B. Informationen über Helikopter-Einflugschneisen, ergänzt und in der Standortplanung auf der lokalen Ebene verwendet werden. Auch ist davon auszugehen, dass sich über die in der Studie aufgegriffenen Konflikte hinaus weitere Themenfelder ergeben, die lokale oder auch nationale Anpassungen am Modell erfordern.

Die Modellierung der verschiedenen Erzeugungstechnologien in den hier vorgestellten Varianten veranschaulicht die Bedeutung des Einsatzes von sehr leistungsstarker Technik. Naturschutz- und Erzeugungsziele können nur dann miteinander in Einklang gebracht werden, wenn der Flächenbedarf reduziert wird. Die Verwendung der besten verfügbaren Technologien sollte daher bei der Ausgestaltung von Förderinstrumenten immer vorausgesetzt werden.

Kann der prognostizierte Bedarf nicht allein durch Windenergie, Dach-PV, Geothermie und Wasserkraft gedeckt werden, müssten andere in den Szenariovarianten bisher nicht berücksichtigte Potenziale herangezogen werden. Im Zusammenhang mit Lebensstiländerungen sind etwa weitere Anstrengungen denkbar, die den

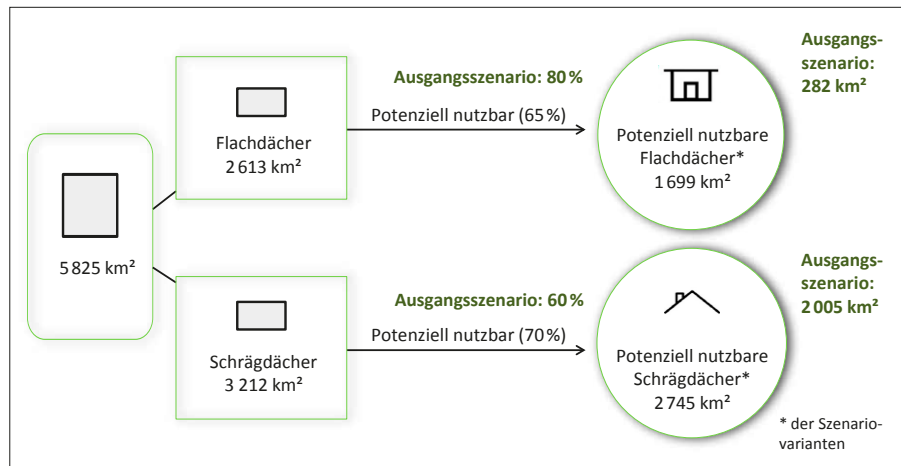


Abb. 5: Potenziell nutzbare Dachflächen in den Szenariovarianten differenziert nach Schräg- und Flachdächern und verglichen mit dem Ausgangsszenario. Die Rechtecke zeigen Grundflächen der jeweiligen Dachtypen, die Kreise zeigen die potenziell hiervon nutzbare Fläche für Dach-Photovoltaik.

Fig. 5: Potentially usable roof areas in the scenario variants differentiated by pitched and flat roofs and compared with the initial scenario. The rectangles show the ground areas of the respective roof types, the circles show the potentially usable area for rooftop photovoltaics.

Energiebedarf reduzieren können. Darüber hinaus kann PV als sehr flexible Technologie mit hoher Flächeneffizienz in Form von Freiflächen-PV genutzt werden. Hierfür wurden von Badelt et al. (2020) große Flächenpotenziale in Niedersachsen ermittelt, die bei sorgfältiger Planung im Einklang mit Mensch und Natur genutzt werden können. Weitere Energiepotenziale einzubeziehen ist auch deshalb zu empfehlen, weil Pfadabweichungen in der Energiewende abgepuffert werden müssen und gleichzeitig Entscheidungsräume für die Bürgerbeteiligung vor Ort eröffnet werden sollten.

5 Schlussfolgerungen

Die Untersuchung zeigt, dass Zielkonflikte zwischen der Energiewende und dem Schutz von Mensch und Natur durch eine Beschränkung von Energieerzeugungsanlagen auf Flächen mit geringem RWS gelöst werden können. Die räumliche Modellierung hat sich als geeignetes Mittel erwiesen, diese Anforderungen zu kombinieren und Entwicklungspfade aufzuzeigen. Weitere Szenarien könnten genutzt werden, um zusätzliche Themenfelder des Transformationsprozesses räumlich abzubilden wie z. B. den nötigen Netzausbau oder die Nutzung von Wasserstoff als Speichermöglichkeit. Die dargestellten Stellschrauben zeigen auf, wo die Zielerreichung der Energiewende stärker gesteuert werden muss, z. B. über gesetzliche Vorgaben oder Förderinstrumente hin zur Technologieförderung (Leistungsfähigkeit, Naturverträglichkeit) und Standortsteuerung (Nutzung der Dachflächen und der

Flächen mit geringem RWS). Insgesamt ist die gegenwärtige Energiepolitik in Deutschland noch sehr weit von den ambitionierten Annahmen der Szenarien entfernt. Die derzeit etablierten Energieerzeugungspfade im Klimaschutzgesetz 2019 reichen nicht aus, um den Herausforderungen einer Energieversorgung im Einklang mit Mensch und Natur gerecht zu werden (siehe BVerfG 2021).

Regionale Mindestziele für EE-Strom und damit die lokale Verantwortung für die Energiewende lassen sich aus dem Modell ableiten, um in der Summe das nationale Ziel zu erfüllen. Die bundeseinheitlich ermittelten Potenzialflächen würden regionale Entscheidungsspielräume eröffnen und z. B. im Planungsprozess verdeutlichen, welche Möglichkeiten jede Gemeinde hat, die Energiewende hinsichtlich des EE-Mixes und der räumlichen Verteilung der Anlagen zu gestalten. Damit können Teilhabe und Akzeptanz in der Bevölkerung und die politische Entscheidungsfindung gefördert werden. Solange die lokale Energieeinsparung und -erzeugung die bundesweiten Ziele erreichen, haben die lokalen Entscheidungsträger Flexibilität. Die Szenarioergebnisse zeigen auch, dass jede Gemeinde verantwortlich ist, ihren Beitrag zur Energiewende tatsächlich zu leisten.

Ergibt das Monitoring, dass der Energiewendeprozess von den berechneten Pfaden abweicht, könnten weitere Komponenten zur Steuerung einbezogen werden. Wenn dazu Energieimporte gehören sollen, sollten diese jedoch den gleichen Nachhaltigkeitskriterien unterworfen werden wie die in Deutschland erzeugte Energie.

6 Literatur

- AEE/Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (2018): Klares Bekenntnis der deutschen Bevölkerung zu Erneuerbaren Energien. 5. Oktober 2018. <https://www.unendlich-viel-energie.de/klares-bekanntnis-der-deutschen-bevoelkerung-zu-erneuerbaren-energien> (aufgerufen am 15.6.2020).
- Allen P., Varga L. (2014): Modelling sustainable energy futures for the UK. *Futures* 57: 28–40. DOI: 10.1016/j.futures.2014.01.005
- Badelt O., Niepelt R. et al. (2020): Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE). Institut für Solarenergieforschung GmbH, Leibniz Universität Hannover, Institut für Festkörperphysik. Hannover: 235 S.
- Barrington-Leigh C., Ouliaris M. (2017): The renewable energy landscape in Canada. A spatial analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75: 809–819. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.061
- BKG/Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (o.J.): 3D-Gebäudemodelle LoD2 Deutschland (LoD2-DE). <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/3d-gebauedemodell-lod2-deutschland-lod2-de.html> (aufgerufen am 29.4.2021).
- BKG/Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2018): Digitale Geländemodelle. <https://www.bkg.bund.de/DE/Produkte-und-Services/Shop-und-Downloads/Digitale-Geodaten/Gelaendemodelle/gelaendemodell> (aufgerufen am: 11.1.2019).
- BMU/Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. BMU. Berlin: 178 S.
- BMVI/Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.) (2015): Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland. BMVI-Online-Publikation Nr.08/2015. BMVI. Berlin: 225 S.
- Böttger D., Dreher A. et al. (2019): SYSTEMKONTEXT: Modellbildung für nationale Energieversorgungsstrukturen im europäischen Kontext unter besonderer Berücksichtigung der Zulässigkeit von Vereinfachungen und Aggregationen. Fraunhofer IEE. Kassel: 191 S.
- Brendel R., Niepelt R. (2018): Kurzgutachten Photovoltaik zum Workshop I – Schwerpunkt Technologieentwicklung bis 2050 für das Projekt „Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050“. In: Walter A., Wiehe J. et al. (Hrsg.): Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050. Anhang zum BfN-Skript 501: 82–110.
- Brunotte E., Dister E. et al. (2009): Flussauen in Deutschland. Erfassung und Bewertung des Auenzustandes. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 87: 141 S.
- Busch M., Trautmann S., Gerlach B. (2016): Zuweisung von CORINE-Landnutzungsklassen als Bruthabitat windenergiesensibler Vogelarten. Unveröffentlichte Tabelle.
- Busch M., Trautmann S., Gerlach B. (2017): Overlap between breeding season distribution and wind farm risks: A spatial approach. *Vogelwelt* 137(2): 169–180.
- BVerfG/Bundesverfassungsgericht (2021): Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021 – BvR 2656/18, Rn. 1–270.
- Deutsche WindGuard GmbH (2020): Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland. Jahr 2020. Deutsche WindGuard GmbH. Varel: 14 S.
- Drechsler M., Egerer J. et al. (2017): Efficient and equitable spatial allocation of renewable power plants at the country scale. *Nature Energy* 2(9): 289. DOI: 10.1038/nenergy.2017.124
- FA Wind/Fachagentur Windenergie an Land (2019): Überblick zu den Abstandsempfehlungen zur Ausweisung von Windenergiegebieten in den Bundesländern. FA Wind. Berlin: 11 S.
- Fuchs D., Hänel K. et al. (2010): Länderübergreifender Biotopverbund in Deutschland. Grundlagen und Fachkonzept. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 96: 191 S.
- Gauglitz P., Schicketanz S., Pape C. (2019): Nature conservation as a driver in wind energy scenarios. *Energy, Sustainability and Society* 9(1): 437. DOI: 10.1186/s13705-019-0233-0
- Gedeon K., Grünberg C. et al. (2014): Atlas Deutscher Brutvogelarten. Stiftung Vogelmonitoring Deutschland, Dachverband Deutscher Avifaunisten. Münster: 800 S.
- Ghorbani N., Aghahosseini A., Breyer C. (2017): Transition towards a 100 % renewable energy system and the role of storage technologies. A case study of Iran. *Energy Procedia* 135: 23–36. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.484
- Glaser F., Hauke U. (2004): Historisch alte Waldstandorte und Hudewälder in Deutschland. Ergebnisse bundesweiter Auswertungen. *Angewandte Landschaftsökologie* 61: 194 S.
- Güngör-Demirci G. (2015): Spatial analysis of renewable energy potential and use in Turkey. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 7(1): 13–126. DOI: 10.1063/1.4907921
- Günther J., Lehmann H. et al. (2019): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau: 70 S.
- Hermes J. (in Vorb.): Dataset: KOeSL-Ergebnisse-Geodaten (aktualisiert). Forschungsdaten-Repository der LUH.
- Hermes J., Albert C., Haaren C. von (2018): Assessing the aesthetic quality of landscapes in Germany. *Ecosystem Services* 31: 296–307. DOI: 10.1016/j.ecoser.2018.02.015
- IPBES/Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (2019): Nature's dangerous decline "unprecedented". Media Release. <https://ipbes.net/news/Media-Release-Global-Assessment> (aufgerufen am 19.1.2021).
- Kaltschmitt M., Wiese A. (1993): Erneuerbare Energieträger in Deutschland. Potentiale und Kosten. Springer. Berlin: 370 S.
- Klaus T., Vollmer C. et al. (2010): Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau: 193 S.
- LAG VSW/Länderarbeitsgemeinschaft der Vogelschutzwarten (2014): Abstandsempfehlungen für Windenergieanlagen zu bedeutsamen Vogellebensräumen sowie Brutplätzen ausgewählter Vogelarten (Stand April 2015). *Berichte zum Vogelschutz* 51: 15–42.
- Lödl M., Kerber G. et al. (2010): Abschätzung des Photovoltaik-Potentials auf Dachflächen in Deutschland. 11. Symposium Energieinnovation, 10.–12.2.2010. Graz: 14 S.
- Lütkehus I., Salecker H., Adlunger K. (2013): Potenzial der Windenergie an Land. Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und

Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau: 48 S.

Mainzer K., Fath K. et al. (2014): A high-resolution determination of the technical potential for residential-roof-mounted photovoltaic systems in Germany. *Solar Energy* 105: 715–731. DOI: 10.1016/j.solener.2014.04.015

Matthes F., Flachsbarth F. et al. (2018): Zukunft Stromsystem II. Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung. Vom Ziel her denken. WWF Deutschland. Berlin: 160 S.

Meyer T. (2018): Analysis and comparison of optimization algorithms and placing principles for the wind farm layout optimization. Masterarbeit. Hochschule Flensburg: 134 S.

OpenGeodata.NRW (2019): 3D-Gebäudemodell im LoD2 CityGML paketiert nach Kreisen. https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/3d-gm/3d-gm_lod2/ (aufgerufen am 15.8.2019).

Riedl U., Stemmer B. et al. (2020): Szenarien für den Ausbau der erneuerbaren Energien aus Naturschutzsicht. BfN-Skripten 570: 283 S.

Rinne E., Holttinen H. et al. (2018): Effects of turbine technology and land use on wind power resource potential. *Nature Energy* 3(6): 494–500. DOI: 10.1038/s41560-018-0137-9

Rosenthal G., Mengel A. et al. (2015): Umsetzung des 2 %-Ziels für Wildnisgebiete aus der Nationalen Biodiversitätsstrategie. Abschlussbericht des gleichnamigen F + E-Vorhabens (FKZ 3512 85 0300 unter Integration von Zusatzauswertungen, FKZ 3515 85 0900). BfN-Skripten 422: 1 207 S.

Sternier M., Eckert F. et al. (2017): Speicherbedarf im Verkehrs- und Chemie-sektor. In: Sternier M., Stadler I. (Hrsg.): Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration. 2. Aufl. Springer Vieweg. Berlin: 169–192.

Thiele J., Wiehe J., Haaren C. von (2021): Areas with low and medium spatial vulnerability to a prototype wind turbine. Dataset. Institut für Umweltplanung. Leibniz Universität Hannover. DOI: 10.25835/0072778

UBA/Umweltbundesamt (Hrsg.) (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. UBA. Dessau-Roßlau: 354 S.

Walter A., Wiehe J. et al. (2018): Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050. BfN-Skripten 501: 160 S.

WWF/World Wide Fund For Nature (2009): Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Prognos AG, Öko-Institut e.V. Basel, Berlin: 495 S.

Förderung

Die Berechnung der Szenariovarianten fand im Rahmen des Projekts „Konkretisierung von Ansatzpunkten einer naturverträglichen Ausgestaltung der Energiewende, mit Blick auf strategische Stellschrauben (EE100-konkret)“ statt, das vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) gefördert wurde (FKZ 3515 82 4300).

Dr. Julia Thiele
Korrespondierende Autorin
Leibniz Universität Hannover
Institut für Umweltplanung
Herrenhäuser Straße 2
30419 Hannover
E-Mail: thiele@umwelt.uni-hannover.de



Die Autorin ist seit 2015 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Umweltplanung der Leibniz Universität Hannover und bearbeitet Forschungsprojekte zu den Themenfeldern Ökosystemleistungen (ÖSL) und Ausgestaltung der Energiewende. Sie studierte Geographie an der Humboldt-Universität zu Berlin und promovierte zum Thema Bewertung kultureller ÖSL von Flusslandschaften.

Dr. Julia Wiehe
Leibniz Universität Hannover
Institut für Umweltplanung
Herrenhäuser Straße 2
30419 Hannover
E-Mail: wiehe@umwelt.uni-hannover.de

Philip Gauglitz
Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft
und Energiesystemtechnik IEE
Königstor 59
34119 Kassel
E-Mail: philip.gauglitz@iee.fraunhofer.de

Clemens Lohr
Leibniz Universität Hannover
Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)
Fachgebiet Elektrische Energiespeichersysteme
Appelstraße 9a
30167 Hannover
E-Mail: lohr@ifes.uni-hannover.de

Dr. Astrid Bensmann
Leibniz Universität Hannover
Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)
Fachgebiet Elektrische Energiespeichersysteme
Appelstraße 9a
30167 Hannover
E-Mail: astrid.bensmann@ifes.uni-hannover.de

Prof. Dr. Richard Hanke-Rauschenbach
Leibniz Universität Hannover
Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)
Fachgebiet Elektrische Energiespeichersysteme
Appelstraße 9a
30167 Hannover
E-Mail: rhr@ifes.uni-hannover.de

Prof. Dr. Christina von Haaren
Leibniz Universität Hannover
Institut für Umweltplanung
Herrenhäuser Straße 2
30419 Hannover
E-Mail: haaren@umwelt.uni-hannover.de

Anzeige

**Igel
im Garten?**
Das braucht er:
kostenloses Faltblatt anfordern unter www.lbv.de/igel

Foto: Andreas Glesler