

## Gerechtigkeit im EE-Ausbau: Erneuerbare gerecht in die Fläche bringen. Verteilungslogiken, algorithmische Ansätze und Konsensräume.

Teilvorhaben Power, Big pictures and participation des Gesamtvorhabens  
EmPowerPlan: Regionale Planung der Energiewende – Partizipation und  
Gerechtigkeit vor Ort und das große Ganze im Blick

Juli 2025

### Autorinnen und Autoren

Dr. Marion Wingenbach  
Öko-Institut e.V.

Franziska Flachsbarth  
Öko-Institut e.V.

Johannes Aschauer  
Öko-Institut e.V.

Christian Winger  
Öko-Institut e.V.

### Kontakt

[m.wingenbach@oeko.de](mailto:m.wingenbach@oeko.de)  
[www.oeko.de](http://www.oeko.de)

### Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71  
79017 Freiburg

### Hausadresse

Merzhauser Straße 173  
79100 Freiburg  
Telefon +49 761 45295-0

### Büro Berlin

Borkumstraße 2  
13189 Berlin  
Telefon +49 30 405085-0

### Büro Darmstadt

Rheinstraße 95  
64295 Darmstadt  
Telefon +49 6151 8191-0

Diese Publikation wurde erstellt im Rahmen des vom BMWK finanzierten Forschungsprojekts „EmPowerPlan: Regionale Planung der Energiewende - Partizipation und Gerechtigkeit vor Ort und das große Ganze im Blick“. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Die im Rahmen dieser Publikation entwickelten Regionalisierungsszenarien sind als open source Datensatz unter <https://doi.org/10.5281/zenodo.15188220> veröffentlicht (Wingenbach et al. 2025).

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>I</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2 Berechnungsvorschriften für räumliche Verteilung von EE-Anlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Gleichverteilte Belastung als Grundlage	5
2.2 Gerechtigkeitsmetriken	6
<b>3 Potentialflächen</b>	<b>13</b>
3.1 Windenergie Potentialfläche	13
3.2 Freiflächen-Photovoltaik Potentialfläche	14
3.3 Potentialflächen für Aufdach-Photovoltaik	16
3.4 Potentialfläche durch Negativ- und Positivplanungen	17
<b>4 Verteilalgorithmus</b>	<b>17</b>
4.1 Rasterdatenbank	17
4.2 Gleichverteilungslogik	19
4.2.1 Der Algorithmus: Grundprinzip der Gleichverteilung	20
4.2.2 Die Eingangsdaten zur Parametrierung	22
4.2.3 Bewertung der Ergebnisse: Die Güte der Gleichverteilung	24
<b>5 Ergebnisse Regionalisierungsszenarien</b>	<b>24</b>
5.1 Ausbauempfehlungen Wind onshore auf Rasterebene: Deutschlandweite Verteilung	25
5.2 Ausbauempfehlung FF-PV auf Rasterebene: Deutschlandweite Verteilung	28
<b>6 Übertragung der Gleichverteilung von Rasterzellen auf Gemeindeebene</b>	<b>32</b>
6.1 Methodik	32
6.2 Ergebnisse	35
6.2.1 Deutschlandweite Ausbauempfehlungen Wind onshore auf Gemeindeebene	35
6.2.2 Deutschlandweite Ausbauempfehlungen PV-FF auf Gemeindeebene	39
6.3 Fazit zur Übertragung auf Gemeindeebene	42
<b>7 Synthese: Zusammenführung der Gerechtigkeitsaspekte</b>	<b>42</b>
7.1 Das Prinzip der Überlagerung	43
7.2 Auswertung der Überlagerung	44
7.3 Ergebnisse der Konsensfindung	46
7.3.1 Wind: Überlagerung von zwei Gerechtigkeitsvorstellungen	47

---

7.3.2	Wind: Überlagerung mehrerer Gerechtigkeitsvorstellungen – Konsensräume im Vergleich	50
7.3.3	PV-FF: Überlagerung von zwei Gerechtigkeitsvorstellungen	54
7.3.4	PV-FF: Überlagerung mehrerer Gerechtigkeitsvorstellungen – Konsensräume im Vergleich	57
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>62</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Regionsbezogener Belastungsgrad	5
Abbildung 3-1: Potentialflächen Wind onshore - RLI mit 7 m/s (links) und 6,5 m/s (rechts)	14
Abbildung 3-2: Potentialflächen PV Freifläche: Agri-PV bifazial (links), Agri-PV Dauerkulturen (Mitte) und FF-PV (rechts)	15
Abbildung 4-1: Schema des Gleichverteilungsalgorithmus	21
Abbildung 5-1: Wind onshore Verteilungen für Deutschland auf Rasterebene	25
Abbildung 5-2: Wind onshore Verteilungen für Deutschland auf Rasterebene im Detail	26
Abbildung 5-3: Güte der gegensätzlichen Verteilungen: Wind bevölkerungsnah (links) und bevölkerungsfern (rechts)	27
Abbildung 5-4: Wind onshore Verteilungen für Oderland-Spree auf Rasterebene	28
Abbildung 5-5: PV-FF Verteilungen für Deutschland auf Rasterebene	29
Abbildung 5-6: PV-FF Verteilungen für Deutschland auf Rasterebene im Detail	29
Abbildung 5-7: Güte der gegensätzlichen Verteilungen: PV-FF bevölkerungsnah (links) und bevölkerungsfern (rechts)	30
Abbildung 5-8: Wind onshore Verteilungen für Oderland-Spree auf Rasterebene	31
Abbildung 6-1: Deutschlandweite Ausbauempfehlungen für Wind onshore auf Gemeindeebene je Gerechtigkeitsmetrik	36
Abbildung 6-2: Wind onshore Verteilungen für Oderland-Spree auf Gemeindeebene – nach Potentialfläche	37
Abbildung 6-3: Wind onshore Verteilungen für Oderland-Spree auf Gemeindeebene – Min-Prinzip (oben) und Max-Prinzip (unten)	38
Abbildung 6-4: PV-FF Verteilungen für Deutschland auf Gemeindeebene	39
Abbildung 6-5: PV-FF Verteilungen für Oderland-Spree auf Gemeindeebene	40
Abbildung 6-6: PV-FF Verteilungen für Oderland-Spree auf Gemeindeebene – Min-Prinzip (oben) und Max-Prinzip (unten)	41
Abbildung 7-1: Schematische Überlagerung verschiedener Gerechtigkeitsvorstellungen	43
Abbildung 7-2: Das Minimum bestimmt den minimalen Konsens zwischen verschiedenen Gerechtigkeitsvorstellungen	45
Abbildung 7-3: Ausbaukonsens Wind: Überlagerung Verbrauchsnah und Bevölkerungsfern für alle Gemeinden	48

Abbildung 7-4:	Ausbaukonsens Wind: Überlagerung Verbrauchsnah und Bevölkerungsnah für alle Gemeinden	49
Abbildung 7-5:	Ausbaukonsens Wind: Überlagerung Bevölkerungsfern, Bevölkerungsnah und gleicher Anteil an Potentialfläche für alle Gemeinden	51
Abbildung 7-6:	Ausbaukonsens Wind: Überlagerung Bevölkerungsnah, Verbrauchsnah und gleicher Anteil an Gesamtfläche für alle Gemeinden	51
Abbildung 7-7:	Ausbaukonsens Wind: Überlagerung Bevölkerungsfern, Bevölkerungsnah, Verbrauchsnah und gleicher Anteil an Gesamtfläche für alle Gemeinden	52
Abbildung 7-8:	Ausbaukonsens Wind: Überlagerung Bevölkerungsfern, Bevölkerungsnah, Verbrauchsnah, gleicher Anteil an Gesamtfläche und Potentialfläche für alle Gemeinden	53
Abbildung 7-9:	Ausbaukonsens Wind für Oderland-Spree: Überlagerung Bevölkerungsfern, Bevölkerungsnah, Verbrauchsnah, gleicher Anteil an Gesamtfläche und Potentialfläche für alle Gemeinden	54
Abbildung 7-10:	Ausbaukonsens PV-FF: Überlagerung Verbrauchsnah und Bevölkerungs-fern für alle Gemeinden	56
Abbildung 7-11:	Ausbaukonsens FF-PV: Überlagerung Verbrauchsnah und Bevölkerungs-nah für alle Gemeinden	56
Abbildung 7-12:	Ausbaukonsens FF-PV: Überlagerung Bevölkerungsfern, Bevölkerungs-nah und gleicher Anteil an Potentialfläche für alle Gemeinden	58
Abbildung 7-13:	Ausbaukonsens PF-FF: Überlagerung Bevölkerungsfern, gleicher Anteil an Gesamtfläche und gleicher Anteil an Potentialfläche für alle Gemeinden	59
Abbildung 7-14:	Ausbaukonsens PV-FF: Überlagerung Bevölkerungsfern, Bevölkerungs-nah, Verbrauchsnah und gleicher Anteil an Gesamtfläche für alle Gemeinden	60
Abbildung 7-15:	Ausbaukonsens PV-FF: Überlagerung Bevölkerungsfern, Bevölkerungs-nah, Verbrauchsnah, gleicher Anteil an Gesamtfläche und Potentialfläche für alle Gemeinden	61
Abbildung 7-16:	Ausbaukonsens PV-FF für Oderland-Spree: Überlagerung Bevölkerungsfern, gleicher Anteil an Gesamtfläche und Potentialfläche für alle Gemeinden	62

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Berechnungsvorschriften für gesammelte Gerechtigkeitsvorstellungen	7
Tabelle 4-1: Ausbauziele: Installierte Leistung je EE-Technologie in 2045	22
Tabelle 4-2: Flächenziele je Bundesland für Wind und FF-PV	23
Tabelle 4-3: Flächenverbräuche der EE-Technologien	23
Tabelle 6-1: Installierte Leistungen Wind onshore in GW für Oderland-Spree	37
Tabelle 6-2: Installierte Leistungen PV-FF in GW für Oderland-Spree	40
Tabelle 7-1: Überlagerung durch Minimum	45
Tabelle 7-2: Überlagerung durch Euklidische Distanzen	46
Tabelle 7-3: Ausbaukonsens Wind: Schnittmenge aus zwei Flächen	47
Tabelle 7-4: Euklidische Distanzen Wind: Unterschiede zwischen jeweils zwei Flächen	50
Tabelle 7-5: Ausbaukonsens Wind: Schnittmenge aus drei Flächen	50
Tabelle 7-6: Ausbaukonsens Wind: Schnittmenge aus vier Flächen	52
Tabelle 7-7: Ausbaukonsens PV-FF: Schnittmenge aus zwei Flächen	55
Tabelle 7-8: Euklidische Distanzen PV-FF: Unterschiede zwischen jeweils zwei Flächen	57
Tabelle 7-9: Ausbaukonsens PV-FF: Schnittmenge aus drei Flächen	58
Tabelle 7-10: Ausbaukonsens PV-FF: Schnittmenge aus vier Flächen	60

## Abkürzungsverzeichnis

BWS	Bruttowertschöpfung
CLS	Corine-Land-Cover
EE	Erneuerbare Energien
FF	Freiflächen
GW	Gigawatt
KRK	Konfliktrisikoklassen
LAEA	Lambert Azimuthal Equal Area
PV	Photovoltaik
RLI	Reiner Lemoine Institut
WindBG	Windenergieflächenbedarfsgesetz

## Zusammenfassung

Der Ausbau Erneuerbarer Energien (EE) im Rahmen der Energiewende stellt nicht nur eine technische und ökonomische Herausforderung dar, sondern wirft auch fundamentale Fragen der Gerechtigkeit auf. Der vorliegende Bericht stellt eine Methodik vor, um unterschiedliche Gerechtigkeitsmetriken bei der räumlichen Verteilung von EE-Anlagen in algorithmischer Form zu operationalisieren und auf Konsensfähigkeit hin zu analysieren. Im Zentrum steht die Frage: Wo können Erneuerbare Energien so ausgebaut werden, dass möglichst viele gesellschaftliche Vorstellungen von Fairness gleichzeitig erfüllt werden?

Der Bericht integriert theoretische Gerechtigkeitskonzepte, modelliert exemplarische Verteilungen und zeigt auf, welche Flächenkombinationen Konsensräume darstellen. Dabei wird sichtbar, welche Gerechtigkeitsvorstellungen am restriktivsten wirken und wo gesellschaftliche Kompromisse möglich sind. Ergänzend wird diskutiert, welche weiteren Gerechtigkeitsdimensionen – etwa Besitzstand, Partizipation oder Präferenzgewichtung – bislang unberücksichtigt blieben und Forschungsbedarf darstellen.

Der Ansatz liefert ein robustes Werkzeug zur Verteilungsanalyse und stellt eine innovative Verbindung zwischen sozialwissenschaftlicher Theorie, raumbezogener Planung und politischer Entscheidungsunterstützung dar.



## 1 Einführung

### Gerechtigkeit in der räumlichen Verteilung erneuerbarer Energien

Die Idee der Gerechtigkeit ist ein zentrales Thema der politischen Philosophie – von Platon, der in seiner Politeia (Platon 1855) das gerechte Gemeinwesen als harmonisches Ganzes beschreibt, bis hin zu John Rawls, der mit seiner Theorie der Gerechtigkeit als Fairness ein bis heute einflussreiches Modell sozialer Gerechtigkeit entworfen hat (Rawls 1971). Während bei Aristoteles Gerechtigkeit als die tugendhafte Mitte zwischen zu viel und zu wenig verstanden wird, verschiebt sich mit der Aufklärung der Fokus zunehmend auf Chancengleichheit, Rechte und Verfahrensgerechtigkeit (Gerke 2008).

Rawls (1971) prägte zwei fundamentale Prinzipien: erstens die gleiche Freiheit für alle und zweitens soziale und wirtschaftliche Ungleichheiten nur dann zuzulassen, wenn sie zum Vorteil der am wenigsten Begünstigten wirken (Differenzprinzip). Weitere wichtige Strömungen sind etwa Amartya Sen's (2002) Fokus auf Verwirklichungschancen (Capabilities), sowie die Verfahrensgerechtigkeit bei Habermas (1987), die auf Diskurs und Teilhabe setzt. Auch Umweltgerechtigkeit wurde als eigenständiges Konzept entwickelt, das insbesondere ungleiche Betroffenheit durch Umweltbelastungen adressiert.

In der Klimagerechtigkeitsdebatte wurden diese Prinzipien im Hinblick auf den Beitrag verschiedener Akteure zum Klimaschutz konkretisiert: Besitzstandsgerechtigkeit als Prinzip der historischen Verantwortung fordert, dass historische Emissionen und bereits geleistete Beiträge anerkannt werden. Leistungsgerechtigkeit argumentiert, dass Staaten oder Regionen gemäß ihrer wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit zum Klimaschutz beitragen sollen. Das Gleichheitsprinzip schließlich basiert auf der Vorstellung gleicher Pro-Kopf-Emissionsrechte oder gleichmäßiger Lastenverteilung (Knight und Le Merle 2023). Diese drei Prinzipien – Besitzstand, Leistung, Gleichheit – bilden auch die normative Grundlage für viele Überlegungen zur gerechten Verteilung von erneuerbarer Energieinfrastruktur:

- **Besitzstandsgerechtigkeit:** Berücksichtigt bisherige Beiträge oder Belastungen – wer in der Vergangenheit stark zum Ausbau beigetragen hat, sollte heute entlastet werden.
- **Leistungsgerechtigkeit:** Orientiert sich an der Leistungsfähigkeit – wer wirtschaftlich stark ist oder hohe Potentiale hat, soll mehr tragen.
- **Gleichheitsprinzip:** Strebt eine gleichmäßige Verteilung von Lasten oder Nutzen an – etwa gleiche Ausbauleistung pro Einwohner oder Fläche.

Eine weitere Systematisierung von Prinzipien bei der räumlichen Verteilung von EE-Anlagen liefern Lehmann et al. (2024), deren Konzept vier idealtypische Gerechtigkeitsprinzipien unterscheidet:

- **Bedürfnisprinzip (Needs Principle):** Regionen mit strukturellen Nachteilen oder wirtschaftlichen Entwicklungsdefiziten sollen mehr von den Vorteilen der Energiewende profitieren. Dieses Prinzip zielt auf das Verhältnis zwischen den individuellen Bedürfnissen einer Region und dem lokalen (Netto-)Nutzen, den sie aus dem EE-Ausbau zieht.

- **Verdienstprinzip (Merit Principle):** Regionen, die bereits stark zum EE-Ausbau beigetragen haben, sollen auch stärker von den daraus entstehenden Erträgen profitieren. Dies entspricht der Idee einer leistungsorientierten Belohnung.
- **Leistungsprinzip (Ability Principle):** Der Beitrag einer Region zum Ausbau sollte sich an deren Kapazität und Potentialen orientieren, z. B. Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung oder Flächenverfügbarkeit.
- **Nutzenprinzip (Benefit Principle):** Regionen, die besonders stark von EE profitieren – z. B. durch hohe Stromnachfrage – sollten auch mehr Verantwortung für den Ausbau übernehmen.

Diese Prinzipien stehen teilweise in Spannung zueinander. So kann das Bedürfnisprinzip gezielten Förderbedarf für strukturschwache Regionen anzeigen, während das Leistungsprinzip eher auf Potentiale in ohnehin bereits leistungsstarken Regionen verweist. Das Nutzenprinzip hingegen legt eine Nähe zum Stromverbrauch nahe, was ökonomischen Optimierungszielen entspricht.

Eine breitere Systematisierung möglicher Gerechtigkeitsprinzipien bietet Heyen (2022), der zentrale normative Bezugspunkte entlang dreier Hauptkategorien – Gleichheit, Proportionalität und Mindestschwellen – mit je mehreren Unterprinzipien unterscheidet. Diese reichen von klassischen Gleichheitsvorstellungen (z. B. gleiches Ergebnis, gleiche Rechte oder gleiche Fähigkeiten) über proportionalitätsbasierte Prinzipien (z. B. nach Leistung, Bedürftigkeit, historischer Verantwortung oder Fähigkeit zur Lastentragung) bis hin zu Ansätzen, die Mindeststandards wie grundlegende Rechte oder ein Existenzminimum sichern sollen. Die differenzierte Kategorisierung hilft, bestehende Ungleichheiten systematisch zu analysieren und gegen verschiedene Gerechtigkeitsmaßstäbe zu spiegeln. Die im Projekt verfolgte Operationalisierung einzelner Gerechtigkeitsmetriken lässt sich im Lichte dieser Typologie verorten – sie fokussiert vor allem auf Gleichheits- und Proportionalitätsprinzipien, wie z. B. gleichmäßige Belastung, Nutzung vorhandener Potentiale oder Nähe zu Verbrauchszentren. Eine explizitere Auseinandersetzung mit dieser Vielfalt an Gerechtigkeitsprinzipien, wie sie Heyen vorschlägt, könnte künftige Forschungsvorhaben dabei unterstützen, konkurrierende normative Perspektiven systematisch zu berücksichtigen und mögliche Zielkonflikte transparenter zu machen.

In der Energiesystemmodellierung wurde Gerechtigkeit lange Zeit kaum berücksichtigt. Erst in den letzten zehn Jahren entwickelte sich ein Diskurs darüber, wie normative Prinzipien quantifizierbar gemacht und in technische Modelle integriert werden können. Dabei verschiebt sich der Fokus von ökonomischer Effizienz zu multidimensionalen Optimierungszielen, die auch soziale und ökologische Kriterien einbeziehen. Christ et al. (2016) zeigten in einem frühen Beitrag, dass sozial-ökologische Kriterien die Standortwahl für Windenergie erheblich verschieben können. Ihre Szenarien führten zu einer Verlagerung von Kapazitäten von Nordwest- nach Südostdeutschland. Christ et al. (2017) liefern eine erste systematische Analyse der Bürgerbeteiligung unter Gerechtigkeitsaspekten. Der Fokus lag auf den Erwartungen der Bevölkerung an faire Lastenverteilung und transparente Prozesse. Eine Vergleichsstudie zur Akzeptanz dezentraler Energiesysteme in der Schweiz, Deutschland und Österreich zeigt die Bedeutung von wahrgenommener Verantwortung und technologischer Nähe für Gerechtigkeitsempfinden (Seidl et al. 2019). Neumann (2021) analysierte die Kosten von regionaler Gerechtigkeit und Autarkie im europäischen Stromsystem. Auch hier zeigte sich: Eine gerechtere Verteilung ist möglich – zu moderaten Kosten. Flachsbarth et al. (2021) untersuchten verschiedene Verteilungsszenarien für Windenergie in Deutschland (ökonomisch, sozial-ökologisch, dezentral) und deren Auswirkungen auf den Netzausbau. Sie forderten eine stärkere Integration sozialer Faktoren in



Energiesystemmodelle und betonten deren politische Relevanz. Levenda et al. (2021) sowie Haldar et al. (2025): zeigten, dass Disamenity-Kosten (z. B. Lärmbelastung, Sichtbeeinträchtigung) sowie Gleichheitsziele modellierbar sind. Der soziale Kompromiss ist oft mit nur geringen ökonomischen Einbußen verbunden, kann aber die Belastung einzelner Regionen deutlich reduzieren.

Gerechtigkeit in der räumlichen Verteilung erneuerbarer Energien ist heute ein anerkanntes Forschungsfeld an der Schnittstelle von Technik, Gesellschaft und Politik. Die Herausforderung besteht darin, normative Konzepte wie Fairness, Gleichheit und Teilhabe in quantifizierbare, Haldar et al. (2025)modellierbare Größen zu überführen, ohne dabei ihre ethische Tiefe zu verlieren. Die bisherigen Arbeiten zeigen, dass dies möglich ist. Sie liefern Methoden, Daten und Konzepte, um Gerechtigkeit nicht nur zu diskutieren, sondern als Zielgröße in Systemmodelle zu integrieren. Die Debatte steht dennoch am Anfang. Zukünftige Forschung muss insbesondere die Vielfalt gesellschaftlicher Vorstellungen über Gerechtigkeit noch besser erfassen, regionale Unterschiede systematisch abbilden und qualitative wie partizipative Verfahren mit quantitativen Modellen verknüpfen. Gerechtigkeit ist keine externe Nebenbedingung für das Energiesystem. Sie ist integraler Bestandteil seiner Legitimität und Transformationskraft.

## **Ziel der Studie**

Das Teilprojekt „Power“ innerhalb des Gesamtvorhabens „EmPowerPlan: Regionale Planung der Energiewende- Partizipation und Gerechtigkeit vor Ort und das große Ganze im Blick“ hatte das Ziel, eine wissenschaftlich fundierte und gerechte Regionalisierung von Erneuerbare-Energien-Anlagen zu entwickeln. Es wurden verschiedene Aspekte der räumlichen Verteilung von EE-Anlagen unter Berücksichtigung von Gerechtigkeitskriterien untersucht. Ein zentraler Bestandteil des Projekts war die Entwicklung von regionalisierten Strommarktszenarien für Deutschland, die sowohl wirtschaftliche, klimapolitische als auch soziale Aspekte integrieren. Ziel war es, eine wissenschaftlich fundierte Bewertungsgrundlage für eine gerechte und akzeptanzorientierte Verteilung von EE-Anlagen zu schaffen.

Dabei ist wichtig zu betonen: Die Potentialfläche, auf der der entwickelte, gerechte Verteilalgorithmus aufsetzt, enthält bereits ökonomische Kriterien, etwa Mindestwindgeschwindigkeiten, technische Erschließbarkeit oder Synergiepotentiale. Sie bildet keine rein normative, sondern eine technisch-ökonomisch sinnvolle Grundlage. Gerechtigkeitsmetriken ergänzen diese Potentialfläche um gesellschaftliche Zielvorstellungen, z. B. eine gleichmäßige Belastung oder eine stärkere Beteiligung wirtschaftlich schwächerer Regionen. Mehrkosten, die dadurch entstehen, sind im Gesamtkontext der Energiewende zu betrachten und stehen in einem angemessenen Verhältnis zum gesellschaftlichen Gewinn an Akzeptanz, Transparenz und Gerechtigkeit.

Konkret wurden in der vorliegenden Untersuchung folgende Ziele erreicht:

- Definition von Potentialflächen für Wind onshore und PV-Freifläche
  - Prüfung, Aktualisierung und Erhebung von Potentialflächen für Wind- und PV-Anlagen
  - Kritische Auseinandersetzung mit Potentialflächen & Gerechtigkeit
  - Bereitstellung von open source Potentialflächen für PV-Freifläche
- Entwicklung eines gerechten Verteilungsmodells für EE-Anlagen (Wind onshore, PV-Freifläche)

- Zur Zielerreichung wurden verschiedene, sich auch widersprechende Gerechtigkeitsvorstellungen in Bezug auf die regionale Verteilung von Wind onshore- und PV-Freiflächenanlagen gesammelt. Dabei wurden beispielsweise bevölkerungsnahe, lastnahe als auch flächenbasierte Verteilungskriterien abgedeckt.
- Für die Repräsentation der Gerechtigkeitsvorstellungen wurden geeignete Indikatoren definiert, die eine Quantifizierung des Beitrags der Regionen ermöglichen.
- Mithilfe eines Algorithmus wurde in jeder Rasterzelle Deutschlands berechnet, dass eine möglichst gleichwertige Inanspruchnahme der Regionen im Sinne der jeweiligen Gerechtigkeitsvorstellung erreicht wird, die sich als „Belastungsgrad“ misst.
- Aus dem „Belastungsgrad“ kann der Ausbaubedarf einer EE-Technologie abgeleitet werden. Der Vergleich der resultierenden Ausbaubedarfe zeigt anschaulich, wie verschiedene normative Ansätze zu unterschiedlichen regionalen Ausbauempfehlungen führen.
- Entwicklung einer Methodik zur Identifikation von Konsensflächen
  - Es gibt nicht „eine gerechte Verteilung“, sondern viele gleichberechtigte Perspektiven. Anstatt diese gegeneinander abzuwägen, schlägt der Bericht eine neue Herangehensweise vor: die Überlagerung. Dabei werden mehrere Gerechtigkeitsmetriken kombiniert – und es wird berechnet, auf welchen Flächen ein Ausbau gleichzeitig von allen Vorstellungen getragen würde. Diese Schnittmengen werden als Konsensräume bezeichnet.
  - Mit diesem Ansatz liefert das Projekt ein Instrument, das auf verschiedenen Ebenen genutzt werden kann. In der Raumplanung hilft der Algorithmus konfliktarme Flächen zu identifizieren und Prioritäten transparent zu machen. In der Politik schafft die Überlagerung von Gerechtigkeitsmetriken eine evidenzbasierte Grundlage für Diskussionen über faire Lastenverteilung – ohne einzelne Positionen zu marginalisieren. In der Forschung eröffnet die Methode Anschlussmöglichkeiten für weitergehende Analysen, etwa zur Einbindung gesellschaftlicher Präferenzen oder zur Kombination mit finanziellen Beteiligungsmodellen.

## Die Fokusregion Oderland-Spree

Zur vertieften Analyse wurde die Planungsregion Oderland-Spree in Brandenburg ausgewählt. Die „Regionale Planungsgemeinschaft Oderland-Spree“ war in Form ihrer Geschäftsstelle als Praxispartner im Projekt involviert. Sie umfasst den östlichen Teil des Bundeslands und ist geprägt von dünn besiedelten ländlichen Räumen, Kleinstädten sowie großflächiger land- und forstwirtschaftlicher Nutzung. Gleichzeitig bestehen dort relevante Windenergiepotentiale, aber auch naturräumliche Einschränkungen.

Im Rahmen des Gesamtvorhabens wurde für die Praxisregion Oderland-Spree ein interaktives Planungstool<sup>1</sup> entwickelt. Basierend auf den amtlichen Planvorlagen und Kriterien der regionalen Planungsgemeinschaft kann das Tool genutzt werden, um regionale Szenarien für den Ausbau erneuerbarer Energien durchzuspielen. Die in dieser Studie entwickelten Ausbauszenarien nach unterschiedlichen Gerechtigkeitsvorstellungen wurden für die Planungsregion aufgearbeitet und in das Planungstool integriert.

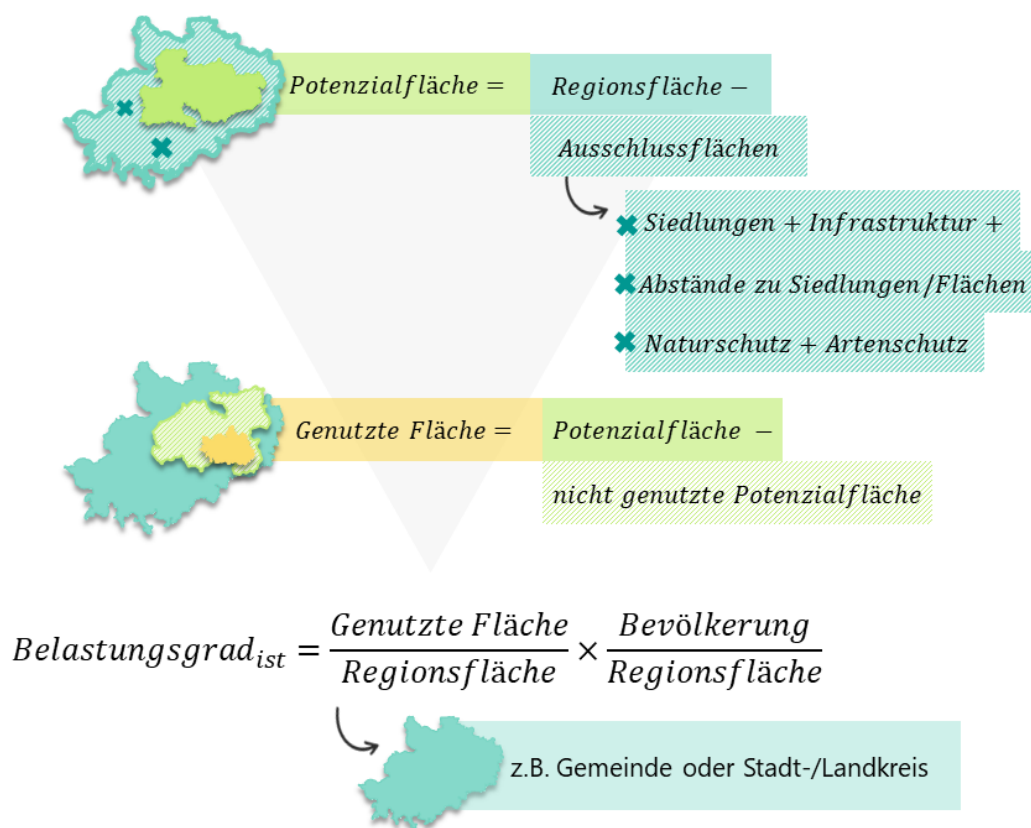
<sup>1</sup> <https://epp.rl-institut.de/de/>

## 2 Berechnungsvorschriften für räumliche Verteilung von EE-Anlagen

### 2.1 Gleichverteilte Belastung als Grundlage

Zu Projektbeginn bestand das Ziel darin, eine möglichst allgemeingültige Gerechtigkeitsvorstellung zu entwickeln, die eine breite gesellschaftliche Akzeptanz findet. Diese sollte eine Gleichstellung der Beteiligten gewährleisten und eine faire räumliche Verteilung von EE-Anlagen ermöglichen. Um dies zu erreichen, wurde auf bisherige Forschungsergebnisse zur Verteilung von EE-Anlagen aufgebaut. Insbesondere wurde der bereits entwickelte Belastungsgrad (Flachsbarth et al. 2021) weiterentwickelt, welcher sich aus dem Verhältnis von Potentialfläche zur Gesamtfläche sowie der Bevölkerungsdichte einer Region ableitet (siehe Abbildung 2-1).

Abbildung 2-1: Regionsbezogener Belastungsgrad



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Im Verlauf des Projekts zeigte sich, dass Gerechtigkeitsfragen stets darauf abzielen, etwas aneinander anzugleichen. Eine gerechte Verteilung soll sicherstellen, dass alle Regionen möglichst gleich belastet werden und dass ein möglichst gleichwertiger Beitrag an der Energiewende gewährleistet ist. Die bisherige Methodik zur Berechnung des Belastungsgrads erwies sich als noch unzureichend:

**Verfälschung der Ergebnisse durch unterschiedlich große Regionen:** Die bisherigen Berechnungen wurden auf der Ebene administrativer Regionen durchgeführt. Da Regionen jedoch stark unterschiedliche Flächengrößen aufweisen, führte dies zu Verzerrungen. Insbesondere die

Einbeziehung der Bevölkerungsdichte führte zu systematischen Ungenauigkeiten, da diese innerhalb einer Region nicht homogen verteilt ist.

**Eindimensionales Verständnis von Gerechtigkeit:** Der Belastungsgrad berücksichtigte das Verhältnis von Potentialfläche zur Gesamtfläche sowie die Bevölkerungsdichte. Dies repräsentiert eine einseitige Gerechtigkeitsvorstellung, die ausschließlich darauf abzielt, EE-Anlagen möglichst weit entfernt von Siedlungsgebieten zu platzieren. Andere Gerechtigkeitsvorstellungen, beispielsweise ein lastnaher Ausbau oder ein fokussierter Schutz von Erholungsgebieten, bleiben unberücksichtigt.

Um eine methodisch robustere und umfassendere Gerechtigkeitsbetrachtung zu ermöglichen, wurden im Projekt folgende Weiterentwicklungen vorgenommen:

- Erweiterung der Betrachtung um weitere Gerechtigkeitsvorstellungen. Dies ermöglicht die Berücksichtigung verschiedener Interessen und Perspektiven auf Verteilungsgerechtigkeit.
- Formalisierung der Gerechtigkeitsvorstellungen in Form von einer berechnungsgestützten Definition eines anzugleichenden Belastungsgrads.
- Entwicklung eines Gleichverteilungsalgorithmus, der unterschiedliche Gerechtigkeitsvorstellungen in Form von einer Berechnungsvorschrift zur Ermittlung des Belastungsgrades berücksichtigt.
- Umstellung der Berechnung auf Rasterebene, die systematische Verzerrung durch unterschiedliche Regionsgrößen zu vermeiden und eine möglichst neutrale Verteilung der Belastung zu gewährleisten.

Im Fokus des Projekts stand die Frage, wie Standorte für den Ausbau erneuerbarer Energien so verteilt werden können, dass eine räumlich gerechte Lastenverteilung entsteht. Fragen der finanziellen Verteilungsgerechtigkeit – etwa durch Beteiligungsmodelle oder wirtschaftliche Kompensation – wurden bewusst ausgeklammert. Sie sind zwar zentral für gesellschaftliche Akzeptanz und einen gerechten EE-Ausbau, erfordern jedoch andere Instrumente und wirken unabhängig von der konkreten Standortwahl.

Ziel war es stattdessen, methodische Grundlagen für eine faire räumliche Verteilung von EE-Anlagen zu schaffen, also Standorte zu identifizieren, an denen sich Ausbaupotentiale unter bestimmten Gerechtigkeitsmetriken ausgewogen realisieren lassen. Dabei wurden auch Verteillogiken berücksichtigt, die sich an sozioökonomischen Indikatoren wie Durchschnittseinkommen oder Bruttowertschöpfung orientieren.

Damit Aussagen wie „Es ist gerecht, dass EE-Anlagen bevorzugt in Regionen mit niedriger Bruttowertschöpfung errichtet werden“ tragfähig sind, müssen die politischen und planerischen Rahmenbedingungen entsprechend gestaltet sein. Fragen der finanziellen Gerechtigkeit beeinflussen somit die Wahl einer Gerechtigkeitsmetrik, nicht aber ihre räumliche Ausprägung.

## 2.2 Gerechtigkeitsmetriken

Im Rahmen des Projekts wurde der Begriff der „Gerechtigkeitsmetrik“ eingeführt, um unterschiedliche Vorstellungen von einer gerechten Verteilung des EE-Ausbaus systematisch erfassen und operationalisieren zu können. Eine Gerechtigkeitsmetrik beschreibt dabei ein

normatives Konzept von Gerechtigkeit in quantitativer Form: Sie legt fest, welche Größen bei der Standortverteilung von EE-Anlagen gleichmäßig verteilt oder besonders berücksichtigt werden sollen.

Zur Entwicklung geeigneter Gerechtigkeitsmetriken wurden im Projektverlauf verschiedene Formate genutzt, um Vorstellungen von Gerechtigkeit zu erfassen und zu systematisieren. Dazu gehörten Literaturrecherchen, Workshops und informelle Interviews<sup>2</sup>, in denen sowohl theoretische Konzepte als auch praktische Präferenzen identifiziert wurden. Die gesammelten Gerechtigkeitsvorstellungen wurden daraufhin soweit möglich formalisiert, indem sie in Berechnungsvorschriften für den Belastungsgrad einer Region übersetzt wurden.

Die fünf grün hinterlegten Gerechtigkeitsmetriken in Tabelle 2-1 werden in dieser Studie nicht nur theoretisch behandelt, sondern konkret zur Verteilung von EE-Anlagen und zur Identifikation von Konsensflächen genutzt. Die grau hinterlegten Berechnungsvorschriften werden für nachfolgende Ergebnisdarstellungen nicht weiter betrachtet.

Tabelle 2-1 fasst die im Projekt identifizierten und formalisierten Gerechtigkeitsmetriken zusammen. Für jede Metrik wird eine Bezeichnung, eine Einordnung bzgl. geltendem Gerechtigkeitsprinzip, eine Berechnungsvorschrift zur Ermittlung des Belastungsgrades sowie eine kurze Beschreibung der zugrunde liegenden Gerechtigkeitsvorstellung angegeben.

Die fünf grün hinterlegten Gerechtigkeitsmetriken in Tabelle 2-1 werden in dieser Studie nicht nur theoretisch behandelt, sondern konkret zur Verteilung von EE-Anlagen und zur Identifikation von Konsensflächen genutzt. Die grau hinterlegten Berechnungsvorschriften werden für nachfolgende Ergebnisdarstellungen nicht weiter betrachtet.

**Tabelle 2-1: Berechnungsvorschriften für gesammelte Gerechtigkeitsvorstellungen**

Bezeichnung	Gerechtigkeitsprinzip	Berechnungsvorschrift: Belastungsgrad =	Gerechtigkeitsvorstellung	Daten
<b>Gleicher Anteil an Gesamtfläche</b>	Gleichheitsprinzip	$\frac{\text{usedArea}(x)}{\text{gridArea}(x)}$	überall die gleiche Fläche nutzen.	<b>x</b>
<b>Gleicher Anteil an Potentialfläche</b>	Leistungsprinzip	$\frac{\text{usedArea}(x)}{\text{potArea}(x)}$	da ausbauen, wo viel Potentialfläche verfügbar ist.	<b>x</b>
<b>Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern</b>	Gleichheitsprinzip <i>Betroffenen-gleichheit</i>	$\frac{1}{\text{gridArea}(x)^2} * \text{usedArea}(x) * \text{pop}(x)$	möglichst wenig Menschen mit EE-Anlagen beeinträchtigen.	<b>x</b>
<b>Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah</b>	Gleichheitsprinzip <i>Konzentrationsprinzip</i>	$\frac{1}{\text{gridArea}(x)^2} * \text{usedArea}(x) * \frac{1}{\text{pop}(x)}$	Möglichst wenig Natur mit EE-Anlagen beeinträchtigen. EE soll nah an die Menschen.	<b>x</b>

<sup>2</sup> Akteure des Planungsverbands Oderland-Spree, interdisziplinäres Projektteam, Projektteam des Forschungsprojekts GiVen, Freiburger Energiegespräche, Planungsverbände, Forschungsnetzwerk Energiesystemanalyse

Bezeichnung	Gerechtigkeitsprinzip	Berechnungsvorschrift: Belastungsgrad =	Gerechtigkeitsvorstellung	Daten
<b>Gleiche Belastung: Verbrauchsnah</b>	Nutzenprinzip: <i>Systemeffizienzprinzip</i>	$\frac{1}{\text{gridArea}(x)^2} * \text{usedArea}(x) * \frac{1}{\text{load}(x)}$	den Strom möglichst da erzeugen, wo er verbraucht wird	<b>x</b>
<b>Ökonomisch optimiert</b>	Leistungsprinzip <i>Effizienzorientierte Allokationsgerechtigkeit</i>	$\min_x [\text{costs}(x) * \text{usedArea}(x)]$	die EE-Anlagen ökonomisch optimiert zuzubauen, um Gesamtsystemkosten zu sparen	<b>x</b>
<b>Gleiche Belastung: Infrastrukturnah</b>	Leistungsprinzip <i>Systemeffizienzprinzip</i>	$\frac{1}{\text{gridArea}(x)^2} * \text{usedArea}(x) * \frac{1}{\text{PowerGen}(x)}$	den Strom möglichst weiter da erzeugen, wo er bisher erzeugt wurde	<b>x</b>
<b>Gleiche Belastung: Bruttowertschöpfungssensitiv</b>	Bedürfnisprinzip <i>Kompensatorische Gerechtigkeit</i>	$\frac{1}{\text{gridArea}(x)^2} * (\alpha(x) \cdot \frac{\text{usedArea}(x)}{\text{GrossAddVal}(x)} + (1-\alpha(x)) \cdot \text{usedArea}(x) \cdot \text{GrossAddVal}(x))$  mit... $\alpha(x) = 1 \rightarrow$ EE-Ausbau trägt nicht zur BWS vor Ort bei $\alpha(x) = 0 \rightarrow$ EE-Ausbau trägt zur BWS vor Ort bei	wenn der Ausbau von EE-Anlagen dazu beiträgt, wirtschaftliche Ungleichheiten zwischen Regionen auszugleichen	
<b>Gleiche Belastung: Einkommenssensitiv</b>	Bedürfnisprinzip <i>Finanziell kompensatorische Gerechtigkeit</i>	$\frac{1}{\text{gridArea}(x)^2} * (\alpha(x) \cdot \frac{\text{usedArea}(x)}{\text{income}(x)} + (1-\alpha(x)) \cdot \text{usedArea}(x) \cdot \text{income}(x))$  mit... $\alpha(x) = 1 \rightarrow$ steigende Stromkosten bei EE-Ausbau vor Ort $\alpha(x) = 0 \rightarrow$ sinkende Stromkosten bei EE-Ausbau vor Ort	wenn einkommensschwache Regionen möglichst wenig belastet und möglichst stark von Vorteilen des EE-Ausbaus profitieren	
<b>Vorrang für kommunale Flächen</b>	Bedürfnisprinzip <i>Gemeinwohl-orientierte Verteilungsgerechtigkeit</i>	$\text{Zubau}(x) = \begin{cases} f(x, c) & \text{wenn komm. Fläche vorhanden} \\ f(x, p) & \text{sonst} \end{cases}$	wenn der Ausbau auf kommunalen Flächen erfolgt: Erträge sollen kollektiv wirken und nicht privat abgeschöpft werden	

Quelle: eigene Darstellung Öko-Institut

Jede Gerechtigkeitsmetrik wird als Funktion  $f_m(x)$  formuliert. Diese beschreibt den je Rasterzelle  $x$  anzulegenden Wert, der alternativ auch als „Belastungsgrad“ der Region bezeichnet. Belastet



wird ein Raster durch den Ausbau von Energieanlagen, die Fläche beanspruchen. Dieser Flächenverbrauch wird als  $\text{usedArea}(x)$  modelliert. Die zugrunde liegende Basisfläche des Rasters, in diesem Fall  $10 \times 10 \text{ km}$ , ist als  $\text{gridArea}(x)$  bezeichnet.

### **Gleicher Anteil an Gesamtfläche**

Die Gerechtigkeitsmetrik "Gleicher Anteil an Gesamtfläche" hat das Ziel, überall denselben Anteil an Gesamtfläche der Gitterzelle für den EE-Ausbau zu nutzen. Sie ist wie folgt definiert:

$$f_{\text{gerecht}}(x) = \frac{\text{usedArea}(x)}{\text{gridArea}(x)}$$

Angelehnt an die Methodik des 2 % Flächenziels für Windenergie nutzt jede Region den gleichen Anteil an Fläche zur Gesamtfläche für den EE-Ausbau. Diese Gerechtigkeitsvorstellung basiert auf dem Gleichheitsprinzip, d. h. es soll eine gleichmäßige Verteilung von Lasten oder Nutzen angestrebt werden. In diesem Fall eine gleiche Flächenbeanspruchung durch EE-Anlagen pro verfügbarer Gesamtfläche.

### **Gleicher Anteil an Potentialfläche**

Die Gerechtigkeitsmetrik "Gleicher Anteil an Potentialfläche" hat das Ziel, überall denselben Anteil an Potentialfläche zu nutzen. Sie ist wie folgt definiert:

$$f_{\text{gerecht}}(x) = \frac{\text{usedArea}(x)}{\text{potArea}(x)}$$

Diese Gerechtigkeitsvorstellung basiert auf dem Leistungsprinzip. Dabei sollte sich der Beitrag einer Region an deren Kapazität und Potentialen orientieren. Demnach werden vor allem Regionen mit hoher verfügbarer Potentialfläche bebaut. Die Definition der Potentialfläche spielt hierfür eine entscheidende Rolle.

### **Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern**

Die Gerechtigkeitsmetrik "Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern" hat das Ziel, die Bevölkerung gleich (wenig) zu belasten. Sie ist wie folgt definiert:

$$f_{\text{gerecht}}(x) = \frac{1}{\text{gridArea}(x)^2} * \text{usedArea}(x) * \text{pop}(x)$$

Dabei sollen möglichst wenige Menschen durch erneuerbare Energieanlagen beeinträchtigt werden. Das bedeutet, dass vor allem Regionen mit geringer Bevölkerungsdichte bebaut werden. Diese Gerechtigkeitsvorstellung basiert auf dem Gleichheitsprinzip in Form einer Betroffenengleichheit. Die Bevölkerung soll zu gleichen Teilen durch EE-Anlagen belastet werden.

### **Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah**

Die Gerechtigkeitsmetrik "Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah" hat das Ziel, Flächen pro Kopf gleich zu belasten und wenig besiedelte Gebiete von erneuerbare Energieanlagen freizuhalten. Sie ist wie folgt definiert:

$$f_{\text{gerecht}}(x) = \frac{1}{\text{gridArea}(x)^2} * \text{usedArea}(x) * \frac{1}{\text{pop}(x)}$$

Anhand des Verhältnisses an genutzter Fläche zur Gesamtfläche und der Arealitätsziffer (die Fläche, die jedem Einwohner durchschnittlich zur Verfügung steht) werden alle Regionen gleich belastet. Das bedeutet, dass vor allem Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte bebaut werden und unbebaute Erholungsflächen möglichst freigehalten werden. Diese Gerechtigkeitsvorstellung basiert auf dem Gleichheitsprinzip im Sinne des Konzentrationsprinzips. In jeder Region sollen die EE-Anlagen bevölkerungsnah konzentriert werden, um den gleichen Anteil an Naturfläche freizuhalten.

### Gleiche Belastung: Verbrauchsnahe

Die Gerechtigkeitsmetrik "Gleiche Belastung: Verbrauchsnahe" hat das Ziel, Regionen proportional zu ihrem Stromverbrauch gleich stark zu belasten. EE-Anlagen sollen bevorzugt dort errichtet werden, wo viel Strom verbraucht wird. Dies reduziert den Bedarf an Netzinfrastruktur und senkt Übertragungsverluste. Die entsprechende Bewertungsfunktion lautet:

$$f_{\text{gerecht}}(x) = \frac{1}{\text{gridArea}(x)^2} * \text{usedArea}(x) * \frac{1}{\text{load}(x)}$$

Der Stromverbrauch  $\text{load}(x)$  geht als Kehrwert in die Formel ein, sodass Regionen mit höherem Verbrauch geringere Belastungswerte erhalten – ein Anreiz, EE-Anlagen lastnah zu errichten.

Diese Gerechtigkeitsvorstellung basiert auf dem Nutzenprinzip. Regionen mit hohem Stromverbrauch haben einen versorgungstechnischen Vorteil aus EE-Anlagen und tragen eine größere Verantwortung für den Ausbau. Ein zusätzlicher Aspekt ist die Systemeffizienz, ein normativer Leitgedanke, der Gerechtigkeit über die Minimierung vermeidbarer Systemlasten (z. B. Netzausbau, Energieverluste) herstellt. Gerecht ist in diesem Verständnis, was das System als Ganzes leistungsfähiger, kosteneffizienter und resilienter macht.

### Ökonomisch optimiert

Die Gerechtigkeitsmetrik „ökonomisch optimiert“ orientiert sich an einer möglichst effizienten Nutzung verfügbarer Flächen zur Stromerzeugung. Sie basiert auf der Annahme, dass EE-Anlagen dort errichtet werden sollen, wo sie je Flächeneinheit den höchsten energetischen Ertrag erzielen. Die Verteilung erfolgt algorithmisch durch eine Reihung der Rasterzellen nach Volllaststunden, beginnend mit den höchsten.

Bei gleichen Investitionskosten je Anlage ergibt sich daraus eine implizite Minimierung der spezifischen Stromgestehungskosten. Die zugrunde liegende Verteilregel lässt sich formal ausdrücken als:

$$f_{\text{gerecht}}(x) = \min_x [c(x) * \text{usedArea}(x)]$$

Die Funktion ist nicht als Zielfunktion eines Optimierungsmodells implementiert, beschreibt jedoch das Prinzip, dem die Reihung der Zellen in diesem Szenario folgt. Die Metrik ist methodisch gleichwertig zu den übrigen betrachteten Gerechtigkeitsvorstellungen und könnte in gleicher Weise überlagert und verglichen werden.



Diese Gerechtigkeitsvorstellung basiert auf dem Leistungsprinzip im Sinne einer effizienzorientierten Allokationsgerechtigkeit. Dabei werden vor allem EE-Anlagen in Regionen mit sehr guten Standortbedingungen installiert. Diese Gerechtigkeitsmetrik wurde im Rahmen dieser Studie als ökonomisches Vergleichsszenario betrachtet, allerdings nicht für weitere Analysen bezüglich gerechter Konsensflächen herangezogen.

### **Gleiche Belastung: Infrastrukturnah**

Die Gerechtigkeitsmetrik "Gleiche Belastung: Infrastrukturnah" hat das Ziel, den Strom möglichst weiter da zu erzeugen, wo er bisher erzeugt wurde. Dadurch soll bestehende Infrastruktur genutzt werden. Die entsprechende Bewertungsfunktion lautet:

$$f_{\text{gerecht}}(x) = \frac{1}{\text{gridArea}(x)^2} * \text{usedArea}(x) * \frac{1}{\text{PowerGen}(x)}$$

Diese Gerechtigkeitsvorstellung basiert auf dem Leistungsprinzip. Regionen mit bestehender Stromerzeugungsinfrastruktur weisen bereits relevante Infrastrukturkapazitäten wie bestehende Netzinfrastuktur auf, welche aus Systemeffizienzaspekten weiter genutzt werden soll. Die Daten bestehender konventioneller Stromerzeugung wurden in die Datenbank aufgenommen, aber nicht für weitere Untersuchungen genutzt. Dieses Prinzip wurde nur theoretisch adressiert. Die Flächenverfügbarkeit für EE-Anlagen um bebaute Infrastrukturflächen ist begrenzt, so dass eine direkte Substitution bestehender konventioneller Erzeugungsanlagen mit neuen EE-Anlagen notwendig wäre. Dies ist allerdings nicht praktikabel umsetzbar.

### **Gleiche Belastung: Bruttowertschöpfungssensitiv**

Die Gerechtigkeitsmetrik „Gleiche Belastung: Bruttowertschöpfungssensitiv“ hat das Ziel, wirtschaftliche Ungleichheiten zwischen Regionen durch den Ausbau von EE-Anlagen auszugleichen. EE-Anlagen sollen vor allem in Regionen gebaut werden, deren Bruttowertschöpfung (BWS) vergleichsweise gering ist, wobei dadurch finanzielle Vorteile für die Region durch den Ausbau entstehen sollen. Die entsprechende Bewertungsfunktion lautet:

$$f_{\text{gerecht}}(x) = \frac{1}{\text{gridArea}(x)^2} * (\alpha(x) \cdot \frac{\text{usedArea}(x)}{\text{GrossAddVal}(x)} + (1-\alpha(x)) \cdot \text{usedArea}(x) \cdot \text{GrossAddVal}(x))$$

mit...

$\alpha(x) = 1 \rightarrow$  EE-Ausbau trägt nicht zur BWS vor Ort bei

$\alpha(x) = 0 \rightarrow$  EE-Ausbau trägt zur BWS vor Ort bei

Diese Gerechtigkeitsvorstellung basiert auf dem Bedürfnisprinzip im Sinne einer kompensatorischen Gerechtigkeit. Regionen mit wirtschaftlichen Entwicklungsdefiziten sollen mehr von den Vorteilen der Energiewende profitieren.

### **Gleiche Belastung: Einkommenssensitiv**

Die Gerechtigkeitsmetrik „Gleiche Belastung: Einkommenssensitiv“ hat das Ziel, wirtschaftliche Ungleichheiten zwischen Regionen durch den Ausbau von EE-Anlagen auszugleichen. EE-Anlagen sollen vor allem in Regionen gebaut werden, deren durchschnittliches Pro-Kopf-Einkommen

vergleichsweise gering ist, wobei dadurch finanzielle Vorteile durch sinkende Stromkosten für die Region durch den Ausbau entstehen sollen.

Die entsprechende Bewertungsfunktion lautet:

$$f_{\text{gerecht}}(x) = \frac{1}{\text{gridArea}(x)^2} * (\alpha(x) \cdot \frac{\text{usedArea}(x)}{\text{income}(x)} + (1-\alpha(x)) \cdot \text{usedArea}(x) \cdot \text{income}(x))$$

mit...

$\alpha(x) = 1 \rightarrow$  steigende Stromkosten bei EE-Ausbau vor Ort

$\alpha(x) = 0 \rightarrow$  sinkende Stromkosten bei EE-Ausbau vor Ort

Diese Gerechtigkeitsvorstellung basiert auf dem Bedürfnisprinzip im Sinne einer finanziell kompensatorischen Gerechtigkeit. Die Bevölkerung mit vergleichsweise geringem Einkommen soll durch finanzielle Vorteile vom Ausbau der EE-Anlagen in ihrer Region profitieren.

Bei den sozioökonomischen Gerechtigkeitsmetriken, die auf die Bruttowertschöpfung oder das Durchschnittseinkommen abstellen, standen deutschlandweit nur Daten auf Landkreisebene zur Verfügung. Für eine räumliche Verteilung im  $10 \times 10$  km-Raster wären diese zu grob aufgelöst gewesen und hätten zu irreführenden Ergebnissen geführt. Darüber hinaus zeigen diese Gerechtigkeitsvorstellungen eine zusätzliche Herausforderung: Ihre Umsetzung setzt voraus, dass finanzielle Beteiligungsmöglichkeiten bundesweit in vergleichbarer Weise bestehen. Da solche Beteiligungsmodelle jedoch oft projektspezifisch ausgestaltet sind, kann es zu Ungerechtigkeiten kommen – insbesondere dann, wenn einkommensschwache Regionen zwar einen höheren EE-Ausbau tragen, aber keine adäquaten Beteiligungsoptionen geboten werden. Der Datensatz müsste komplexer aufbereitet und verschnitten werden. Aufgrund dieser methodischen und strukturellen Unsicherheiten wurden die entsprechenden Metriken vorerst aus den weiteren Analysen ausgeschlossen.

## Vorrang für kommunale Flächen

Die Gerechtigkeitsmetrik „Vorrang für kommunale Flächen“ hat das Ziel, den Ausbau prioritär auf kommunalen Flächen umzusetzen, um finanzielle Vorteile durch Pachtzahlungen kollektiv zu nutzen. Die entsprechende Bewertungsfunktion lautet:

$$f_{\text{gerecht}}(x) = \text{Zubau}(x) = \begin{cases} f(x, c) & \text{wenn komm. Fläche vorhanden} \\ f(x, p) & \text{sonst} \end{cases}$$

Diese Gerechtigkeitsvorstellung basiert auf dem Bedürfnisprinzip im Sinne einer gemeinwohlorientierten Verteilungsgerechtigkeit. Kommunen sollen direkt finanziell vom EE-Ausbau profitieren. Diese Gerechtigkeitsmetrik wurde nur theoretisch betrachtet. Für eine Verteilung der EE-Anlagen auf kommunalen Flächen wäre eine bundesweite Datenverfügbarkeit aller Besitzstandverhältnisse der Potentialflächen notwendig. Solche Daten liegen auf Bundesebene allerdings nicht vor.

Die zuvor dargestellten Gerechtigkeitskonzepte und Prinzipien bilden den normativen und wissenschaftlichen Rahmen für die im Projekt entwickelte Methodik zur räumlich gerechten Verteilung erneuerbarer Energien. Die folgenden Kapitel zeigen, wie diese theoretischen Grundlagen in konkrete Gerechtigkeitsmetriken übersetzt, algorithmisch operationalisiert und zur Ermittlung konsensfähiger Ausbaufächen angewendet wurden. Dabei wird nicht der Anspruch erhoben, alle denkbaren Gerechtigkeitsvorstellungen vollständig abzubilden. Vielmehr handelt es

sich um eine exemplarische Anwendung, die die Potentiale und Herausforderungen algorithmischer Gerechtigkeitsplanung sichtbar macht und eine Grundlage für weiterführende Arbeiten legt.

### 3 Potentialflächen

EE-Anlagen lassen sich nicht beliebig im Raum platzieren – sie benötigen geeignete Flächen. Für Windenergie gelten beispielsweise Mindestabstände zu Siedlungen, Vogelschutzgebiete sind oft auszuschließen, und technische Infrastrukturen wie Drehfunkfeuer sind ebenfalls zu meiden. Auch Photovoltaik kann nicht auf jeder Fläche gleichermaßen effizient oder rechtlich zulässig installiert werden.

Die Definition geeigneter Potentialflächen ist damit eine zentrale Voraussetzung für jede modellgestützte Analyse der räumlichen Verteilung von EE-Anlagen – und ein entscheidender Einflussfaktor auf das Ergebnis von Verteilalgorithmen. Denn gerechte Verteilungen lassen sich nur dort realisieren, wo es einen gewissen Spielraum bei der Flächenwahl gibt. Eine zu enge Potentialkulisse führt dazu, dass der Algorithmus seine steuernde Wirkung nicht mehr entfalten kann.

Ziel dieses Kapitels ist es, die im Projekt verwendeten Potentialflächendaten, ihre methodische Herleitung und ihren Einfluss auf Verteilungsergebnisse vorzustellen. Damit wird deutlich: Die Potentialfläche ist nicht nur technische Eingangsgröße, sondern Teil der Gerechtigkeitsdebatte selbst.

#### 3.1 Windenergie Potentialfläche

##### RLI-Datensatz

Für die Analyse der Windenergiepotentiale wurde auf die vom Reiner Lemoine Institut (RLI) veröffentlichte Potentialfläche für Windenergie zurückgegriffen (Amme 2022). Diese berücksichtigt bundesweit einheitlich definierte Ausschlusskriterien, darunter

- rechtliche und naturschutzfachliche Ausschlussgebiete
- einen pauschalen Mindestabstand von 400 m zu Siedlungsgebieten.

Die daraus resultierende Flächenkulisse ist großzügig bemessen und belässt Handlungsspielraum bei der Anlagenverteilung.

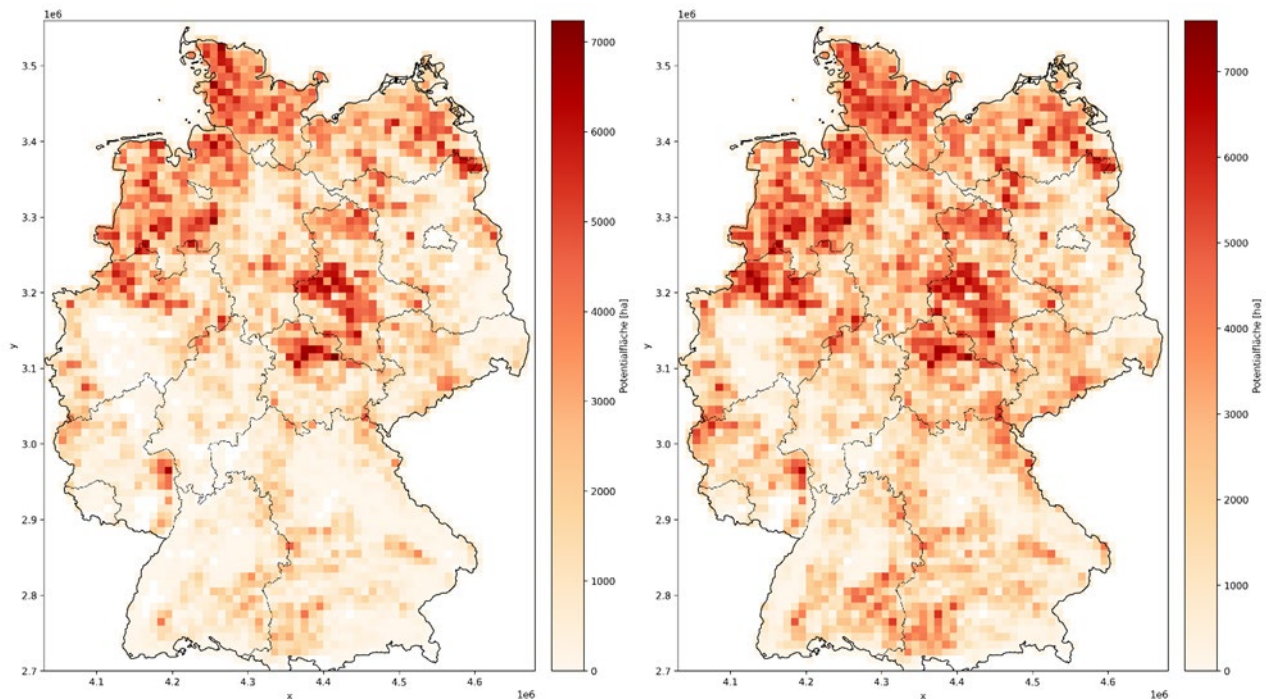
Ergänzend wurden analog zu Guidehouse (Bons et al. 2022a) zwei Schwellenwerte für die mittlere Windgeschwindigkeit als wirtschaftliche Mindestkriterien eingeführt:

- **Szenario 1:** Mindestwindgeschwindigkeit von 7,0 m/s in 160 m Höhe – Fokus auf wirtschaftlich besonders attraktive Standorte mit hoher Ertragswahrscheinlichkeit.
- **Szenario 2:** Mindestwindgeschwindigkeit von 6,5 m/s – Erweiterung der Potentialfläche, insbesondere in südlichen Bundesländern, um dort ein höheres Ausbaupotential zu ermöglichen.

Abbildung 3-1 verdeutlicht, wie stark sich die gewählte Mindestwindgeschwindigkeit auf die Flächenverfügbarkeit auswirkt. Während Szenario 2 noch eine Fläche von 7.366.153 ha umfasst,

sinkt diese bei 7,0 m/s um 32,5 % auf 4.967.238 ha. Besonders in Süddeutschland gehen dadurch überproportional viele Flächen verloren.

**Abbildung 3-1: Potentialflächen Wind onshore - RLI mit 7 m/s (links) und 6,5 m/s (rechts)**



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

### Guidehouse/KRK-Datensatz

Als weiterer Referenzdatensatz wurde die sogenannte KRK-Potentialfläche von Guidehouse betrachtet (Bons et al. 2022a). Diese Fläche wurde unter Berücksichtigung von Konfliktrisikoklassen (KRK) erstellt und stellt das Mindestmaß an verfügbarer Fläche für die Erreichung des Windenergie-Ausbauziels in Höhe von 160 GW dar. Sie bildet die Grundlage des im Kontext des Windenergieflächenbedarfsgesetz (WindBG) gesetzlich festgelegte 2 % Flächenziel (vgl. (Bundesministerium der Justiz (BMJ) 20.07.2022)). Sie basiert auf einem systematischen, deutschlandweit einheitlichen Bewertungsschema für Konfliktrisiken („Konfliktrisikoklassen“, KRK).

Die KRK-Potentialfläche wurde nicht in die Verteilungsszenarien aufgenommen, da sie keinen Handlungsspielraum für gerechte Verteilungen bietet: Alle verfügbaren Flächen müssten vollständig genutzt werden. Eine algorithmische Allokation nach Gerechtigkeitsmetriken ist unter diesen Bedingungen nicht möglich.

### 3.2 Freiflächen-Photovoltaik Potentialfläche

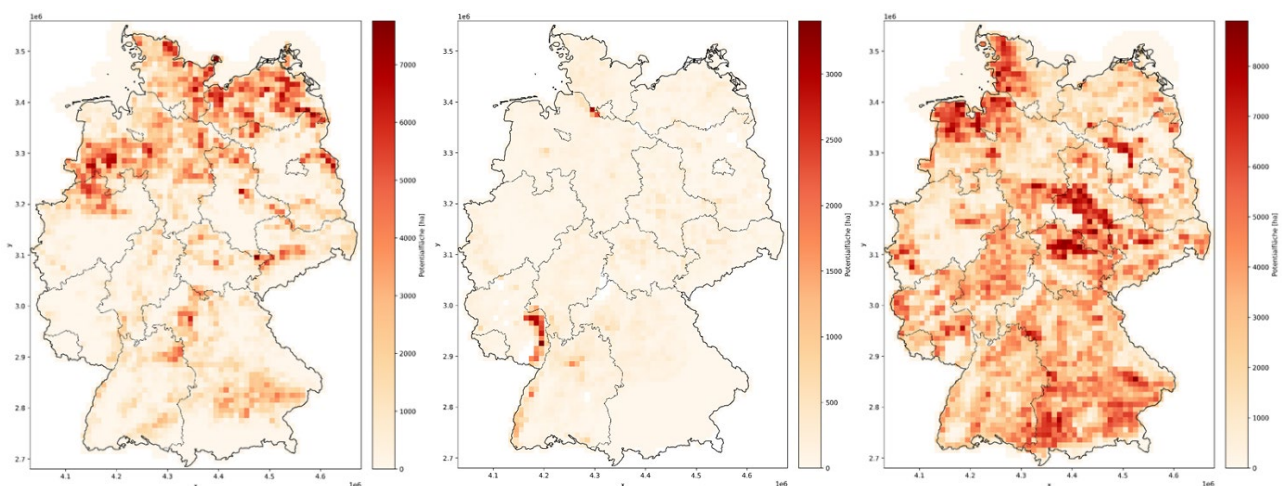
Für die Freiflächen-Photovoltaik wurden Potentialflächen in drei Kategorien unterschieden, um unterschiedliche Nutzungsformen abzubilden:

- **PV-Freiflächenanlagen:** Klassische Anlagen auf geeigneten Offenlandflächen

- **Agri-PV hochaufgeständert:** Über Dauerkulturen wie Wein- oder Obstbau; landwirtschaftliche Nutzung bleibt erhalten
- **Agri-PV bifazial:** Auf Ackerland niedriger bis mittlerer Bodengüte; kombinierte Nutzung durch Ost-West-orientierte Module

Die im Rahmen des Projektes durchgeführte Potentialflächenanalyse für Photovoltaik wurde als eigene Studie inkl. der Daten open access veröffentlicht und ist in Kohler und Wingenbach (2024) verfügbar. Abbildung 3-2 zeigt für jede Technologie die geographische Verteilung der potentiell nutzbaren Flächen je Rasterzelle in Hektar. Das erschließbare Potential für Agri-PV bifazial mit geringer Nutzungskonkurrenz mit einer geringen bis mittleren Bodengüte zeigt sich vor allem in Norddeutschland und liegt mit insgesamt knapp 4.000.000 ha bei 30 % des gesamten PV-Freiflächen (FF) Potential. Potentialflächen für hochaufgeständerte Agri-PV Anlagen auf Dauerkulturen sind fast ausschließlich im Rheintal zu finden und liegen mit rund 402.000 ha bei 3 % des gesamten realisierbaren FF-Potentials. Die insgesamt für FF-PV verfügbare Potentialfläche liegt bei rund 12.000.000 ha an Fläche. Dies entspricht 37 % der deutschen Landesfläche.

**Abbildung 3-2: Potentialflächen PV Freifläche: Agri-PV bifazial (links), Agri-PV Dauerkulturen (Mitte) und FF-PV (rechts)**



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut. Aus Datengrundlage aus Kohler und Wingenbach (2024).

Die Flächenkulisse für den Ausbau von FF-PV ist im Vergleich zur Potentialfläche von Windenergie sehr groß. Dadurch besteht ein großer Freiraum für unterschiedliche Verteilalgorithmen, so dass die Potentialfläche keine Restriktion für das Erzielen einer gerechten FF-PV Verteilung darstellt.

Die Größe und Definition der Potentialfläche beeinflussen unmittelbar die Ergebnisse des Verteilalgorithmus. Je restriktiver die Fläche gewählt wird, etwa durch hohe Mindestwindgeschwindigkeiten oder strenge Ausschlusskriterien, desto geringer ist der verbleibende Spielraum. Die angestrebte Angleichung der Belastung zwischen den Rasterzellen kann dann nur eingeschränkt erreicht werden. Die Verteilung folgt in solchen Fällen weniger den normativen Gerechtigkeitskriterien als vielmehr der Verfügbarkeit nutzbarer Flächen.

Das kann gerechtfertigt sein – aber nur dann, wenn die gewählte Potentialfläche selbst als gerecht und nachvollziehbar legitimiert gilt und die darin enthaltenen Einschränkungen als sinnvoll akzeptiert werden.



### 3.3 Potentialflächen für Dach-Photovoltaik

Für die Regionalisierung von Dach-Photovoltaik-Anlagen im Projekt EmPowerPlan stand kein bundesweit flächenscharfer Datensatz zur Verfügung. Daher wurde eine eigene Potentialflächenschätzung vorgenommen, um eine ökonomisch optimierte Verteilung der Kapazitäten in Deutschland vornehmen zu können. Verteilungsszenarien auf Basis unterschiedlicher Gerechtigkeitsvorstellungen wurden für Dach-PV nicht entwickelt, da hier andere gesellschaftliche Rahmenbedingungen greifen als bei Freiflächenanlagen. So sind Dach-Anlagen oft stark an Eigentumsverhältnisse und Gebäudestrukturen gekoppelt. Zudem wäre etwa eine „bevölkerungsferne“ Allokation von Dachanlagen konzeptionell kaum sinnvoll umsetzbar.

Ziel war es, eine möglichst umfassende Potentialfläche zu identifizieren, auf deren Basis eine technisch fundierte Regionalverteilung der Kapazitäten erfolgen kann. Zu diesem Zweck wurde auf den Energieatlas Baden-Württemberg (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) und Ministerium für Umwelt Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2022) zurückgegriffen, der Shapefiles potentieller Dachflächen im Bundesland bereitstellt. Diese wurden mit Landnutzungskategorien des Corine-Land-Cover-Datensatzes (CLC) verschnitten, um zu bestimmen, in welchen Nutzungstypen potentielle Dachflächen besonders häufig auftreten (Umweltbundesamt (UBA) 2022).

Die so ermittelten prozentualen Verteilungen wurden anschließend auf den bundesweiten Flächendatensatz übertragen. Dabei wurde jedem Raster (100 × 100 m) ein Flächenanteil entsprechend seiner CLC-Kategorie zugewiesen. Auf diese Weise konnte – in Kombination mit einer typischen Anlagenkennzahl von 124 W/m<sup>2</sup> – ein potentiell installierbares Dach-PV-Potential für Deutschland abgeleitet werden.

Diese Herangehensweise ist methodisch pragmatisch und nutzt öffentlich zugängliche, belastbare Daten. Zu vereinfacht an der Herangehensweise ist, dass von einer regionalen Besiedlungsstruktur in Baden-Württemberg auf ganz Deutschland rückgeschlossen wurde. Dadurch kommt es zu einer Überschätzung des deutschlandweiten Potentials. Für die vorliegende Untersuchung ist solch eine Überschätzung allerdings unkritisch, da keine Standortentscheidungen getroffen werden, sondern lediglich die Gesamtzubaumenge verteilt wird.

Mithilfe dieses Verfahrens ermittelte potentielle Leistung liegt – je nach Annahme – bei rund 500 GW und liegt damit am oberen Rand aktueller Potentialabschätzungen. Während frühere Studien (z. B. Kaltschmitt et al. (2013), Quatschnig (2012) oder Lödl et al. (2010)) noch deutlich konservativere Werte zwischen 120 - 160 GW genannt hatten, kommen jüngere Analysen zumindest auf vergleichbare Größenordnungen:

- Die Stiftung Klimaneutralität (2021) schätzt das installierbare Potential allein auf Dächern auf ca. 500 GW.
- Eine Studie von Agora Energiewende (2023) und greenventory quantifiziert das Dachflächenpotential in Deutschland auf 400 GW, ohne Fassadenflächen.

Die im Projekt entwickelte Methodik reiht sich somit in den oberen Bereich aktueller Forschungsergebnisse ein. Sie ist geeignet, die Verteilungspotentiale auf regionaler Ebene

hinreichend abzubilden. Gleichzeitig bleibt der Hinweis bestehen, dass sie vereinfachend arbeitet und regionale Unterschiede in der Siedlungsstruktur nur eingeschränkt berücksichtigt.

Da die ermittelte Potentialfläche ein vereinfachtes Verfahren darstellt, wurde von einer Veröffentlichung des Datensatzes abgesehen. Er kann jedoch bei Interesse zur Einsicht bereitgestellt werden.

### 3.4 Potentialfläche durch Negativ- und Positivplanungen

Die Flächenvorgaben für den Ausbau der Windenergie in Deutschland basieren auf dem Windenergieflächenbedarfsgesetz (WindBG). Es verpflichtet die Bundesländer, bis spätestens 2032 jeweils einen bestimmten Anteil ihrer Landesfläche für Windenergie auszuweisen, (vgl. (Bundesministerium der Justiz (BMJ) 20.07.2022)). Die konkreten Zielwerte, sogenannte Flächenbeitragswerte, unterscheiden sich je nach Bundesland und werden durch landesrechtliche Regelungen weiter konkretisiert.

In vielen Bundesländern, etwa in Sachsen, Nordrhein-Westfalen oder Niedersachsen, wird die Umsetzung dieser Flächenziele an die regionalen Planungsverbände delegiert. Diese erhalten ein vorgegebenes Flächenziel und müssen es in ihrem Zuständigkeitsbereich umsetzen, durch Positivplanung, unter Beteiligung der Kommunen und mit Rückgriff auf lokale Kenntnisse und Abwägungen. Doch woher kommen diese regionalen Flächenziele? Die Bundesländer legen sie auf Basis interner Verteilungsschlüssel fest, etwa nach Landesfläche, Bevölkerung oder Windpotential. Diese Vorgabe ist nicht neutral: Sie basiert faktisch auf einer vorgelagerten „Negativplanung“, auch wenn dieser Begriff offiziell kaum mehr verwendet wird. Denn bevor lokal geplant wird, definiert sie, wie viel Fläche eine Region beisteuern soll.

Damit gilt: Positivplanung allein reicht nicht. Damit eine Region weiß, wie viel Fläche sie ausweisen soll, braucht es zuvor eine übergeordnete Bedarfsabschätzung bzw. eine Art Flächenzielverteilung. Genau hier kann ein Verteilalgorithmus ansetzen: Er kann auf Basis einer groß bemessenen, einheitlich definierten Potentialfläche regionale Ausbauziele berechnen.

Das Ergebnis ist kein konkreter Flächenplan, sondern ein differenziertes Flächenziel pro Region, das als Grundlage für spätere Positivplanungen dienen kann – und zugleich in eine größere Debatte um gerechte Lastenverteilung eingebettet ist.

## 4 Verteilalgorithmus

Um EE-Anlagen möglichst gerecht im Raum zu verteilen, haben wir verschiedene Gerechtigkeitsmetriken entwickelt und in einen Algorithmus integriert. Dieser weist auszubauende Wind- und PV-Anlagen  $10 \times 10$  km großen Gitterzellen so zu, dass die *Belastung* zwischen den Regionen gemäß einer gewählten Gerechtigkeitsvorstellung möglichst ausgeglichen wird. Dabei bleibt das Ziel des Algorithmus stets gleich: die Belastung über die Fläche anzugleichen, unabhängig davon, wie sie im Einzelnen berechnet wird. Die konkrete Berechnung richtet sich nach der jeweils zugrunde liegenden Gerechtigkeitsmetrik.

### 4.1 Rasterdatenbank

Die Grundlage für die räumliche Analyse im Projekt bildet eine hochauflösende Rasterdatenbank, die Flächeneigenschaften, Bevölkerungsverteilung und energierelevante Parameter georeferenziert

erfasst. Sie basiert auf einem hierarchischen Gittermodell mit einer feinsten Auflösung von 100 x 100 Metern (1 ha) und ermöglicht eine detaillierte und skalierbare Untersuchung der räumlichen Verteilung erneuerbarer Energien in Deutschland.

### **100 x 100 Meter Gitterstruktur**

Das Raster folgt einer flächentreuen Projektion (EPSG:3035, LAEA – Lambert Azimuthal Equal Area), die insbesondere in europäischen Vergleichsanalysen und dem Zensus 2021 verwendet wird (EPSG 3035). Dadurch bleibt die Flächenberechnung verzerrungsarm und die Rasterstruktur ist mit amtlichen Datensätzen kompatibel.

Die Rasterdatenbank vereint eine Vielzahl geografischer, demografischer und energiewirtschaftlicher Informationen, die als numerische und kategoriale Layer gespeichert sind. Dazu zählen:

- administrative Gliederungen (Bundesländer, Landkreise, Gemeinden)
- Topografie, Landnutzung und Flächentypen (z. B. urbane Gebiete, Landwirtschaftsflächen, Naturschutzgebiete)
- Potentialflächen für EE-Anlagen (unter Berücksichtigung regulatorischer Einschränkungen)
- rasterbasierte Bevölkerungsdaten (aus Zensus und Mikrozensus)

Diese Struktur erlaubt eine gezielte Filterung und Kombination von Flächenmerkmalen.

Für die EE-Verteilungsalgorithmen wurden spezifische Datensätze eingebunden, die als Grundlage für die Berechnung der Gerechtigkeitsmetriken dienen:

- Bevölkerungszahl pro Rasterzelle (skaliert auf 100 x 100 m)
- Gesamtfläche der Gitterzelle
- Stromnachfrage pro Rasterzelle (als Referenzgröße für verbrauchsnahe Verteilung)
- Stromerzeugung
- Potentialflächen für EE-Anlagen (Flächenbeschränkungen durch regulatorische und topografische Kriterien)

Auf Basis dieser Datenstruktur kann die Belastung und der Nutzen räumlich differenziert bewertet werden und dient als Grundlage für die gerechten Verteilungen von EE-Anlagen im Projekt.

### **Wetterdaten, Volllaststunden, Einspeisezeitreihen**

Zur Bestimmung der Standortbedingungen in den Rasterzellen wurden Wetterdaten des Jahres 2012 in stündlicher Auflösung für verschiedene Höhen verwendet. Diese Daten dienen sowohl der ökonomisch orientierten Anlagenverteilung als auch der Berechnung regionaler Erzeugungsprofile für Wind- und Solarenergie.

Für Wind wurde als Datenquelle die COSMO REA6 Reanalyse (Kaspar et al. 2020) verwendet. Für Photovoltaik wurde der ERA5 Datensatz (Hersbach et al. 2020) herangezogen. Die Zuordnung der



Wetterdaten zum Zielraster erfolgte über die nearest neighbour-Methode. Die Volllaststunden und Einspeisezeitreihen wurden mithilfe der Softwarebibliothek atlite (Hofmann et al. 2021) berechnet.

### Anlagentypwahl: Windenergie

Für die Windenergieerzeugung wurde je nach mittlerer Windgeschwindigkeit pro Rasterzelle nach (Umweltbundesamt (UBA) 2013) zwischen der Errichtung einer Stark- und Schwachwindanlage unterschieden:

- Ab einer mittleren Windgeschwindigkeit von 7,5 m/s (in 125 m Höhe): Installation einer Starkwindanlage
- Bei geringeren Windgeschwindigkeiten: Schwachwindanlage.

Die Auswahl der konkreten Anlagentypen wurde auf Grundlage einer Analyse des Marktstammdatenregisters (Bundesnetzagentur 2020), das aufzeigt, welche Anlagentypen in Deutschland seit dem Jahr 2020 am häufigsten zugebaut wurden, vorgenommen.

Für die Analyse wird dabei nach dem Verhältnis von installierter Leistung zur Rotorfläche unterschieden:

- $< 0,35 \text{ kW/m}^2 \rightarrow$  **Schwachwindanlage** (größerer Rotor, niedrige spezifische Leistung)
- $\geq 0,35 \text{ kW/m}^2 \rightarrow$  **Starkwindanlage**

Bei den Schwachwindanlagen ergab die Analyse ein klares Ergebnis für die Enercon E-141/420 EP 4 mit einer Nabenhöhe von 160 m und 4200 kW Leistung. Bei den Starkwindanlagen nutzen wir das Modell E-101/3050 E2 mit 135 m Nabenhöhe und 3050 kW Leistung, welche eine der beiden am häufigsten errichteten Anlagentypen seit 2020 ist.

### Anlagentypwahl: PV

Für alle PV-Anlagentypen wurde das PV Modul CSi verwendet. Die Modulkonfigurationen lauten:

- Für Aufdach-, Freiflächen- und hochaufgeständerte Agri-PV: Südausrichtung der PV-Module, 30° Neigung, ohne Nachführung
- Für bifaziale Agri-PV: West-Ost-Ausrichtung der Module, jeweils ein Modul ist mit 90° Neigung nach Westen und nach Osten ausgerichtet.

Zur Ermittlung der Volllaststunden wird die Summe der stündlichen Erzeugung je Rasterzelle über das Jahr gebildet. Für die rasterspezifischen Einspeiseprofile werden je Raster die Einspeisezeitreihen mit der installierten Leistung multipliziert. Um ein deutschlandweites Einspeiseprofil zu bilden, werden die Einspeisungen über alle Rasterzellen für jeden Zeitschritt aufsummiert.

## 4.2 Gleichverteilungslogik

Wie stark sich Regionen am Ausbau erneuerbarer Energien beteiligen, ist nicht nur eine Frage technischer Eignung, sondern auch eine Frage der fairen räumlichen Verteilung. Eine an

akzeptierten Gerechtigkeitskriterien orientierte Steuerung kann dazu beitragen, Akzeptanz zu fördern, Lasten und Nutzen ausgewogen zu verteilen und extreme regionale Konzentrationen zu vermeiden. Daraus ergibt sich die zentrale Frage: Wie müsste ein Algorithmus beschaffen sein, um einen solchen gerechten Ausbau zu entwerfen?

Um diese Frage zu untersuchen, wird im Folgenden ein Gleichverteilungsalgorithmus eingesetzt, der deutschlandweite Ausbauziele für Wind- und Photovoltaikanlagen so im Raum verteilt, dass jede Rasterzelle möglichst gleich behandelt wird, orientiert an einem gewählten Gerechtigkeitsmaßstab und unter Berücksichtigung von Potentialflächen, Flächenverbräuchen und politischen Rahmenbedingungen.

Das Kapitel gliedert sich in drei Teile: Zunächst wird der Algorithmus selbst beschrieben, anschließend die zugrundeliegenden Parameter erläutert und schließlich gezeigt, wie die Qualität der resultierenden Verteilungen im Auswertungsschritt bewertet werden kann.

#### 4.2.1 Der Algorithmus: Grundprinzip der Gleichverteilung

Um eine möglichst gleichmäßige Verteilung des EE-Zubaus über den Raum zu ermöglichen, wurde ein algorithmisches Verfahren entwickelt, das die vorgegebenen Ausbauziele je Technologie (z. B. in GW) auf  $10 \times 10$  km große Rasterzellen überträgt. Grundlage ist jeweils ein Gerechtigkeitskriterium, das definiert, was als „gleich“ gelten soll – etwa ein gleicher Flächenanteil, eine gleichmäßige Belastung pro Kopf oder eine einheitliche Nutzung der verfügbaren Potentialfläche.

Ziel des Algorithmus ist es, allen Rasterzelle denselben Belastungsgrad gemäß dem gewählten Kriterium zuzuweisen – soweit dies technisch möglich ist. Die Verteilung erfolgt dabei schrittweise und potentialbasiert:

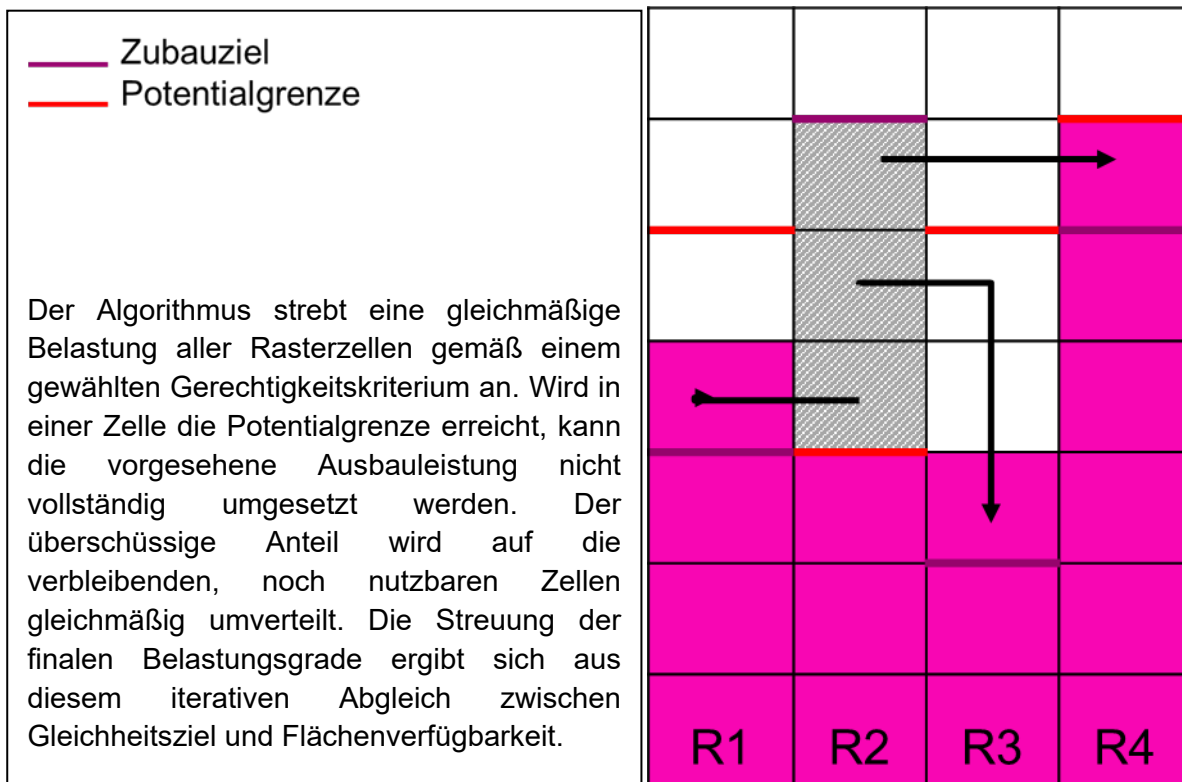
- Es liegt ein technologiespezifisches Ausbauziel für Deutschland (und ggf. zusätzlich je Bundesland) vor. Mithilfe der Gerechtigkeitsmetrik kann daraus ein Zielwert an EE-Ausbau für jede Rasterzelle abgeleitet werden, dessen Erreichung eine gleichmäßige Belastung bewirken würde.
- Jede Zelle kann bis zu ihrer individuellen Potentialgrenze mit EE-Anlagen belegt werden.
- Wird diese Grenze erreicht, kann in der Rasterzelle nicht weiter ausgebaut werden – sie bleibt unter dem Gleichverteilungswert.
- Der verbleibende Überschuss wird gleichmäßig auf die noch nutzbaren Zellen (innerhalb desselben Bundeslandes) verteilt.
- Dieser Schritt wird iterativ wiederholt, bis das übergeordnete Ausbauziel erreicht ist.
- Im Ergebnis liegt für jede Rasterzelle ein EE-Ausbauziel vor, das dem gewählten Gerechtigkeitskriterium bestmöglich entspricht.

Besonderheiten ergeben sich, wenn mehrere Technologien nacheinander verteilt werden (z. B. Freiflächen-PV, Agri-PV hochaufgeständert, bifazial). In diesem Fall fließen die bereits belegten Flächen in die Berechnung des Gerechtigkeitsmetrik-Werts innerhalb der nachfolgenden

Verteilungen ein. Auch bundeslandspezifische Ausbauziele werden im Algorithmus berücksichtigt. Das räumlich aufgelöste Ergebnis kann über Karten und Belastungsverteilungen visualisiert werden.

Abbildung 4-1 veranschaulicht das Vorgehen des Algorithmus: Überschüsse aus Rasterzellen, die ihre Ausbaugrenze erreicht haben, werden gleichmäßig auf umliegende Zellen mit verbleibendem Potential verteilt.

**Abbildung 4-1: Schema des Gleichverteilungsalgorithmus**



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Der in Python programmierte Algorithmus setzt das beschriebene Gleichverteilungsprinzip technisch um, indem er die Ausbauziele iterativ auf die Rasterzellen verteilt. Dabei wird für jede Technologie einzeln vorgegangen. Zunächst werden alle relevanten Eingabedaten (z. B. Potentialflächen, Bevölkerung, installierte Leistung) vereinheitlicht. Anschließend wird für jede Rasterzelle ein Zielwert berechnet, der dem angestrebten Gleichverteilungsniveau gemäß der gewählten Gerechtigkeitsmetrik entspricht.

Die Verteilung erfolgt schrittweise: In jeder Iteration wird ein kleiner Teil der noch zu verteilenden Kapazität auf jene Zellen aufgeteilt, die aktuell am wenigsten belastet sind. Dabei wird berücksichtigt, wie viel Fläche in der jeweiligen Zelle noch verfügbar ist. Sobald eine Zelle ihre Potentialgrenze erreicht, wird sie vom weiteren Ausbau ausgeschlossen. Die verbleibende Kapazität wird dann auf die übrigen, noch befüllbaren Zellen verteilt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis das gesamte Ausbauziel erreicht ist oder keine weiteren Flächen mehr zur Verfügung stehen.

Besonderheiten ergeben sich, wenn mehrere Technologien nacheinander verteilt werden: Bereits belegte Flächen fließen dann in die Berechnung der Belastung mit ein. Auch bundeslandspezifische

Ausbauziele können berücksichtigt werden. In diesem Fall erfolgt die Verteilung zunächst innerhalb der Ländergrenzen, bevor eine bundesweite Verteilung erfolgt.

Das Ergebnis ist eine potentialbasierte, gerechte Verteilung des EE-Zubaus, die sowohl technische als auch politische Rahmenbedingungen berücksichtigt.

Für die Berechnung der Gerechtigkeitsverteilungen wurde im Projekt auf ein einheitliches 10 × 10 km-Raster zurückgegriffen. Diese Entscheidung erfolgte bewusst statt einer Berechnung auf Gemeindeebene, da Gemeinden in Deutschland stark in Größe, Struktur und Potentialverfügbarkeit variieren. Gerade flächen- oder bevölkerungsbezogene Gerechtigkeitsmetriken führen auf Gemeindeebene zu systematischen Verzerrungen, die eine Vergleichbarkeit erschweren. Das Rastermodell ermöglicht dagegen eine methodisch faire und technisch konsistente Grundlage, auf der der Algorithmus Gleichverteilungen erzeugen kann. Die Rückübertragung auf administrative Einheiten – etwa Gemeinden – ist dennoch erforderlich, um die Ergebnisse in die Planungspraxis zu überführen. Diese Herausforderung wird in Kapitel 6 behandelt.

#### 4.2.2 Die Eingangsdaten zur Parametrierung

Damit der Algorithmus zu Verteilungsergebnissen führt, muss er mit geeigneten Daten und Randbedingungen gespeist werden. Die Parametrierung umfasst dabei sowohl technologische Vorgaben (z. B. Ausbauziele, Flächenverbräuche), als auch räumliche Rahmenbedingungen (z. B. Potentialflächen, politische Zielvorgaben pro Bundesland).

Im Einzelnen umfasst die Parametrierung folgende Elemente:

- **Raumstruktur:** Die Berechnung erfolgt auf Basis eines deutschlandweiten 10 × 10 km-Rasters. Dieses Raster aggregiert eine feinere Ursprungsauflösung von 100 × 100 m und entspricht in seiner Fläche in etwa der durchschnittlichen Gemeindegröße in Deutschland.
- **Technologiespezifische Ausbauziele:** Für jede EE-Technologie wird ein deutschlandweites Ausbauziel in GW vorgegeben. Die Ausbauziele basieren auf dem Szenario T45-Strom der Langfristszenarien (Fraunhofer ISI et al. 2021) und stellen einen Zielzustand dar, in dem die Transformation hin zu einem klimaneutralen Stromsystem erfolgt ist. Tabelle 4-1 listet die zu verteilenden Gesamtleistungen auf.

**Tabelle 4-1: Ausbauziele: Installierte Leistung je EE-Technologie in 2045**

Technologie	Anteil an Ausbauziel	Ausbauziel in GW
Wind onshore		160
Wind offshore		70
PV		428
Aufdach-PV	52 %	221
Freiflächen-PV	48 %	207
	<i>Klassische FF-PV</i>	190
	<i>Agri-PV bifazial</i>	8,6
	<i>Agri-PV hochaufgeständert</i>	8,6

Ausbauziele bis 2045 auf Basis des Langfristszenarios T45-Strom (Fraunhofer ISI et al. 2021)

Quelle: (Fraunhofer ISI et al. 2021)

- **Politische Flächenziele auf Länderebene:** Für Windenergie an Land wurden die Flächenziele gemäß dem Windenergieflächenbedarfsgesetz (WindBG) übernommen. Zusätzlich wurden auch für Freiflächen-PV indikative Flächenziele pro Bundesland definiert, abgeleitet aus dem Szenariorahmen C2045 des Netzentwicklungsplans Strom (50Hertz Transmission (50Hertz) et al. 2024). Diese dienen im Algorithmus als Mindestvorgabe je Bundesland, vgl. Tabelle 4-2.

**Tabelle 4-2: Flächenziele je Bundesland für Wind und FF-PV**

Bundesland	PV-FF	Wind onshore
Schleswig-Holstein	0,9 %	2,0 %
Hamburg	0,0 %	0,5 %
Niedersachsen	0,6 %	2,2 %
Bremen	0,0 %	0,5 %
Nordrhein-Westfalen	0,3 %	1,8 %
Hessen	0,4 %	2,2 %
Rheinland-Pfalz	0,5 %	2,2 %
Baden-Württemberg	0,5 %	1,8 %
Bayern	0,7 %	1,8 %
Saarland	0,6 %	1,8 %
Berlin	0,0 %	0,5 %
Brandenburg	1,0 %	2,2 %
Mecklenburg-Vorpommern	1,0 %	2,1 %
Sachsen	0,9 %	2,0 %
Sachsen-Anhalt	0,8 %	2,2 %
Thüringen	0,6 %	2,2 %

Quelle: PV: 50Hertz Transmission (50Hertz) et al. (2024). Wind: Bundesministerium der Justiz (BMJ) (20.07.2022)

- **Technologieabhängiger Flächenverbrauch:** Um die EE-Leistungen in Flächenverbrauch umzurechnen, wurden technologiespezifische Werte in m<sup>2</sup>/kW angenommen. Für Windenergie basiert die Berechnung auf einer Auswertung des Marktstammdatenregisters und einer Annahme zum Flächenbedarf im Umkreis des Rotors. Die Verteilung von Fläche zu installierter Leistung liegt bei 42 m<sup>2</sup> pro Kilowatt installierter Leistung. Die Analyse von Bons et al. (2022b) kommt je nach Rotordurchmesser zu ähnlichen Ergebnissen von knapp 40 m<sup>2</sup> pro Kilowatt. Für die PV-Technologien wurden die Annahmen aus Jäger et al. (2022) übernommen (siehe Tabelle 4-3).

**Tabelle 4-3: Flächenverbräuche der EE-Technologien**

Technologie	Flächenverbrauch in m <sup>2</sup> /kW
Wind onshore	42
PV-FF klassisch	10

Technologie	Flächenverbrauch in m <sup>2</sup> /kW
Agri-PV bifazial	34,48
Agri-PV hochaufgeständert	13,51

Quelle: PV: Jäger et al. (2022) . Wind: eigene Analyse auf Basis von Marktstammdatenregister (Bundesnetzagentur 2020)

Die Parametrierung legt die anzustrebenden Belastungswerte je Rasterzelle fest – ausgehend von der gewählten Gerechtigkeitsmetrik und den definierten Ausbauzielen. Die Frage, inwieweit diese Zielwerte im praktischen Verteilungsergebnis realisiert werden konnten, wird im nächsten Abschnitt bewertet.

#### 4.2.3 Bewertung der Ergebnisse: Die Güte der Gleichverteilung

Zur Bewertung der Verteilungsergebnisse wird für jede Gerechtigkeitsmetrik eine Verteilungsgüte berechnet. Diese gibt an, wie gut der algorithmisch angestrebte Gleichverteilungswert in der Fläche erreicht wurde – also, in welchem Maß sich die Belastung tatsächlich gleichmäßig verteilt.

Die Bewertung erfolgt anhand von Heatmaps, die den Belastungsgrad je Rasterzelle im Verhältnis zum angestrebten Zielwert darstellen:

- Gleichmäßig eingefärbte Rasterzellen innerhalb eines Bundeslands weisen auf eine gute Zielerreichung hin.
- Heller eingefärbte Zellen im Bundesland sind unterbelastet – sie haben ihre Potentialgrenze erreicht und konnten daher nicht vollständig ausgebaut werden.
- Dunkler eingefärbte Zellen im selben Bundesland sind überbelastet, da sie Ausbauleistung übernehmen, die in anderen Zellen aufgrund von Einschränkungen nicht umgesetzt werden konnte.

Diese Karten dienen in den Ergebniskapiteln als Werkzeug zur Bewertung der Verteilung.

## 5 Ergebnisse Regionalisierungsszenarien

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der fünf untersuchten Gerechtigkeitsverteilungen für den Ausbau von Windenergie und Freiflächen-Photovoltaik (inklusive Agri-PV) vorgestellt. Ziel ist es, die räumlichen Unterschiede sichtbar zu machen, die sich aus den jeweils gewählten Gerechtigkeitskriterien ergeben.

Die Darstellung erfolgt auf Rasterebene (10 × 10 km) und zeigt die Verteilung der installierten Leistung über das Bundesgebiet.

Zur Veranschaulichung werden Heatmaps genutzt, die die räumlichen Schwerpunkte und Unterschiede zwischen den Szenarien deutlich machen. Die Darstellung erfolgt in zwei Maßstabsebenen:

- Bundesweite Darstellung: Überblick über die Verteilungsmuster im gesamten Bundesgebiet.
- Fokusregion Oderland-Spree: Beispielhafte Vertiefung für eine Planungsregion mit gemischten Strukturen (ländlich, urban, naturräumlich geprägt).

Diese zweistufige Darstellung zeigt, wie sich die Wahl der Gerechtigkeitsmetrik auf die räumliche Lastenverteilung auswirkt – sowohl bundesweit als auch in einem konkreten regionalen Raum.

## 5.1 Ausbauempfehlungen Wind onshore auf Rasterebene: Deutschlandweite Verteilung

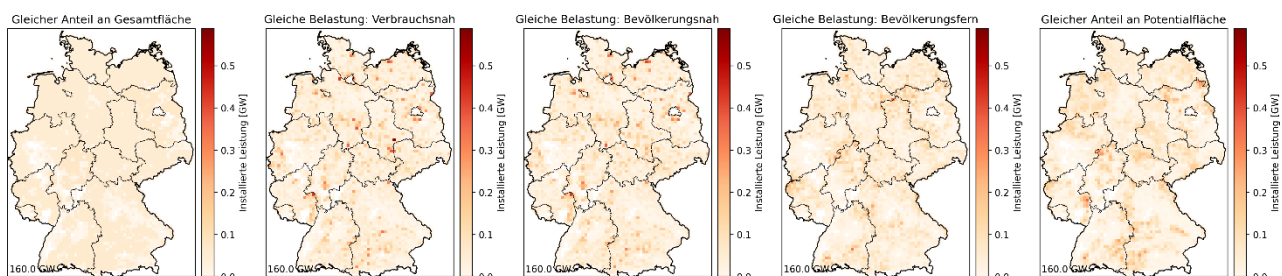
Die folgenden Karten zeigen die räumliche Verteilung des Windenergieausbaus im Jahr 2045, berechnet für fünf unterschiedliche Gerechtigkeitsmetriken. Für alle Verteilungen gelten identische Rahmenbedingungen:

- Ein bundesweites Ausbauziel von 160 GW,
- Identische Flächenvorgaben pro Bundesland,
- Identische Potentialfläche mit einem Mindestabstand von 400 m zu Siedlungen und einer Mindestwindgeschwindigkeit von 7 m/s.

Der Gleichverteilungsalgorithmus weist die Leistungen so zu, dass die Belastung je Rasterzelle möglichst gleich ausfällt – gemäß der jeweils gewählten Gerechtigkeitsmetrik.

Auf den ersten Blick unterscheiden sich die fünf Verteilungen nur geringfügig. In allen Szenarien konzentriert sich der Ausbau auf windstarke Regionen im Norden und Osten Deutschlands. Die Unterschiede liegen vor allem in der Feinverteilung – also darin, welche Regionen innerhalb der Potentialflächen stärker oder schwächer belastet werden.

**Abbildung 5-1: Wind onshore Verteilungen für Deutschland auf Rasterebene**



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Abbildung 5-1 zeigt die fünf algorithmisch berechneten Verteilungen des Windenergiezubaues nach den untersuchten Gerechtigkeitsmetriken, die auf den oben beschriebenen Rahmenbedingungen basieren.

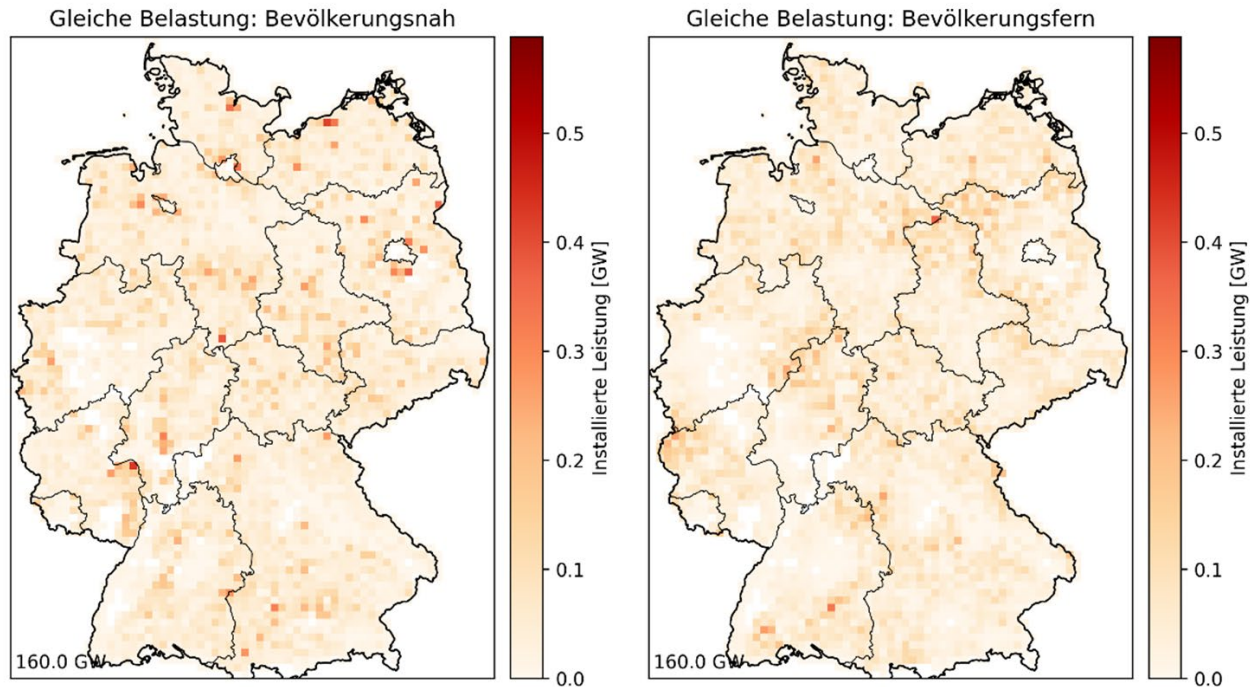
Unabhängig von der gewählten Metrik konzentriert sich der Ausbau in allen Szenarien auf die bekannten windstarken Regionen im Norden und Osten Deutschlands – insbesondere Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg. Diese grobe räumliche Struktur bleibt bestehen, da die Bundeslandvorgaben eine übergeordnete regionale Zuteilung vorgeben.

Unterschiede zwischen den Gerechtigkeitsmetriken zeigen sich vor allem in der Feinverteilung innerhalb dieser Ausbauggebiete: je nachdem, ob dem Flächenanteil, der Bevölkerungsnähe oder der Lastdichte Priorität eingeräumt wird. Besonders deutlich werden diese Unterschiede im



Vergleich der Szenarien „Bevölkerungsnah“ und „Bevölkerungsfern“, die im Folgenden näher betrachtet werden.

**Abbildung 5-2: Wind onshore Verteilungen für Deutschland auf Rasterebene im Detail**



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Abbildung 5-2 zeigt exemplarisch die Verteilung des Windenergiezubaues im Vergleich zweier gegensätzlicher Gerechtigkeitsmetriken: „Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah“ (links) und „Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern“ (rechts).

Im bevölkerungsnahen Szenario wird der Ausbau verstärkt in Regionen gelenkt, die in der Nähe dichter besiedelter Räume liegen. Besonders sichtbar wird dies in den Randbereichen von Metropolregionen wie Berlin, Hamburg, dem Rhein-Main-Gebiet oder im westlichen Nordrhein-Westfalen. Innerhalb der urbanen Zentren selbst bleibt der Ausbau allerdings begrenzt – dort begrenzt die Potentialfläche die Ausbauempfehlung.

Ersichtlich wird dies an der Analyse der Güte der Verteilung. Im bevölkerungsnahen Szenario gibt es deutliche Abweichungen vom Gleichverteilungsziel, insbesondere in den urbanen Zentren, die kaum Potentialfläche aufweisen. Diese Zellen bleiben unterbelastet, während angrenzende Zellen eine überproportionale Ausbauleistung tragen, vgl. Abbildung 5-3.

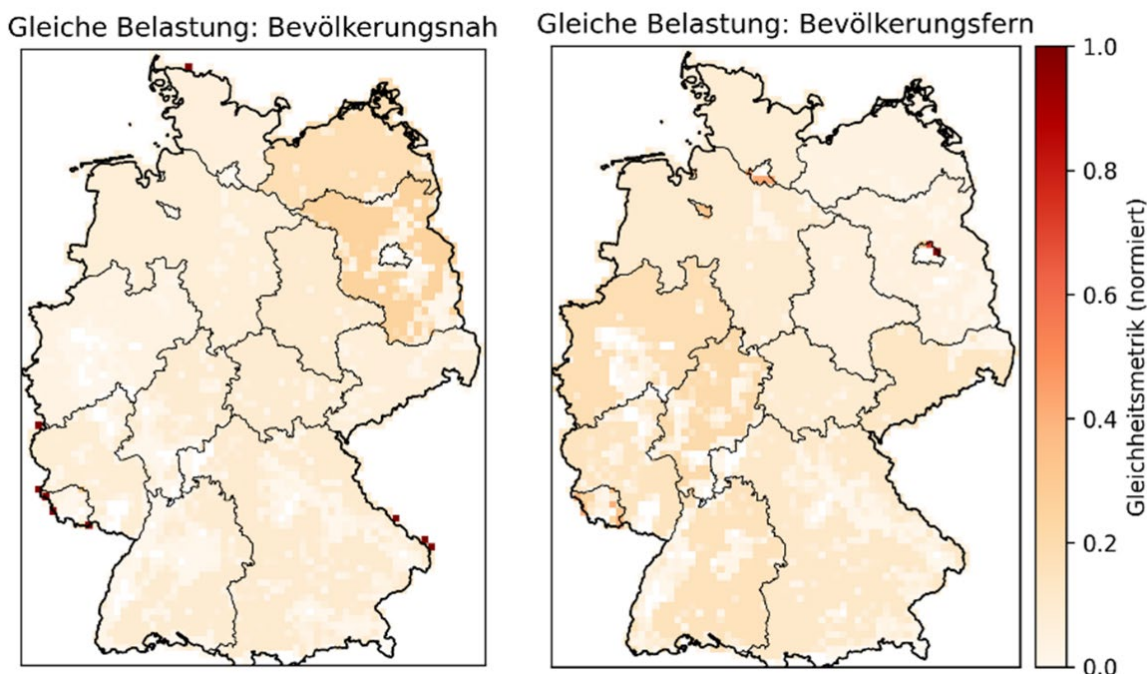
Im Gegensatz dazu verschiebt sich der Ausbau im bevölkerungsfernen Szenario deutlich in periphere, dünn besiedelte Räume. Auffällig sind stärkere Ausbautintensitäten in Nordost-Mecklenburg-Vorpommern, der Uckermark, Teilen Sachsen-Anhalts, aber auch in ländlichen Regionen Südniedersachsens oder im nördlichen Brandenburg. Diese Verschiebung ergibt sich direkt aus dem Gerechtigkeitskriterium, das besiedelte Räume entlasten soll.

Im bevölkerungsfernen Szenario fällt die Heatmap der Verteilungsgüte insgesamt homogener aus: Die Zielverteilung lässt sich besser realisieren, da der Ausbau in ländliche, potentialstärkere



Regionen verlagert wird, in denen weniger physische oder regulatorische Begrenzungen bestehen, vgl. Abbildung 5-3.

**Abbildung 5-3: Güte der gegensätzlichen Verteilungen: Wind bevölkerungsnah (links) und bevölkerungsfern (rechts)**



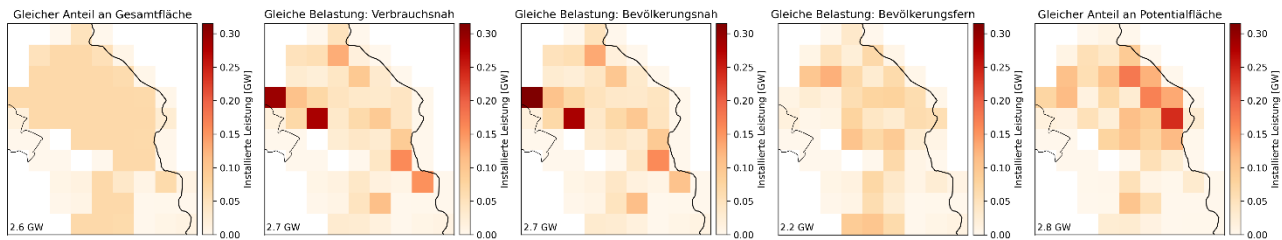
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Der Vergleich zeigt, dass die Wahl der Gerechtigkeitsmetrik spürbare räumliche Unterschiede im Ausbaufokus erzeugt – wenngleich nur innerhalb des durch Potentialflächen und Landesvorgaben gesetzten Rahmens. In beiden Fällen müssen Ausbauziele auf Landesebene erfüllt werden, was die Möglichkeit, „extreme“ Verteilungen umzusetzen, begrenzt.

### Ergebnisse Wind für die Region Oderland-Spree

Zur Vertiefung der bundesweiten Ergebnisse wurde die Planungsregion Oderland-Spree beispielhaft betrachtet. Die Region liegt vollständig innerhalb Brandenburgs, ist aber nur ein Teilgebiet dessen. Dadurch kann es je nach Gerechtigkeitsmetrik zu unterschiedlichen Ausbauempfehlungen innerhalb der Region kommen, obwohl das deutschlandweite Ausbauziel gleichbleibt. Hier schwankt die von der Gerechtigkeitsmetrik abhängige Ausbauempfehlung für die Region zwischen 2,2 GW (Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah) und 2,8 GW (Gleicher Anteil an Potentialfläche).

#### Abbildung 5-4: Wind onshore Verteilungen für Oderland-Spree auf Rasterebene



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Abbildung 5-4 zeigt die Verteilung der Windenergieausbauempfehlungen auf Rasterebene innerhalb der Region für die fünf Gerechtigkeitsmetriken. Der Vergleich macht deutlich:

- Die Verteilungen in den Szenarien „Bevölkerungsnah“ und „Verbrauchsnah“ sind nahezu identisch. Beide führen zu einer stärkeren Konzentration im Nordwesten der Region, wo sowohl Strombedarf als auch Bevölkerungsdichte vergleichsweise hoch sind.
- Im Kontrast dazu zeigt das Szenario „Bevölkerungsfern“ eine deutlich peripherere Verteilung, mit Ausbauzellen im Südosten und entlang der Außengrenzen zur dünnen besiedelten Uckermark.
- Die gleichmäßigste Verteilung wird im Szenario „Gleicher Anteil an Gesamtfläche“ erzielt. Hier wird der Ausbau relativ gleich über die Region gestreut, unabhängig von Bevölkerungsdichte oder Stromverbrauch.
- Das Szenario „Gleicher Anteil an Potentialfläche“ konzentriert den Ausbau erwartungsgemäß auf windgünstige Lagen im Nordosten der Region.

Die Region zeigt exemplarisch, wie stark sich die Wahl der Gerechtigkeitsmetrik auf die räumliche Allokation des EE-Zubaus selbst innerhalb eines Teilgebiets auswirken kann.

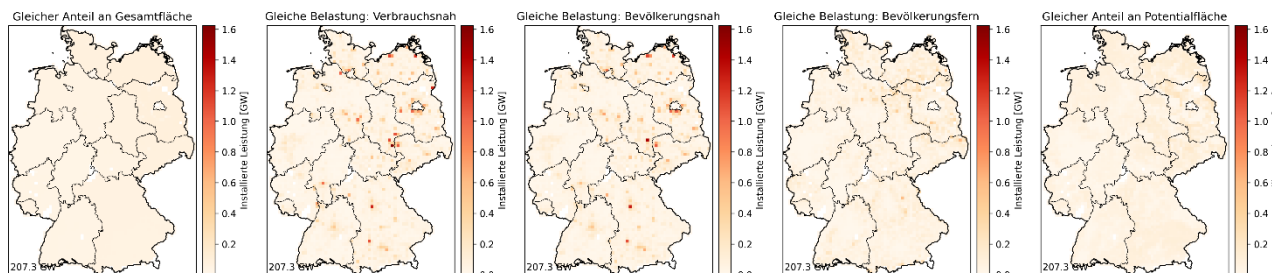
## 5.2 Ausbauempfehlung FF-PV auf Rasterebene: Deutschlandweite Verteilung

Rahmenbedingungen:

- Ein bundesweites Ausbauziel von 207,3 GW,
- Identische Flächenvorgaben pro Bundesland,
- Identische Potentialflächen, differenziert für klassische Freiflächen-Photovoltaik, Agri-PV Flächen mit geringer Nutzungskonkurrenz (bifaziale Module) und Agri-PV mit Synergieeffekten (hochaufgeständerte Module auf Dauerkulturen).

Der Gleichverteilungsalgorithmus weist die Leistungen so zu, dass die Belastung je Rasterzelle möglichst gleich ausfällt – gemäß der jeweils gewählten Gerechtigkeitsmetrik. Die unterschiedlichen Freiflächen-PV Technologien werden nacheinander ausgebaut. Die bereits belegten Flächen fließen in die Berechnung der nachfolgenden Verteilungen ein.

## Abbildung 5-5: PV-FF Verteilungen für Deutschland auf Rasterebene



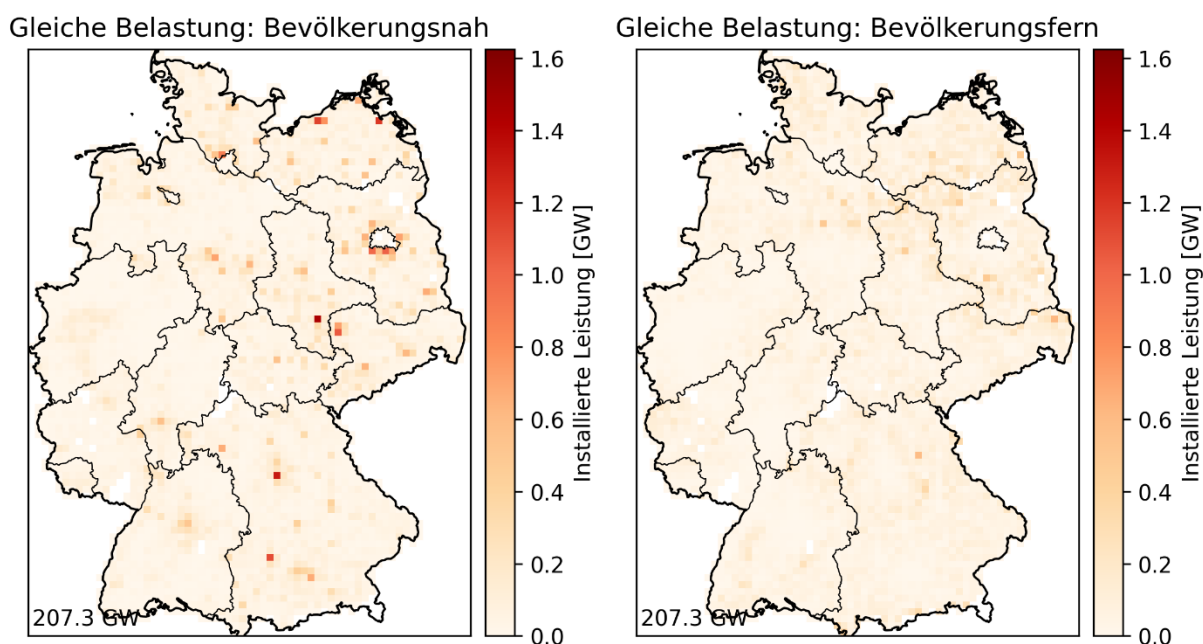
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Abbildung 5-5 zeigt die fünf algorithmisch berechneten Verteilungen des Freiflächen-PV Ausbaus nach den untersuchten Gerechtigkeitsmetriken, die auf den oben beschriebenen Rahmenbedingungen basieren.

Der Ausbau in den beiden Gerechtigkeitsmetriken „Anteil an Gesamtfläche“ und „Anteil an Potentialfläche“ ist aufgrund der großen verfügbaren Potentialfläche sehr ähnlich. Bei den beiden Metriken „Verbrauchsnah“ und „Bevölkerungsnah“ werden vor allem westliche und südliche Gemeinden in Nordrheinwestfalen und Baden-Württemberg stärker belastet.

Unterschiede zwischen den Gerechtigkeitsmetriken zeigen sich vor allem in der Feinverteilung innerhalb dieser Ausbauggebiete: je nachdem, ob dem Flächenanteil, der Bevölkerungsnähe oder der Lastdichte Priorität eingeräumt wird. Besonders deutlich werden diese Unterschiede im Vergleich der Szenarien „Bevölkerungsnah“ und „Bevölkerungsfern“, die im Folgenden näher betrachtet werden.

## Abbildung 5-6: PV-FF Verteilungen für Deutschland auf Rasterebene im Detail



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Abbildung 5-6 zeigt exemplarisch die Verteilung des Freiflächen-PV Ausbaus im Vergleich zweier gegensätzlicher Gerechtigkeitsmetriken: „Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah“ (links) und „Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern“ (rechts).

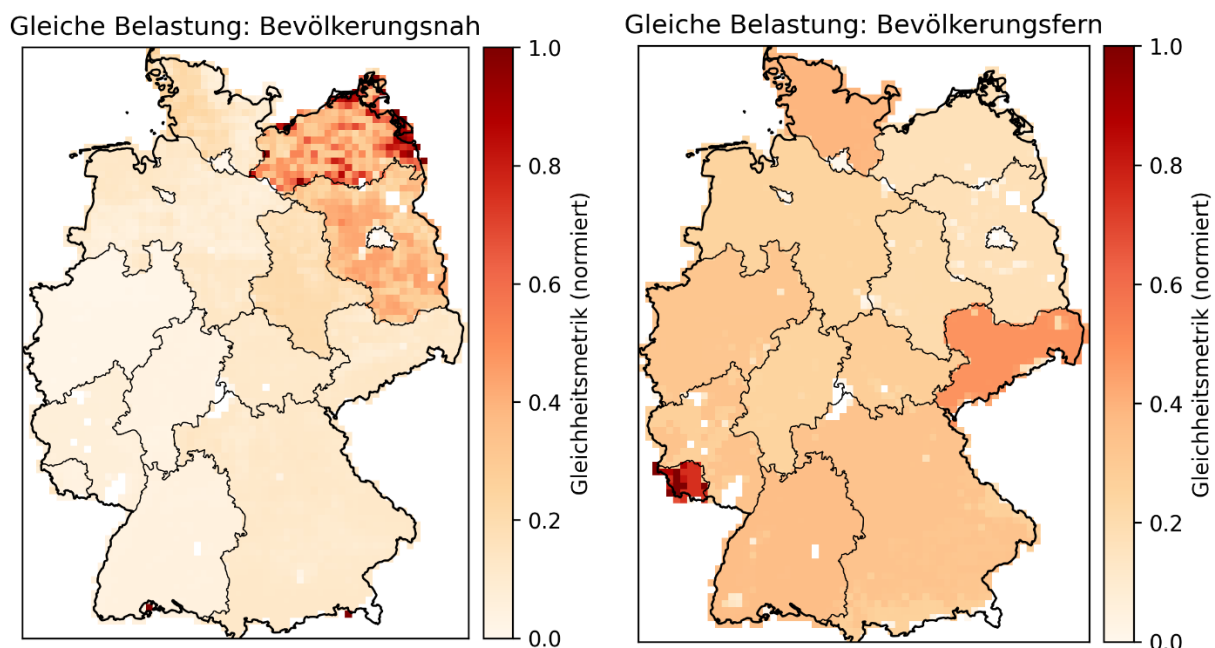
Im bevölkerungsnahen Szenario wird der Ausbau verstärkt in Regionen gelenkt, die in der Nähe dichter besiedelter Räume liegen. Besonders sichtbar wird dies in den Randbereichen von Metropolregionen wie Berlin, Hamburg, dem Rhein-Main-Gebiet oder im westlichen Nordrhein-Westfalen. Innerhalb der urbanen Zentren selbst bleibt der Ausbau allerdings begrenzt – dort begrenzt die Potentialfläche die Ausbauempfehlung.

Ersichtlich wird dies an der Analyse der Güte der Verteilung in Abbildung 5-7. Im bevölkerungsnahen Szenario gibt es deutliche Abweichungen vom Gleichverteilungsziel, insbesondere in den urbanen Zentren, die kaum Potentialfläche aufweisen. Diese Zellen bleiben unterbelastet, während angrenzende Zellen eine überproportionale Ausbauleistung tragen.

Auffällig sind die rot eingefärbten Rasterzellen in Mecklenburg-Vorpommern in der Gerechtigkeitsmetriken „gleiche Belastung: Bevölkerungsnah“. Grund dafür ist, dass anhand dieser beiden Gerechtigkeitsvorstellung in diesen Rasterzellen weniger Zubau notwendig gewesen wäre, um einen gleichverteilten Wert zu erreichen. Die Zielvorgaben für die einzelnen Bundesländer führen dazu, dass nicht auf andere Rasterzellen zugegriffen werden kann und dadurch in einzelnen Feldern mehr Ausbau stattfindet, um das Bundesland-Ziel zu erfüllen. In den Heatmaps wird vor allem deutlich, dass innerhalb der einzelnen Bundesländer ein homogenes Farbbild vorherrscht und dadurch eine recht gute Gleichverteilung erreicht wird.

Im bevölkerungsfernen Szenario fällt die Heatmap der Verteilungsgüte insgesamt homogener aus: Die Zielverteilung lässt sich besser realisieren, da der Ausbau in ländliche, potentialstärkere Regionen verlagert wird, in denen weniger physische oder regulatorische Begrenzungen bestehen.

**Abbildung 5-7: Güte der gegensätzlichen Verteilungen: PV-FF bevölkerungsnah (links) und bevölkerungsfern (rechts)**



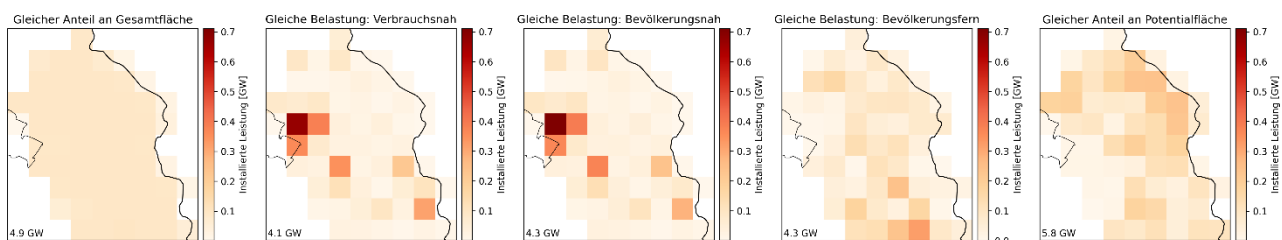
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Der Vergleich zeigt, dass die Wahl der Gerechtigkeitsmetrik spürbare räumliche Unterschiede im Ausbaufokus erzeugt – wenngleich nur innerhalb des durch Potentialflächen und Landesvorgaben gesetzten Rahmens. In beiden Fällen müssen Ausbauziele auf Landesebene erfüllt werden, was die Möglichkeit, „extreme“ Verteilungen umzusetzen, begrenzt.

### Ergebnisse PF-FF für die Region Oderland-Spree

Zur Vertiefung der bundesweiten Ergebnisse wurde die Planungsregion Oderland-Spree beispielhaft betrachtet. Die Region liegt vollständig innerhalb Brandenburgs, ist aber nur ein Teilgebiet dessen. Dadurch kann es je nach Gerechtigkeitsmetrik zu unterschiedlichen Ausbauempfehlungen innerhalb der Region kommen, obwohl das deutschlandweite Ausbauziel gleichbleibt. Hier schwankt die von der Gerechtigkeitsmetrik abhängige Ausbauempfehlung für die Region lediglich zwischen 4,1 GW (Gleiche Belastung: Verbrauchsnah) und 5,8 GW (Gleicher Anteil an Potentialfläche).

**Abbildung 5-8: Wind onshore Verteilungen für Oderland-Spree auf Rasterebene**



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Abbildung 5-8 zeigt die Verteilung der FF-PV Ausbauempfehlung auf Rasterebene innerhalb der Region für die fünf Gerechtigkeitsmetriken. Der Vergleich macht deutlich:

- Die Verteilungen in den Szenarien „Bevölkerungsnah“ und „Verbrauchsnah“ sind nahezu identisch. Beide führen zu einer stärkeren Konzentration im Westen der Region, wo sowohl Strombedarf als auch Bevölkerungsdichte vergleichsweise hoch sind.
- Im Kontrast dazu zeigt das Szenario „Bevölkerungsforn“ eine deutlich periphere Verteilung, mit Ausbauezellen verstärkt im Süden.
- Die gleichmäßigste Verteilung wird im Szenario „Gleicher Anteil an Gesamtfläche“ erzielt. Hier wird der Ausbau gleich über die Region gestreut. Aufgrund keiner Potentialflächenbeschränkungen kann eine gleiche Belastung anhand dieser Metrik erzielt werden.
- Das Szenario „Gleicher Anteil an Potentialfläche“ ähnelt dem Ausbau nach „Bevölkerungsforn“, da die größten Potentialflächen in weniger dicht besiedelten Regionen vorkommen. Die Verteilung anhand verfügbarer Potentialfläche führt zu dem Höchsten Ausbau an FF-PV in der Region mit insgesamt 5,8 GW.



## 6 Übertragung der Gleichverteilung von Rasterzellen auf Gemeindeebene

Die bisherigen Ergebnisse der Gleichverteilung beziehen sich auf ein technisches Rastermodell mit einheitlichen  $10 \times 10$  km Zellen. Dieses Modell bietet eine methodisch saubere Grundlage für die algorithmische Verteilung, bildet jedoch keine administrativen Planungseinheiten ab. In der Praxis erfolgt die Flächenausweisung nicht auf Rasterebene, sondern in der Regel durch regionale Planungsstellen oder die Landesplanung, die für größere, administrativ gegliederte Gebiete zuständig sind.

Für eine kommunikations- und anschlussfähige Auswertung ist eine Übertragung der algorithmischen Ergebnisse auf eine administrative Ebene hilfreich und erforderlich, um sie in den planerischen Diskurs einbringen zu können. Hier bietet sich die Übertragung der Rasterergebnisse auf Gemeindeebene an, unter anderem weil Raster und Gemeindegrößen auf ähnlicher Skala liegen.

Diese Übertragung ist jedoch nicht eindeutig: Zwar liegt für jede Rasterzelle eine klare Ausbauempfehlung vor, doch ist unbestimmt, wie diese innerhalb der Zelle auf die beteiligten Gemeinden verteilt werden soll. Es braucht also eine Annahme darüber, welcher Anteil des Zubaus welcher Gemeinde zugeordnet wird.

Dieses Kapitel zeigt, welche methodischen Wege für diese Übertragung denkbar sind, welche Spielräume sich daraus ergeben und welche pragmatische Lösung im Rahmen des Projekts gewählt wurde.

### 6.1 Methodik

Das Ergebnis des Gleichverteilungsalgorithmus auf Rasterebene ist mathematisch eindeutig: Für jede Rasterzelle steht eine definierte EE-Ausbauempfehlung fest. Sobald diese Empfehlung jedoch auf administrativ gegliederte Einheiten wie Gemeinden übertragen werden soll, geht diese Eindeutigkeit verloren.

Das liegt daran, dass innerhalb einer Rasterzelle in der Regel mehrere Gemeinden liegen. Es bleibt unklar, welcher Anteil des Ausbaus welcher Gemeinde zugewiesen werden soll. Zwar liegt die technische Potentialfläche als Geodateninformation vor, doch ist nicht vorgegeben, in welcher Reihenfolge oder auf welchen Flächen innerhalb der Zelle tatsächlich gebaut werden sollte. Damit entsteht ein methodischer Graubereich – eine Leerstelle zwischen algorithmischer Klarheit und planerischer Anwendbarkeit.

Aus analytischer Sicht lässt sich dieser Bereich als Spielraum beschreiben: Für jede Gemeinde, die an einer Rasterzelle beteiligt ist, lässt sich ein Minimalwert (bei maximaler Übernahme der Last durch die anderen Gemeinden) und ein Maximalwert (bei minimaler Übernahme durch andere) berechnen. Die Bandbreite dazwischen stellt den Bereich dar, in dem eine Gemeinde legitim belastet werden kann, ohne das Ziel der Rasterzelle grundsätzlich zu gefährden.

Allerdings handelt es sich hierbei um ein analytisches Konstrukt, nicht um reale Entscheidungsspielräume. In der Praxis entscheiden Gemeinden nicht autonom über Flächenausweisungen, sondern sind in formelle Planungsverfahren eingebunden, etwa über regionale Planungsgemeinschaften. Die hier beschriebene Bandbreite dient daher nicht als

Handlungsanleitung, sondern als Hilfsmittel zur Übertragung der algorithmischen Rasterergebnisse auf die Ebene administrativer Einheiten, insbesondere der Gemeinden.

Um diesen Spielraum methodisch zu strukturieren, wurden drei Verteilansätze entwickelt, die typische Verhaltensannahmen abbilden. Sie ermöglichen es, die Gemeindeanteile innerhalb einer Rasterzelle systematisch einzugrenzen – zwischen minimaler und maximaler Lastübernahme.

### **Ansatz 1: Nutzung eines Verteilschlüssels**

Ein naheliegender Ansatz zur Übertragung der installierten Leistung von Raster- auf Gemeindeebene ist die Nutzung eines Verteilschlüssels: Die Ausbauleistung einer Rasterzelle wird anteilig auf die Gemeinden verteilt – basierend auf einem innerhalb der Zelle messbaren Kriterium.

Aus Sicht der Gerechtigkeitslogik wäre es naheliegend, den jeweils prägenden Faktor der Gerechtigkeitsmetrik als Schlüssel durchgängig zu verwenden:

- Bei „Gleicher Anteil an Gesamtfläche“ die Gemeindefläche im Raster,
- bei „Gleicher Anteil an Potentialfläche“ die jeweilige Potentialfläche,
- bei „Bevölkerungsnah“ die Bevölkerung der Gemeindeanteile im Raster etc.

Für flächenbezogene Daten wie Potentialflächen oder Gesamtfläche liegt die notwendige Geoinformation vor, sodass dieser Ansatz technisch sauber umgesetzt werden kann. Auch für andere Variablen wie Bevölkerung liegen mit dem Zensus mittlerweile hochaufgelöste Rasterdaten im 100 × 100 m Format vor, die eine feinere Analyse ermöglichen. Dennoch basieren einige energierelevante Metriken wie etwa die Stromnachfrage bislang nur auf aggregierten Gemeindedaten. Diese müssen bei der Rasterverteilung näherungsweise auf die Fläche oder Bevölkerung innerhalb der Gemeinde heruntergebrochen werden, was mit Unsicherheiten behaftet ist.

Vor diesem Hintergrund wurde im Projekt entschieden, die installierte Leistung in allen Szenarien einheitlich nach Potentialfläche auf die Gemeinden zu verteilen. Dieser Ansatz ist aus mehreren Gründen sachlich legitim und pragmatisch sinnvoll: Die Potentialfläche war selbst Gegenstand der Gerechtigkeitsdiskussion, bildet eine harte Restriktion im Algorithmus und erlaubt eine einfache Übertragung der gerechneten Rasterergebnisse auf die Gemeindeebene. Zudem entfällt die Notwendigkeit, das Verteilungsergebnis nachträglich auf technische Realisierbarkeit in der Potentialfläche zu überprüfen – ein Aspekt, der bei komplexeren oder sozioökonomischen Metriken zusätzlichen Modellierungsaufwand erzeugt hätte. Die Entscheidung stellt damit eine inhaltlich tragfähige und robuste Brücke zwischen Rechenmodell und planerischer Realität dar.

### **Ansatz 2: Minimalprinzip**

Das Minimalprinzip beschreibt einen Ansatz, bei dem jede Gemeinde innerhalb einer Rasterzelle nur so viel Kapazität zugewiesen bekommt, wie sie zur Erreichung der Ausbauempfehlung der Rasterzelle unbedingt tragen muss. Grundlage dieses Ansatzes ist die Hypothese, dass alle anderen Gemeinden innerhalb der Rasterzelle ihre gesamte Potentialfläche maximal ausschöpfen.

Eine Gemeinde, die möglichst wenig EE-Anlagen auf ihrem Gebiet errichten möchte, kann sich an folgenden Annahmen orientieren:



- Der theoretisch maximal mögliche Zubau auf allen Potentialflächen der Rasterzelle wird ermittelt.
- Es wird unterstellt, dass alle anderen Gemeinden nach dem Maximalprinzip handeln und versuchen, möglichst viel EE-Ausbau innerhalb ihrer Gemeinde zu realisieren.
- Der Gemeinde wird nur die verbleibende Differenz zugeteilt, die notwendig ist, um das Ausbauziel der Rasterzelle zu erreichen.

In der Praxis bedeutet dies: Je mehr andere Gemeinden den EE-Ausbau vorantreiben, desto weniger muss die betrachtete Gemeinde selbst beitragen. Falls alle Gemeinden nach diesem Prinzip handeln, entsteht eine Situation, in der jede versucht, ihre Verantwortung auf die Nachbarn zu übertragen. Das Ergebnis ist das absolute Minimum, das die Gemeinde an EE-Ausbau übernehmen muss, um die übergeordnete Zielerreichung nicht zu gefährden.

### Ansatz 3: Maximalprinzip

Das Maximalprinzip beschreibt den gegensätzlichen Fall: Eine Gemeinde innerhalb einer Rasterzelle übernimmt so viel Ausbauleistung wie möglich – unabhängig davon, wie sich die anderen beteiligten Gemeinden verhalten. Grundlage dieses Ansatzes ist die Annahme, dass alle anderen Gemeinden nur das absolute Minimum zur Zielerreichung beitragen.

Eine Gemeinde, die ihren Beitrag zum EE-Ausbau maximieren möchte, kann sich an folgenden Annahmen orientieren:

- Es wird ermittelt, wie viel Leistung innerhalb des Gemeindeanteils der Rasterzelle maximal realisierbar ist – basierend auf der verfügbaren Potentialfläche.
- Gleichzeitig wird unterstellt, dass alle anderen Gemeinden den Ausbau möglichst geringhalten (Minimalprinzip).
- Die Gemeinde nutzt ihr vollständiges Potential, solange das Ausbauziel der Rasterzelle nicht überschritten wird.

Wird dieser Ansatz von allen gleichzeitig verfolgt, besteht die Gefahr, dass das Ausbauziel überschritten wird – was aber rein rechnerisch als oberes Ende des legitimen Handlungsspielraums betrachtet werden kann. Das Maximalprinzip markiert somit die obere Grenze der Beteiligung einer Gemeinde an der Umsetzung des Rasterzellenziels und bildet gemeinsam mit dem Minimalprinzip die Bandbreite möglicher Verteilungsergebnisse auf Gemeindeebene ab.

Im nächsten Schritt lässt sich analysieren, was passiert, wenn mehrere Gemeinden innerhalb einer Rasterzelle unterschiedliche Annahmen über das Verhalten der anderen treffen und wie sich daraus über- oder untererfüllte Verteilungsergebnisse ergeben können.

---

Die zuvor beschriebenen Verteilprinzipien Verteilschlüssel, Minimal- und Maximalprinzip beschreiben jeweils eine theoretische Annahme darüber, wie Ausbauleistung innerhalb einer Rasterzelle auf Gemeinden übertragen werden kann. In der Realität sind Gemeinden keine eigenständigen Entscheidungsträger in der Flächenausweisung: Sie sind Teil formalisierter Planungsverfahren, etwa in regionalen Planungsgemeinschaften. Dennoch bringen sie unterschiedliche Positionen in diese Prozesse ein, etwa mehr oder weniger Bereitschaft zur

Übernahme, abweichende Zustimmung zu potentiellen Flächen oder regionale Unterschiede bei den Ausbaukosten. Solche Faktoren können sich auf das planerische Ergebnis auswirken, auch wenn die algorithmische Empfehlung auf Rasterebene erfolgt. Die Ausbauempfehlung einer Rasterzelle ist im Hinblick auf die beteiligten Gemeinden nicht eindeutig zuordenbar: Es besteht ein innerzellulärer Handlungsspielraum. Für jede Gemeinde lässt sich abhängig vom Verhalten der anderen, ein Bereich zwischen minimaler und maximaler Lastübernahme bestimmen. Dieser Spielraum erlaubt es, das Ergebnis an regionale Gegebenheiten anzupassen, ohne das übergeordnete Rasterziel zu verändern. Die technische Übertragung macht diese Spielräume sichtbar. Sie betreffen nicht die Höhe des Ausbauziels selbst, sondern ausschließlich dessen Aufteilung innerhalb der Rasterzelle. Die Analyse dient daher nicht der normativen Bewertung, sondern der Plausibilisierung und Differenzierung: Sie zeigt auf, wo lokale Anpassungen möglich sind und wie sich die algorithmischen Vorschläge realitätsnah in den planerischen Diskurs einbringen lassen.

---

## 6.2 Ergebnisse

Für die deutschlandweite Darstellung der Ergebnisse wurde die installierte Leistung je Rasterzelle einheitlich nach Potentialfläche auf die beteiligten Gemeinden übertragen. Dieser Ansatz ist methodisch robust und konsistent mit der im Algorithmus verwendeten Flächenlogik. Er ermöglicht eine anschlussfähige Einschätzung der räumlichen Verteilung des EE-Zubaus auf Verwaltungsebene.

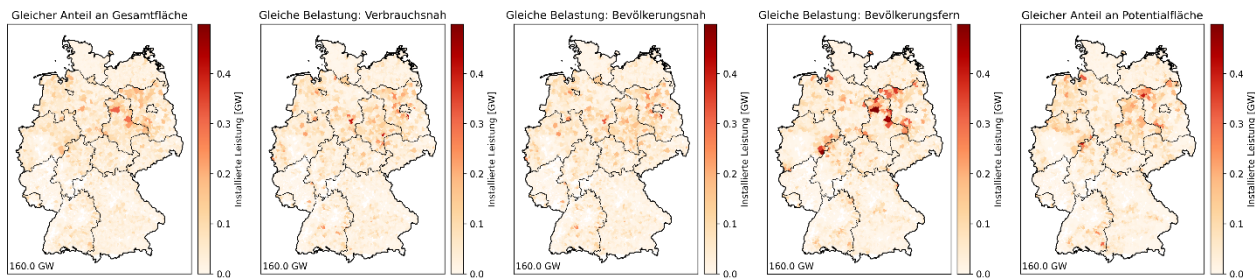
Um den zuvor beschriebenen Handlungsspielraum exemplarisch sichtbar zu machen, werden ergänzend drei Szenarien für die Planungsregion Oderland-Spree dargestellt: Neben der Übertragung des Rasterergebnisses nach Potentialfläche werden ein Minimal- und ein Maximalszenario der gemeindescharfen Zuweisung gezeigt. Sie veranschaulichen, wie stark sich die Belastung einzelner Gemeinden unterscheiden kann selbst innerhalb eines gerechtigkeitsgeleiteten, algorithmisch berechneten Gesamtergebnisses.

### 6.2.1 Deutschlandweite Ausbauempfehlungen Wind onshore auf Gemeindeebene

Die folgende Darstellung zeigt die deutschlandweite Verteilung der installierten Leistung für Windenergie an Land auf Gemeindeebene – jeweils bezogen auf eine der untersuchten Gerechtigkeitsmetriken. Grundlage ist das algorithmisch berechnete Verteilungsergebnis auf Rasterebene, das hier einheitlich nach Potentialfläche auf die beteiligten Gemeinden übertragen wurde.

Die Karten zeigen, wie sich unterschiedliche normative Setzungen auf die räumliche Verteilung auf administrativer Ebene auswirken. Während die Verteilung nach Gesamtfläche eine annähernd gleichmäßige Streuung erzeugt, konzentriert sich der Ausbau bei bevölkerungsnaher oder verbrauchsnaher Verteilung stärker in dichten besiedelten Regionen. Die bevölkerungsferne Variante dagegen zeigt höhere Anteile in ländlich geprägten Räumen mit geringer Siedlungsdichte. Die Potentialflächen-Metrik folgt den windgünstigen Lagen, unabhängig von administrativen oder sozialen Parametern.

## Abbildung 6-1: Deutschlandweite Ausbauempfehlungen für Wind onshore auf Gemeindeebene je Gerechtigkeitsmetrik



Übertragung der Rasterergebnisse auf Gemeindeebene anteilig zu verfügbarer Potentialfläche

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Die Karten liefern einen Orientierungsrahmen für Planungskontexte, in denen Verteilungsfragen mit realen Verwaltungseinheiten verknüpft werden müssen.

### Ausbauempfehlungen Wind onshore auf Gemeindeebene für die Planungsregion

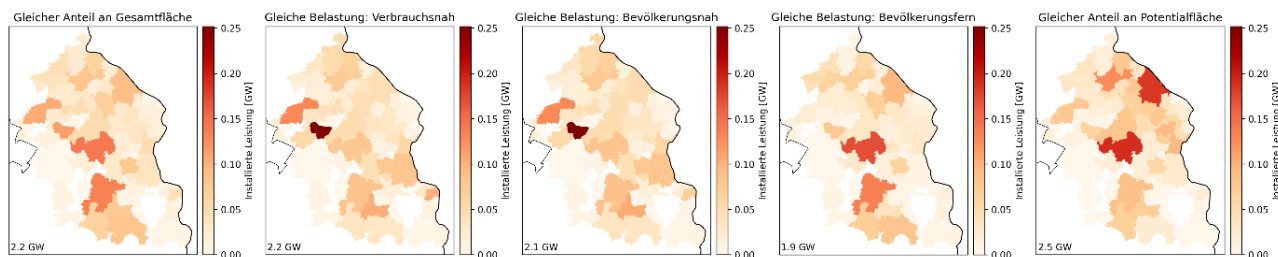
Die Planungsregion Oderland-Spree dient im Projekt als Beispielregion für die Darstellung der Handlungsspielräume auf Gemeindeebene. Sie liegt vollständig in Brandenburg, umfasst jedoch nur einen Teil des Landes. Damit ermöglicht sie eine fokussierte Analyse regionaler Unterschiede, ohne dass methodische Brüche durch Bundeslandgrenzen berücksichtigt werden müssen.

Zur Darstellung der Unterschiede auf Gemeindeebene werden zwei methodische Perspektiven eingenommen:

- **Vergleich gerechter Verteilungen:** Für alle fünf im Projekt untersuchten Gerechtigkeitsmetriken wurde das algorithmisch berechnete Ergebnis auf Rasterebene einheitlich nach Potentialfläche auf die beteiligten Gemeinden übertragen. Diese Übertragung erfüllt das deutschlandweite Ausbauziel (160 GW) sowie den daraus resultierenden Zielanteil der Region Oderland-Spree.
- **Darstellung des innerregionalen Spielraums (Min/Max):** Zusätzlich werden zwei Szenarien dargestellt, die für ein fixes Rasterergebnis den rechnerischen Minimal- bzw. Maximalanteil einzelner Gemeinden zeigen. Anders als in der geregelten Übertragung nach Verteilschlüssel wird hier nicht das regionale Ausbauziel erfüllt, sondern lediglich der theoretische Handlungsspielraum innerhalb der Rasterzellen visualisiert.

Je nach Gerechtigkeitsmetrik variiert die installierte Leistung in der Region deutlich zwischen 1,86 GW (Bevölkerungsfern) und 2,48 GW (Potentialfläche), vgl. Abbildung 6-2.

## Abbildung 6-2: Wind onshore Verteilungen für Oderland-Spree auf Gemeindeebene – nach Potentialfläche



Übertragung der Rasterergebnisse auf Gemeindeebene anteilig zu verfügbarer Potentialfläche je Gemeinde.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Dass die Ausbauempfehlung in der Gerechtigkeitsmetrik „Gleicher Anteil an Potentialfläche“ am höchsten ausfällt, zeigt, dass der Region potentiell viel „grundsätzlich geeignete“, also unbebaute und ungeschützte Fläche zur Verfügung steht. Dass sich die niedrigste Ausbauempfehlung bei einer gleichverteilten Belastung nach Bevölkerungsferne ergibt, zeigt, dass die Region im Vergleich zu den restlichen Regionen des Bundeslands stärker besiedelt ist.

Tabelle 6-1 zeigt die resultierenden Ausbauempfehlungen für die drei Landkreise der Region je Gerechtigkeitsvorstellung.

**Tabelle 6-1: Installierte Leistungen Wind onshore in GW für Oderland-Spree**

Landkreis	Gleicher Anteil an Gesamtfläche	Gleiche Belastung: Verbrauchsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern	Gleicher Anteil an Potentialfläche
Frankfurt (Oder)	0,04	0,08	0,08	0,01	0,03
Märkisch-Oderland	1,41	1,41	1,43	1,17	1,87
Oder-Spree	0,74	0,67	0,63	0,68	0,58
<b>Planungsregion</b>	<b>2,19</b>	<b>2,16</b>	<b>2,15</b>	<b>1,86</b>	<b>2,48</b>

Quelle: Eigene Berechnungen, Öko-Institut.

Die Unterschiede zeigen sich insbesondere im Landkreis Märkisch-Oderland:

- Der Landkreis erhält bei einer Verteilung nach Potentialfläche mit 1,87 GW den höchsten Wert – was seine große Fläche und hohe technische Eignung widerspiegelt.
- Bei einer bevölkerungsfernen Zuweisung sinkt die empfohlene Leistung auf 1,17 GW.
- In den übrigen Gerechtigkeitsmetriken liegt der Ausbau konstant zwischen 1,41 und 1,43 GW, was darauf hinweist, dass der Landkreis unabhängig von der Gerechtigkeitslogik eine zentrale Rolle spielt.

Frankfurt (Oder) hat bedingt durch seine urbane Struktur eine geringe Potentialfläche. In allen Szenarien sind die Beiträge sehr gering:

- Bei einer bevölkerungsfernen Verteilung nahezu null (0,01 GW),

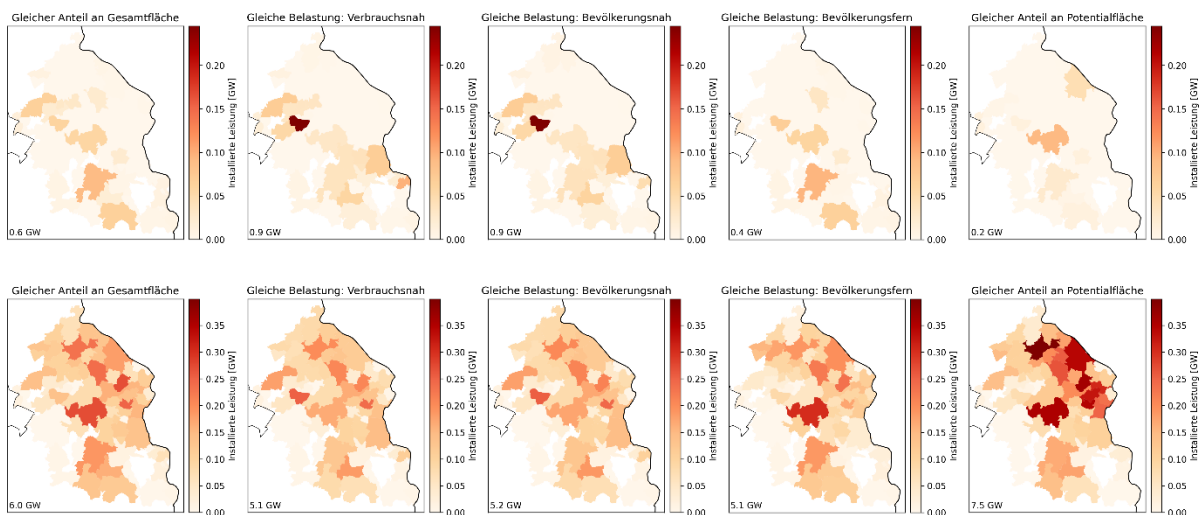
- bei einer verbrauchs- oder bevölkerungsnahen Logik mit je 0,08 GW etwas höher.

Der Landkreis Oder-Spree liegt in einem mittleren Bereich, und die Varianz in Abhängigkeit von der gewählten Gerechtigkeitsmetrik ist deutlich geringer als im Landkreis Märkisch-Oderland:

- Die höchste empfohlene Leistung liegt bei 0,74 GW (Flächenverteilung),
- die niedrigste bei 0,58 GW (Potentialflächen). Diese Unterschiede verdeutlichen, dass sich die relative Last einzelner Landkreise je nach Gerechtigkeitsverständnis verschieben kann.

Zur Illustration des innerregionalen Handlungsspielraums werden mit Abbildung 6-3 zwei Karten gezeigt, die für jede einzelne Gemeinde den rechnerisch minimal möglichen bzw. maximal möglichen EE-Ausbau darstellen. Diese Werte sind jeweils nur dann realisierbar, wenn alle anderen Gemeinden innerhalb derselben Rasterzellen bzw. innerhalb des jeweiligen Rasterteils, der sich über mehrere Gemeinden erstreckt, gegensätzlich handeln. Das heißt: Im Minimalszenario übernehmen die Nachbargemeindenteile den verbleibenden Ausbau vollständig, im Maximalszenario möglichst wenig.

**Abbildung 6-3: Wind onshore Verteilungen für Oderland-Spree auf Gemeindeebene – Min-Prinzip (oben) und Max-Prinzip (unten)**



Übertragung der Rasterergebnisse auf Gemeindeebene nach Min- (oben) bzw. Max- (unten) Prinzip: Im Extrem zu erbringender Ausbau je Gemeinde unter der Annahme, dass die Nachbargemeinden die maximale bzw. minimale Ausbaumenge realisieren, so dass das Rasterziel erreicht wird.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Die Karten stellen daher keine konsistente regionsweite Verteilung dar, sondern zeigen für jede Gemeinde ihren individuellen rechnerischen Spielraum innerhalb der Rasterlogik. Sie ermöglichen es, die potentielle Bandbreite der Belastung abzuschätzen – und im Zusammenspiel mit den benachbarten Gemeinden zu analysieren, unter welchen Konstellationen das algorithmisch definierte Ausbauziel der jeweiligen Rasterzelle noch eingehalten werden kann.

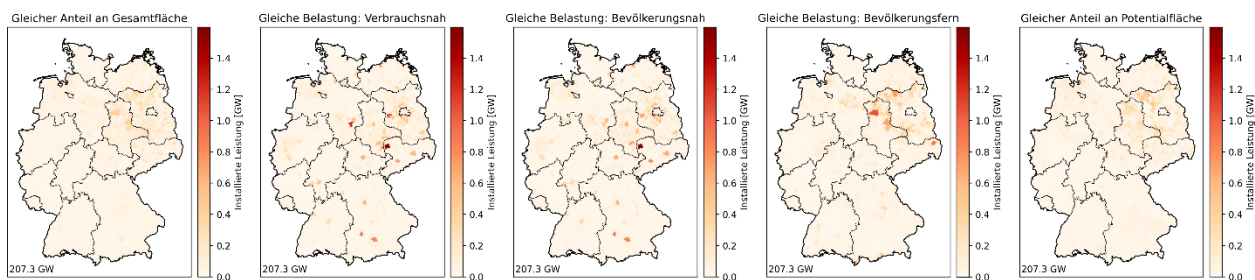
Damit sind die Karten kein Planungsinstrument, sondern ein analytisches Werkzeug: Sie machen sichtbar, zwischen welchen rechnerischen Grenzen sich jede Gemeinde bewegt – unter der Bedingung, dass das Rasterziel in Summe erfüllt bleibt.

## 6.2.2 Deutschlandweite Ausbauempfehlungen PV-FF auf Gemeindeebene

Die folgende Darstellung zeigt die deutschlandweite Verteilung der installierten Leistung für PV-Freifläche inklusive Agri-PV auf Gemeindeebene – jeweils bezogen auf eine der untersuchten Gerechtigkeitsmetriken. Grundlage ist das algorithmisch berechnete Verteilungsergebnis auf Rasterebene, das hier einheitlich nach Potentialfläche auf die beteiligten Gemeinden übertragen wurde.

Die Karten zeigen, wie sich unterschiedliche normative Setzungen auf die räumliche Verteilung auf administrativer Ebene auswirken. Während die Verteilung nach Gesamtfläche sowie nach Potentialfläche eine annähernd gleichmäßige Streuung erzeugt, konzentriert sich der Ausbau bei bevölkerungsnaher oder verbrauchsnaher Verteilung stärker in dichten besiedelten Regionen. Die bevölkerungsferne Variante dagegen zeigt höhere Anteile in ländlich geprägten Räumen mit geringer Siedlungsdichte. Durch die recht große verfügbare Potentialfläche für den Ausbau an PV-FF Anlagen kommt es nur selten zu Ausbaurestriktionen aufgrund fehlender Fläche. Dadurch lässt sich bei allen Gerechtigkeitsmetriken ein gleichmäßigerer Ausbau als bei Windenergie erzielen.

**Abbildung 6-4: PV-FF Verteilungen für Deutschland auf Gemeindeebene**



Übertragung der Rasterergebnisse auf Gemeindeebene anteilig zu verfügbarer Potentialfläche je Gemeinde.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

## Ausbauempfehlungen PV-FF auf Gemeindeebene für die Planungsregion

Die Planungsregion Oderland-Spree dient im Projekt als Beispielregion für die Darstellung der Handlungsspielräume auf Gemeindeebene. Sie liegt vollständig in Brandenburg, umfasst jedoch nur einen Teil des Landes. Damit ermöglicht sie eine fokussierte Analyse regionaler Unterschiede, ohne dass methodische Brüche durch Bundeslandgrenzen berücksichtigt werden müssen.

Zur Darstellung der Unterschiede auf Gemeindeebene werden zwei methodische Perspektiven eingenommen:

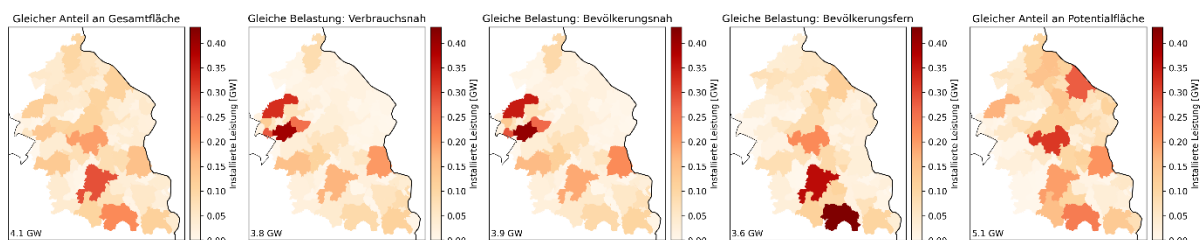
- **Vergleich gerechter Verteilungen:** Für alle fünf im Projekt untersuchten Gerechtigkeitsmetriken wurde das algorithmisch berechnete Ergebnis auf Rasterebene einheitlich nach Potentialfläche auf die beteiligten Gemeinden übertragen. Diese Übertragung erfüllt das deutschlandweite Ausbauziel (207,3 GW) sowie den daraus resultierenden Zielanteil der Region Oderland-Spree.
- **Darstellung des innerregionalen Spielraums (Min/Max):** Zusätzlich werden zwei Szenarien dargestellt, die für ein fixes Rasterergebnis den rechnerischen Minimal- bzw. Maximalanteil einzelner Gemeinden zeigen. Anders als in der geregelten Übertragung nach Verteilschlüssel wird



hier nicht das regionale Ausbauziel erfüllt, sondern lediglich der theoretische Handlungsspielraum innerhalb der Rasterzellen visualisiert.

Je nach Gerechtigkeitsmetrik variiert die installierte Leistung in der Region deutlich zwischen 3,6 GW (Bevölkerungsfern) und 5,1 GW (Potentialfläche), vgl. Abbildung 6-4.

**Abbildung 6-5: PV-FF Verteilungen für Oderland-Spree auf Gemeindeebene**



Übertragung der Rasterergebnisse auf Gemeindeebene anteilig zu verfügbarer Potentialfläche je Gemeinde.

Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut.

Dass die Ausbauempfehlung in der Gerechtigkeitsmetrik „Gleicher Anteil an Potentialfläche“ am höchsten ausfällt, zeigt, dass der Region potentiell viel „grundsätzlich geeignete“, also unbebaute und ungeschützte Fläche zur Verfügung steht. Dass sich die niedrigste Ausbauempfehlung bei einer gleichverteilten Belastung nach Bevölkerungsferne ergibt, zeigt, dass die Region im Vergleich zu den restlichen Regionen des Bundeslands stärker besiedelt ist.

Tabelle 6-2 zeigt die resultierenden Ausbauempfehlungen für die drei Landkreise der Region je Gerechtigkeitsvorstellung.

**Tabelle 6-2: Installierte Leistungen PV-FF in GW für Oderland-Spree**

Landkreis	Gleicher Anteil an Gesamtfläche	Gleiche Belastung: Verbrauchsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern	Gleicher Anteil an Potentialfläche
Frankfurt (Oder)	0,15	0,20	0,22	0,03	0,21
Märkisch-Oderland	1,99	1,74	1,84	1,50	3,01
Oder-Spree	2,00	1,81	1,82	2,10	1,85
<b>Planungsregion</b>	<b>4,14</b>	<b>3,75</b>	<b>3,89</b>	<b>3,64</b>	<b>5,07</b>

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut.

Die Unterschiede zeigen sich insbesondere im Landkreis Märkisch-Oderland:

- Der Landkreis erhält bei einer Verteilung nach Potentialfläche mit 3 GW den höchsten Wert – was seine große Fläche und hohe technische Eignung widerspiegelt.
- Bei einer bevölkerungsfernen Zuweisung sinkt die empfohlene Leistung auf 1,50 GW.
- In den übrigen Gerechtigkeitsmetriken liegt der Ausbau konstant zwischen 1,74 und fast 2 GW, was darauf hinweist, dass der Landkreis unabhängig von der Gerechtigkeitslogik eine zentrale Rolle spielt.



Frankfurt (Oder) hat bedingt durch seine urbane Struktur eine geringe Potentialfläche. In allen Szenarien sind die Beiträge sehr gering:

- Bei einer bevölkerungsfernen Verteilung nahezu null (0,03 GW),
- bei einer verbrauchs- oder bevölkerungsnahen Logik mit 0,20 GW und 0,22 GW etwas höher.

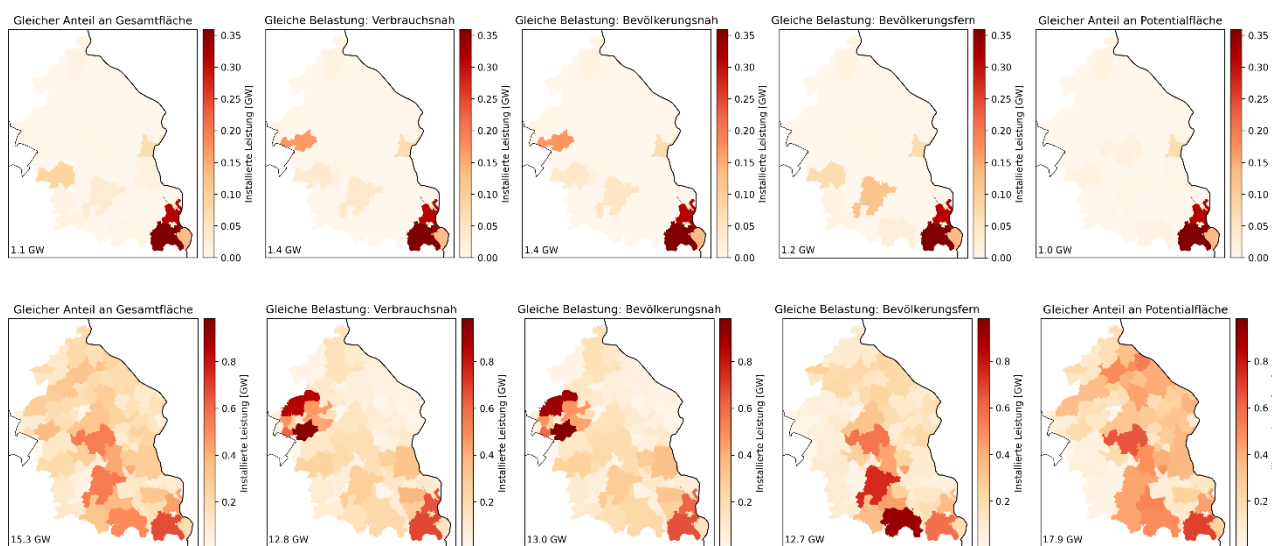
Der Landkreis Oder-Spree liegt in einem mittleren Bereich, und die Varianz in Abhängigkeit von der gewählten Gerechtigkeitsmetrik ist deutlich geringer als im Landkreis Märkisch-Oderland:

- Die höchste empfohlene Leistung liegt bei 2,10 GW (Bevölkerungsfern),
- die niedrigste bei 1,81 GW (Verbrauchsnahe).

Diese Unterschiede verdeutlichen, dass sich die relative Last einzelner Landkreise je nach Gerechtigkeitsverständnis verschieben kann.

Zur Illustration des innerregionalen Handlungsspielraums werden mit Abbildung 6-6 zwei Karten gezeigt, die für jede einzelne Gemeinde den rechnerisch minimal möglichen bzw. maximal möglichen EE-Ausbau darstellen. Diese Werte sind jeweils nur dann realisierbar, wenn alle anderen Gemeinden innerhalb derselben Rasterzellen bzw. innerhalb des jeweiligen Rasterzeils, der sich über mehrere Gemeinden erstreckt, gegensätzlich handeln. Das heißt: Im Minimalszenario übernehmen die Nachbargemeindenteile den verbleibenden Ausbau vollständig, im Maximalszenario möglichst wenig.

**Abbildung 6-6: PV-FF Verteilungen für Oderland-Spree auf Gemeindeebene – Min- Prinzip (oben) und Max-Prinzip (unten)**



Übertragung der Rasterergebnisse auf Gemeindeebene nach Min- (oben) bzw. Max- (unten) Prinzip: Im Extrem zu erbringender Ausbau je Gemeinde unter der Annahme, dass die Nachbargemeinden die maximale bzw. minimale Ausbaumenge realisieren, so dass das Rasterziel erreicht wird.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Die Karten stellen keine konsistente regionsweite Verteilung dar, sondern zeigen für jede Gemeinde ihren individuellen rechnerischen Spielraum innerhalb der Rasterlogik. Sie ermöglichen es, die potentielle Bandbreite der Belastung abzuschätzen – und im Zusammenspiel mit den benachbarten

Gemeinden zu analysieren, unter welchen Konstellationen das algorithmisch definierte Ausbauziel der jeweiligen Rasterzelle noch eingehalten werden kann.

Damit sind die Karten kein Planungsinstrument, sondern ein analytisches Werkzeug: Sie machen sichtbar, zwischen welchen rechnerischen Grenzen sich jede Gemeinde bewegt – unter der Bedingung, dass das Rasterziel in Summe erfüllt bleibt.

### 6.3 Fazit zur Übertragung auf Gemeindeebene

Die Übertragung der algorithmisch berechneten Rasterverteilungen auf die Gemeindeebene ermöglicht eine differenziertere Einschätzung der räumlichen Belastungen aus Sicht administrativer Planungseinheiten. Dabei wurde im Projekt für alle Gerechtigkeitsmetriken einheitlich der Verteilschlüssel „nach Potentialfläche“ verwendet, eine datentechnisch robuste und methodisch konsistente Lösung, um algorithmische Ergebnisse in bestehende Verwaltungsstrukturen zu übersetzen.

Die regionale Betrachtung am Beispiel der Planungsregion Oderland-Spree zeigt, dass sich die Lastenverteilungen zwischen den Gemeinden und Landkreisen spürbar unterscheiden, abhängig von der gewählten Gerechtigkeitsmetrik. Selbst bei einheitlicher Übertragungsmethode ergeben sich strukturell unterschiedliche Belastungsbilder. Diese Unterschiede sind nicht Ausdruck einer konkreten Planung, sondern helfen, gerechtigkeitsgeleitete Vorschläge in den regionalen Kontext einzuordnen und diskussionsfähig zu machen.

Ergänzend wurden Spielräume auf Gemeindeebene mithilfe von Minimal- und Maximalannahmen dargestellt. Diese zeigen rechnerisch, wie stark sich der Beitrag einer einzelnen Gemeinde in Abhängigkeit vom Verhalten der übrigen Gemeinden innerhalb derselben Rasterzelle verändern kann. Die Szenarien erfüllen nicht das regionsweite Ausbauziel, sondern dienen der analytischen Einordnung möglicher Bandbreiten.

Im Ergebnis zeigt sich: Die technische Übertragung erweitert das Potential gerechter Verteilungen, indem sie deren Auswirkungen anschlussfähig an reale Planungsebenen sichtbar macht, ohne ihre algorithmische Grundstruktur aufzugeben.

## 7 Synthese: Zusammenführung der Gerechtigkeitsaspekte

Die bisherigen Kapitel haben gezeigt, wie unterschiedlich gerechtigkeitsgeleitete Verteilungen aussehen können je nachdem, welches Prinzip zugrunde gelegt wird. Gleichzeitig wurde deutlich: Die Unterschiede fallen regional unterschiedlich stark aus, und manche Regionen oder sogar einzelne Gemeinden sind in mehreren Gerechtigkeitslogiken zugleich hoch belastet oder bleiben wiederholt unberührt.

Diese Beobachtung eröffnet eine neue Perspektive: Statt sich auf eine bestimmte Gerechtigkeitsmetrik festzulegen, könnte es hilfreich sein, die verschiedenen Vorschläge gemeinsam zu betrachten mit dem Ziel, Überschneidungen sichtbar zu machen und dort anzusetzen, wo sich Konsenspotential ergibt. Dabei wird bewusst vermieden, eine bestimmte Vorstellung von Gerechtigkeit zu priorisieren. Jede dieser Perspektiven bringt legitime normative Anliegen zur Geltung, ob leistungs-, bedarfs- oder gleichheitsorientiert. Sie stehen im Folgenden gleichberechtigt nebeneinander. Das Ziel ist nicht, eine Entscheidung darüber zu treffen, welche

Vorstellung „richtiger“ ist, sondern zu erkennen, wo sich trotz Unterschiedlichkeit Überschneidungen ergeben.

Soziologische Studien weisen darauf hin, dass gesellschaftliche Debatten zunehmend durch Betonung des Trennenden geprägt sind, während mögliche Gemeinsamkeiten übersehen oder unterschätzt werden (Mau et al. 2023). Im Projektkontext heißt das: Wenn unterschiedliche Gerechtigkeitsvorstellungen zu ähnlichen räumlichen Ausbauempfehlungen führen, kann dies Zustimmung fördern, Konflikte reduzieren und letztlich die Umsetzung erleichtern.

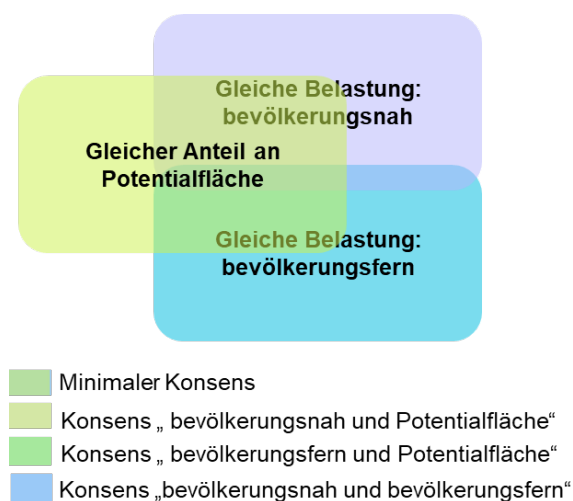
Vor diesem Hintergrund wird im nächsten Kapitel ein Ansatz vorgestellt, der die unterschiedlichen gerechtigkeitsgeleiteten Verteilungen nicht gegeneinanderstellt, sondern überlagert. Ziel ist es, daraus Hinweise zu gewinnen, wo ein breiter Konsens für den EE-Ausbau entstehen kann und wo nicht.

## 7.1 Das Prinzip der Überlagerung

Ein zentrales Problem der Regionalisierung erneuerbarer Energien besteht in der Frage, wie unterschiedliche Gerechtigkeitsvorstellungen methodisch zusammengeführt werden können, ohne eine bestimmte Perspektive zu bevorzugen. Um diesem Problem zu begegnen, wird ein urteilsfreier Ansatz benötigt, der verschiedene Konzepte gleichwertig behandelt. Ein möglicher Zugang besteht in der Überlagerung: Alle betrachteten Gerechtigkeitsmetriken werden nebeneinandergestellt, und es wird geprüft, für welche Flächen sie gleichzeitig Ausbauempfehlungen abgeben.

Die Flächen, die in allen Gerechtigkeitsmetriken übereinstimmend empfohlen werden, bilden einen gemeinsamen Nenner – einen minimalen Konsens. Abbildung 7-1 veranschaulicht das Prinzip der Überlagerung. Die Flächen, an denen sich alle Gerechtigkeitsvorstellungen miteinander überschneiden, sind diejenigen, an denen unabhängig von der zugrundeliegenden Gerechtigkeitsvorstellung ein EE-Ausbau angeraten ist. Diese Schnittmenge kann als Ausgangspunkt für eine breite gesellschaftliche Akzeptanz dienen, weil sie keiner Perspektive widerspricht, ohne eine zu bevorzugen.

**Abbildung 7-1: Schematische Überlagerung verschiedener Gerechtigkeitsvorstellungen**



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Darüber hinaus lassen sich weitere Konsensräume benennen – etwa Flächen, die aus genau zwei Gerechtigkeitsvorstellungen heraus als geeignet gelten. Solche Teilmengen können lokal als unproblematisch bewertet werden, wenn eine der Gerechtigkeitsmetriken vor Ort keine Relevanz besitzt. Wird beispielsweise die Gerechtigkeitslogik „bevölkerungsnah“ in einer Region nicht geteilt, kann auch die Schnittmenge von „bevölkerungsfern“ und „Potentialfläche“ als „konsensfähig“ interpretiert werden.

Gleichzeitig wird sichtbar, welche Flächen potentiell konfliktbehaftet sind: nämlich solche, die ausschließlich von einer Gerechtigkeitsmetrik empfohlen werden, oder in gar keiner auftauchen. Diese Abschichtung schafft Transparenz darüber, welche Kompromisse erforderlich wären, um zusätzliche Flächen in Anspruch zu nehmen.

Die Stärke dieses Ansatzes liegt in seiner Offenheit. Keine Gerechtigkeitsvorstellung wird ausgeblendet oder priorisiert. Alle Vorstellungen finden Eingang in die Bewertung. Vor allem dort, wo sich Vorschläge überlappen, kann ein belastbares Einvernehmen entstehen. Nicht selten zeigt sich erst durch die Überlagerung, dass bestimmte Regionen aus mehreren Gerechtigkeitslogiken gleichzeitig als geeignet erscheinen, obwohl diese Logiken inhaltlich unterschiedlich argumentieren. Auch bei widersprüchlichen Perspektiven, etwa zwischen einer „bevölkerungsnahen“ und „bevölkerungsfernen“ Verteilung, führt die Überlagerung nicht zur Blockade. Zwar sind die übereinstimmenden Flächen in solchen Fällen oft nicht die präferierten, aber ebenfalls nicht die abgelehnten. Es handelt sich um einen Kompromissbereich: keine Lieblingslösung, aber dennoch eine tragbare Lösung.

Das Verfahren hat auch Grenzen. Die Schnittmengen-Flächen sagen nichts darüber aus, wie stark eine Metrik jeweils favorisiert wird, d.h. ob sie viele Menschen repräsentiert oder politisch gestützt wird. Ebenso bleibt unbeachtet, in welcher Reihenfolge die Flächen in den jeweiligen Metriken erschlossen werden. In besonders kontroversen Konstellationen besteht zudem die Gefahr, dass gerade die am wenigsten attraktiven Flächen als Konsens identifiziert werden, also jene Flächen, die nicht direkt abgelehnt werden, aber nicht als vorrangig geeignet betrachtet werden. Ob solche Flächen wirklich akzeptiert oder lediglich geduldet werden, lässt sich allein durch Überlagerung nicht beurteilen.

Der Ansatz ist vor allem aus folgendem Blickwinkel wertvoll: Er schafft einen verhandlungsfähigen Raum, ohne Vorfestlegungen, mit hoher Transparenz und legt offen, wo Anschlussmöglichkeiten zwischen konkurrierenden Gerechtigkeitslogiken bestehen.

## 7.2 Auswertung der Überlagerung

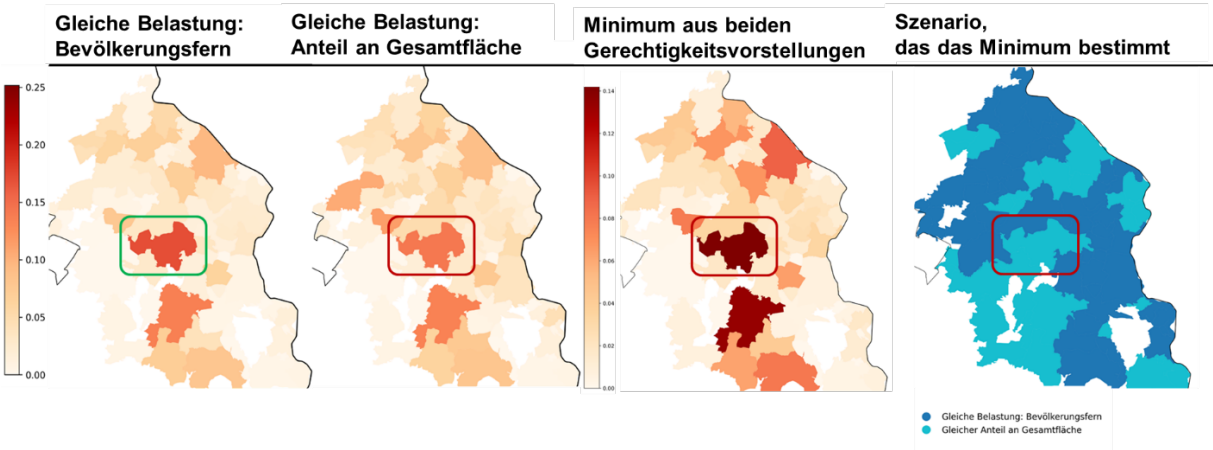
Das Prinzip der Überlagerung erlaubt eine quantitative Auswertung unterschiedlicher Gerechtigkeitsmetriken: Für jede betrachtete Gemeinde (oder Rasterzelle) wird die jeweils niedrigste empfohlene Ausbauleistung zwischen mehreren Gerechtigkeitsvorstellungen bestimmt. So lässt sich ermitteln, welcher Flächenanteil oder welche installierte Leistung zugleich mit mehreren Gerechtigkeitsprinzipien vereinbar ist. Diese Schnittmenge stellt einen rechnerischen Konsensraum dar – also jene Gebiete, die alle betrachteten Vorstellungen gemeinsam für den EE-Ausbau empfehlen.

In Abbildung 7-2 ist dies exemplarisch für die Region Oderland-Spree dargestellt: Die ersten beiden Karten zeigen die Ausbauvorschläge gemäß zweier Gerechtigkeitsmetriken – „Bevölkerungsfern“ (links) und „Gleicher Anteil an Gesamtfläche“ (zweite Karte). In der dritten Karte ist das Minimum

aus beiden Perspektiven je Gemeinde abgebildet. Die vierte Karte zeigt, welche der beiden Gerechtigkeitsmetriken in der jeweiligen Gemeinde das Minimum bestimmt hat – in der hervorgehobenen Gemeinde ist es das Gesamtflächenkriterium, weshalb sie türkis eingefärbt ist.

Die Karte macht deutlich: Der rechnerische Konsens umfasst jene Flächen, bei denen beide Gerechtigkeitsvorstellungen Ausbau empfehlen – und zeigt gleichzeitig, welche der Perspektiven im jeweiligen Fall restriktiver wirkt.

**Abbildung 7-2: Das Minimum bestimmt den minimalen Konsens zwischen verschiedenen Gerechtigkeitsvorstellungen**



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Zur Bestimmung dieser Konsensräume wird auf Gemeinde- oder Rasterebene über alle betrachteten Gerechtigkeitsmetriken hinweg die jeweils niedrigste empfohlene installierte Leistung pro Einheit herangezogen. Mathematisch entspricht dies der Berechnung des Minimums je Zelle, aggregiert zu einem Gesamtwert, vgl. Tabelle 7-1.

**Tabelle 7-1: Überlagerung durch Minimum**

Minimum in GW	Gerechtigkeits-Vorstellung 2	Gerechtigkeits-Vorstellung 3
	Gerechtigkeits-Vorstellung x	Gerechtigkeits-Vorstellung x
<b>Gerechtigkeitsvorstellung 1</b>	$\sum_{i=1}^n \min(G_{i1}, G_{i2}, G_{ix})$	$\sum_{i=1}^n \min(G_{i1}, G_{i3}, G_{ix})$
<b>Gerechtigkeitsvorstellung 2</b>		$\sum_{i=1}^n \min(G_{i2}, G_{i3}, G_{ix})$

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Die dargestellte Matrix zeigt für jede Kombination von Gerechtigkeitsmetriken den jeweiligen Summenwert der gemeinsamen Mindestzuweisungen, also die maximal mögliche Ausbauleistung, die allen gewählten Gerechtigkeitsmetriken gleichzeitig entspricht. Dieses Verfahren ist auf beliebig viele geteilte Gerechtigkeitsvorstellungen anwendbar.

Soll darüber hinaus die Ähnlichkeit zweier Gerechtigkeitsverteilungen quantitativ bestimmt werden, so eignet sich die Bestimmung der euklidischen Distanz zwischen ihnen: Für jede Gemeinde oder Rasterzelle wird der Unterschied der zugewiesenen installierten Leistungen quadriert, aufsummiert und dann die Wurzel gebildet (siehe Tabelle 7-2).

**Tabelle 7-2: Überlagerung durch Euklidische Distanzen**

Euklidische Distanz in GW zwischen...	Gerechtigkeitsvorstellung 2	Gerechtigkeitsvorstellung x
Gerechtigkeitsvorstellung 1	$\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_{i1} - G_{i2})^2}$	$\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_{i1} - G_{ix})^2}$
Gerechtigkeitsvorstellung 2		$\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_{i2} - G_{ix})^2}$

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Je kleiner die resultierende Distanz, desto ähnlicher sind sich zwei Gerechtigkeitsmetriken in ihrem räumlichen Verteilungsvorschlag. Dieses Verfahren eignet sich besonders, um Paarvergleiche durchzuführen: etwa um zu zeigen, welche Gerechtigkeitsverständnisse räumlich ähnliche Lösungen vorschlagen, obwohl sie sich inhaltlich unterscheiden.

Die euklidische Distanz liefert jedoch kein Konsensmaß im engeren Sinn: Sie identifiziert keine gemeinsamen Ausbaufächen, sondern zeigt lediglich, wie weit zwei Szenarien rechnerisch voneinander entfernt sind. Zudem lässt sich das Verfahren nur auf zwei Verteilungen gleichzeitig anwenden. Eine Erweiterung auf mehr als zwei Gerechtigkeitsmetriken ist methodisch nicht ohne weiteres möglich.

Beide Ansätze, die Konsensbildung über Mindestzuweisungen und der Vergleich über Distanzen bieten unterschiedliche, aber komplementäre Perspektiven: Während das eine Verfahren Konsensräume identifiziert, hilft das andere, Nähe und Differenz zwischen Positionen transparent zu machen.

### 7.3 Ergebnisse der Konsensfindung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Konsensfindung für den Ausbau erneuerbarer Energien dargestellt. Ziel ist es, aus verschiedenen Gerechtigkeitsvorstellungen zur räumlichen Verteilung von EE-Anlagen eine gemeinsame, möglichst akzeptierte Grundlage für den Ausbau zu entwickeln. Die Analyse erfolgt getrennt nach onshore-Windenergie und Freiflächen-PV.

Grundlage ist das vorab beschriebene Prinzip der Überlagerung: Es vergleicht die Ausbauempfehlungen verschiedener Gerechtigkeitsverteilungen miteinander und identifiziert den Flächenanteil, der in allen betrachteten Gerechtigkeitsansätzen für die Rasterzelle angeraten wird. Diese Fläche stellt den minimalen Konsens dar – also jenen Bereich, der trotz normativer



Unterschiede gemeinsam getragen werden kann. Mit jeder zusätzlich einbezogenen Gerechtigkeitsvorstellung verkleinert sich dieser Raum.

Die Auswertung beginnt mit der Überlagerung von jeweils zwei Gerechtigkeitsmetriken. Schrittweise wird jeweils eine weitere ergänzt, bis alle untersuchten Verteilungen berücksichtigt sind.

### 7.3.1 Wind: Überlagerung von zwei Gerechtigkeitsvorstellungen

Bei der Überlagerung von zwei Gerechtigkeitsvorstellungen im Bereich onshore-Wind zeigt sich ein stark differenziertes Bild. In allen betrachteten Einzelverteilungen wird eine Gesamtleistung von 160 GW verteilt. Die Analyse der Schnittmengen, also der Flächen, die in beiden Verteilungen für den Ausbau vorgesehen sind, macht deutliche räumliche Unterschiede sichtbar.

Die Kombination „verbrauchsnahe“ und „bevölkerungsnahe“ erzielt mit 154 GW den höchsten Konsenswert. Sie zeigt, dass sich diese beiden Vorstellungen räumlich stark überschneiden und ähnliche Flächen priorisieren. Im Gegensatz dazu fällt der Konsens bei „verbrauchsnahe“ und „bevölkerungsfern“ mit nur 91 GW deutlich geringer aus. Die geringe räumliche Überlappung zeigt, dass sich diese beiden Gerechtigkeitsprinzipien weitgehend ausschließen – verbrauchsnahe Standorte befinden sich typischerweise nicht in dünn besiedelten Regionen.

Auffällig ist auch die Gerechtigkeitsmetrik „nach Potentialfläche“, die insgesamt die geringsten Übereinstimmungen mit anderen Vorstellungen aufweist. In keiner Zweierkombination überschreitet der Konsenswert 119 GW, was darauf hinweist, dass die potentialorientierte Verteilung von anderen Logiken abweicht.

Die Konsensflächen aller Zweierkombinationen sind in Tabelle 7-3 dargestellt.

**Tabelle 7-3: Ausbaukonsens Wind: Schnittmenge aus zwei Flächen**

Zubaukonsens in GW (Ziel: 160 GW)	Gleiche Belastung: Verbrauchsnahe	Gleiche Belastung: Bevölkerungsnahe	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern	Gleicher Anteil an Potentialfläche
Gleicher Anteil an Gesamtfläche	121	123	127	119
Gleiche Belastung: Verbrauchsnahe		154	91	101
Gleiche Belastung: Bevölkerungsnahe			93	102
Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern				112

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

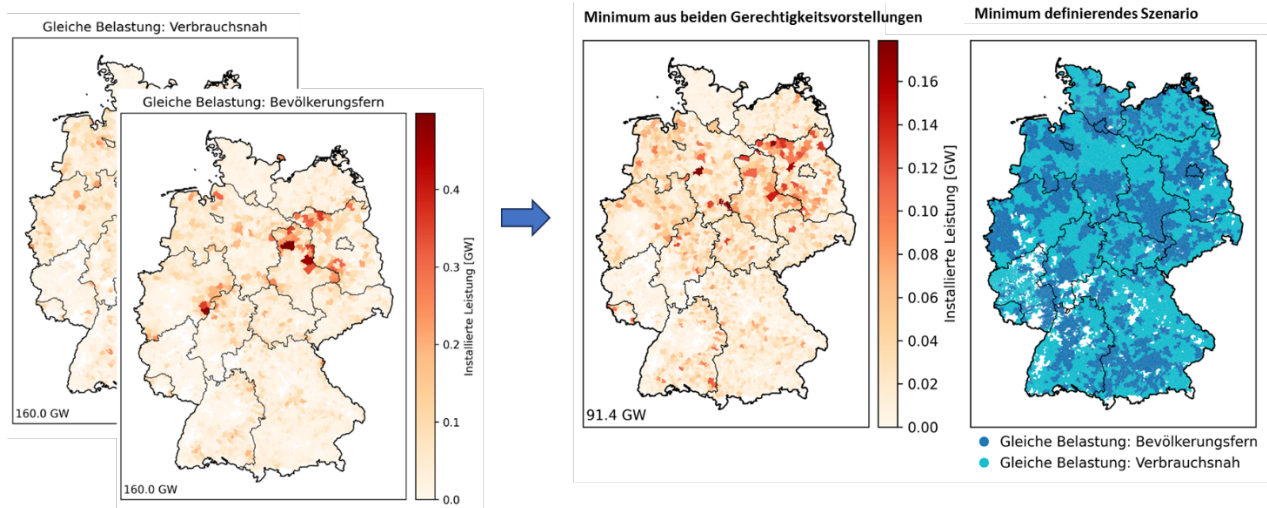
Abbildung 7-3 veranschaulicht den räumlichen Konsens zwischen zwei kontrastierenden Gerechtigkeitsvorstellungen: „Gleiche Belastung: Verbrauchsnahe“ (links) und „Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern“ (zweites Bild). Beide Einzelverteilungen basieren auf einem deutschlandweiten Ausbauziel von 160 GW und zeigen deutlich unterschiedliche räumliche Schwerpunkte.

Im dritten Bild ist die Schnittmenge beider Verteilungen dargestellt – also jene Flächen, auf denen beide Vorstellungen gleichermaßen einen Ausbau befürworten. Der so ermittelte Konsens umfasst 91,4 GW installierte Leistung, was den geringsten Wert aller Zweierkombinationen darstellt.



Die Karte rechts zeigt, welche Gerechtigkeitsvorstellung den jeweiligen Konsenswert begrenzt. Dunkel eingefärbte Gemeinden sind dort, wo „bevölkerungsfern“ niedrigere Ausbauwerte vorgibt als „verbrauchsnahe“. Die Karte macht sichtbar, dass der Konsens an den meisten Standorten durch die bevölkerungsferne Verteilung limitiert wird – obwohl deren Einzelflächen visuell dominanter wirken. Dies liegt daran, dass „verbrauchsnahe“ an vielen Orten knapp unterhalb der anderen Metrik liegt und somit häufiger den minimalen Ausbauwert vorgibt.

**Abbildung 7-3: Ausbaukonsens Wind: Überlagerung Verbrauchsnahe und Bevölkerungsfert für alle Gemeinden**



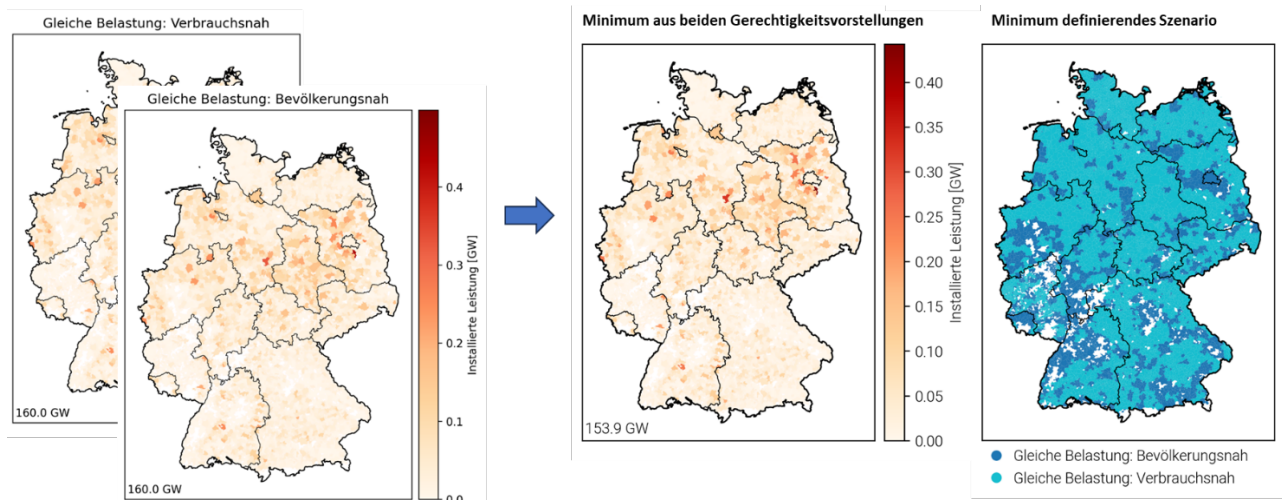
Durch Überlagerung insgesamt 91,4 GW an Ausbaukonsens. Die Grafik rechts unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Zwischen den beiden Gerechtigkeitsverteilungen „verbrauchsnahe“ und „bevölkerungsnahe“ bestehen nur geringe Unterschiede in der räumlichen Zuweisung, vgl. Abbildung 7-4. Der resultierende Ausbaukonsens beträgt 154 GW und liegt damit lediglich 6 GW unter dem Zielwert der Einzelverteilungen. Dies deutet auf eine hohe räumliche Übereinstimmung beider Ansätze hin.

In der Mehrzahl der Gemeinden wird der Konsenszubau durch die „verbrauchsnahe“ Verteilung begrenzt. Das heißt: In diesen Gemeinden liegt der empfohlene Ausbau nach „verbrauchsnahe“ unterhalb der jeweiligen Empfehlung nach „bevölkerungsnahe“ und bestimmt somit das gemeinsame Minimum.

## Abbildung 7-4: Ausbaukonsens Wind: Überlagerung Verbrauchsnahe und Bevölkerungsnah für alle Gemeinden



Durch Überlagerung insgesamt 153,9 GW an Ausbaukonsens. Die Grafik rechts unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Die Berechnung der euklidischen Distanzen zwischen jeweils zwei Gerechtigkeitsverteilungen ergänzt die zuvor betrachtete Überlagerung durch das Minimum. Während die Schnittmengenanalyse sichtbar macht, wie groß der gemeinsame Konsensraum in absoluten Ausbauzahlen ist, zeigt die euklidische Distanz, wie stark sich die räumliche Verteilung der installierten Leistung zwischen zwei Verteilungen unterscheidet.

Tabelle 7-4 dokumentiert diese Distanzen in Gigawatt (GW). Dabei bestätigt sich die besonders hohe Ähnlichkeit zwischen „verbrauchsnahe“ und „bevölkerungsnahe“: Mit nur 12 GW Abstand sind beide Verteilungen nicht nur inhaltlich verwandt, sondern auch räumlich nahezu deckungsgleich.

Die Verteilung nach „gleichem Anteil an Gesamtfläche“ nimmt eine moderate Position ein: Mit Distanzen zwischen 67 und 83 GW liegt sie im Mittelfeld – ein Befund, der zur Schnittmengenanalyse passt, in der diese Metrik durchweg mittelgroße Konsensflächen erzeugte.

Deutlich abweichend ist hingegen die Verteilung „bevölkerungsfern“: Sie zeigt die größten räumlichen Distanzen – etwa 135 GW zu „bevölkerungsnahe“ und 137 GW zu „verbrauchsnahe“ – und bestätigt damit ihre geringe Überlappung im Konsensvergleich (z. B. nur 91 GW im Paar mit „verbrauchsnahe“).

Insgesamt zeigt sich: Hohe Schnittmengen gehen mit geringen euklidischen Distanzen einher, was auf eine starke räumliche Kohärenz hinweist. Umgekehrt deuten große Distanzen und kleine Schnittmengen auf konflikthafte Zielräume. Die kombinierte Auswertung beider Kennwerte bietet somit eine robuste Grundlage zur Bewertung von Konsensfähigkeit und räumlichem Konfliktpotential zwischen unterschiedlichen Gerechtigkeitsansätzen.

**Tabelle 7-4: Euklidische Distanzen Wind: Unterschiede zwischen jeweils zwei Flächen**

Euklidische Distanz in GW zwischen...	Gleiche Belastung: Verbrauchsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern	Gleicher Anteil an Potentialfläche
Gleicher Anteil an Gesamtfläche	77	74	67	83
Gleiche Belastung: Verbrauchsnah		12	137	119
Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah			135	116
Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern				95

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

### 7.3.2 Wind: Überlagerung mehrerer Gerechtigkeitsvorstellungen – Konsensräume im Vergleich

Mit jeder zusätzlich berücksichtigten Gerechtigkeitsmetrik verringert sich die Anzahl der Flächen, auf die sich alle Ansätze einigen können. Im Folgenden werden die Überlagerungen von drei bis fünf Gerechtigkeitsvorstellungen analysiert. Für jede Kombination wird sowohl die Konsensmenge in GW als auch die räumliche Verteilung dargestellt. Die Tabellen zeigen die maximal erreichbaren Ausbaumengen je Kombination, die Karten verdeutlichen, welche Gerechtigkeitsvorstellung jeweils zum limitierenden Faktor wird.

#### Wind: Überlagerung von drei Gerechtigkeitsvorstellungen

Mit der Überlagerung dreier Gerechtigkeitsansätze verringert sich der Konsensraum weiter. Die höchste Übereinstimmung ergibt sich bei der Kombination „Verbrauchsnah“, „Bevölkerungsnah“ und „Gesamtfläche“ mit 120 GW; der niedrigste Konsens entsteht bei „Verbrauchsnah“, „Bevölkerungsfern“ und „Potentialfläche“ mit lediglich 79 GW (siehe Tabelle 7-5).

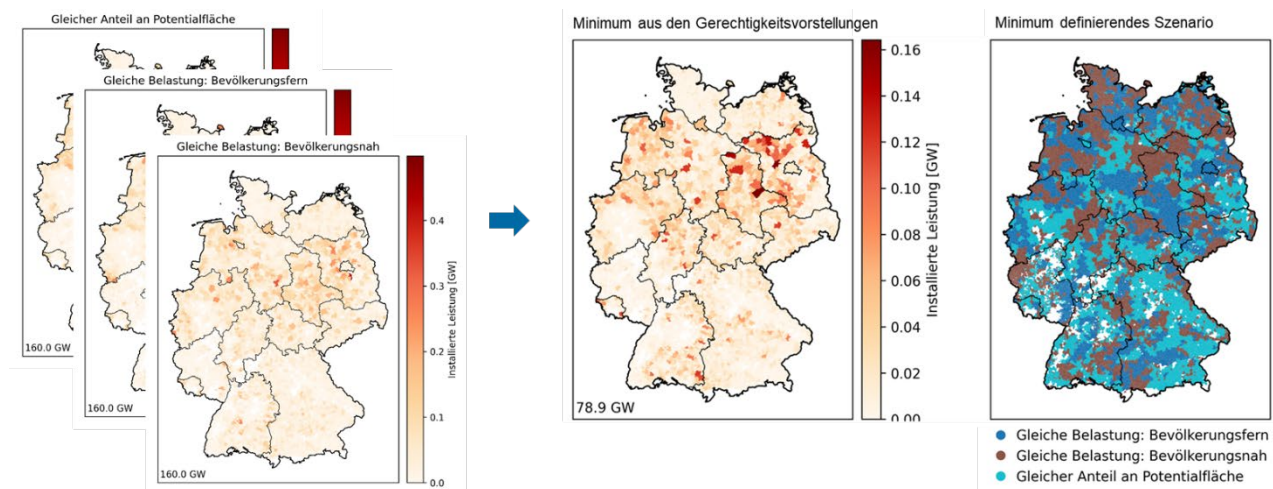
Abbildung 7-5 zeigt die Konsensflächen der konfliktreichsten Kombination. Die rechte Karte macht sichtbar, dass der minimale Ausbauwert häufig durch die Metrik „Bevölkerungsfern“ begrenzt wird – insbesondere in dichter besiedelten Regionen.

**Tabelle 7-5: Ausbaukonsens Wind: Schnittmenge aus drei Flächen**

Zubaukonsens in GW (Ziel: 160 GW)	Gleiche Belastung: Verbrauchsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah	Gleiche Belastung: Verbrauchsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern
UND	Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern	Gleicher Anteil an Potentialfläche	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern	Gleicher Anteil an Potentialfläche	Gleicher Anteil an Potentialfläche
Gleicher Anteil an Gesamtfläche	120	91	94	93	96	101
Gleiche Belastung: Verbrauchsnah				90	99	78
Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah						79

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

**Abbildung 7-5: Ausbaukonsens Wind: Überlagerung Bevölkerungsfen, Bevölkerungsnah und gleicher Anteil an Potentialfläche für alle Gemeinden**

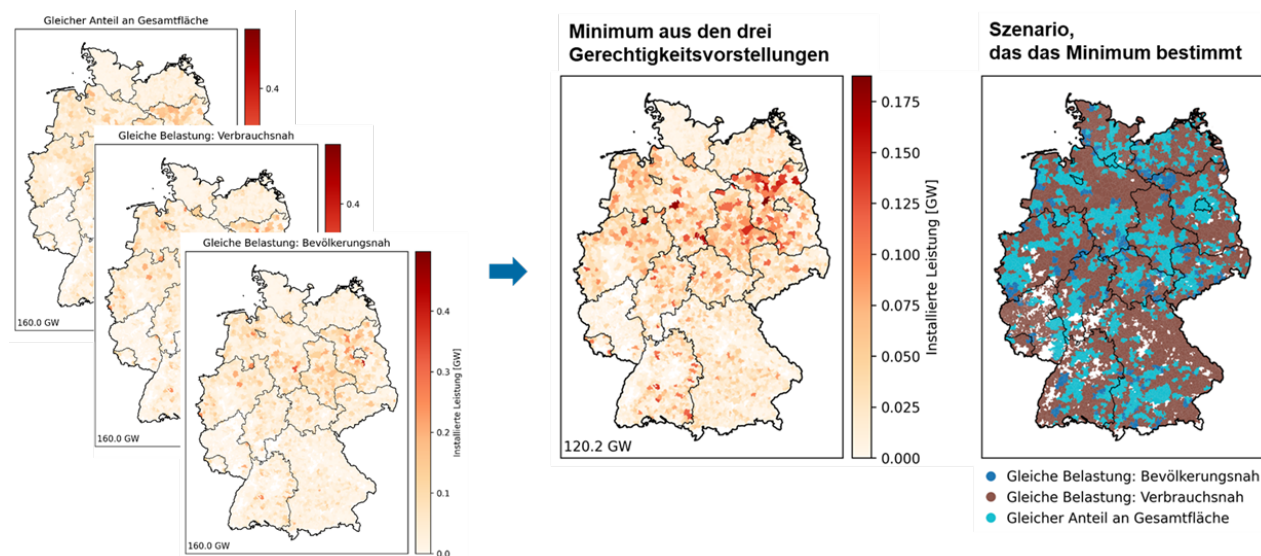


Durch Überlagerung insgesamt 78,9 GW an Ausbaukonsens. Die Grafik rechts unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Der größtmögliche Ausbaukonsens von 120 GW bei einer Überlagerung von drei Flächen wird in Abbildung 7-6 für alle Gemeinden Deutschlands abgebildet. Die linke Grafik zeigt das Ergebnis des Ausbaukonsens der Überlagerung von „Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah“, „Gleiche Belastung: Verbrauchsnah“ und „Gleicher Anteil an Gesamtfläche“ für alle Gemeinden. Die linke Grafik zeigt, dass in mehr als der Hälfte der Gemeinden die Gerechtigkeitsvorstellung „Verbrauchsnah“ zu einer Begrenzung geführt hat.

**Abbildung 7-6: Ausbaukonsens Wind: Überlagerung Bevölkerungsnah, Verbrauchsnah und gleicher Anteil an Gesamtfläche für alle Gemeinden**



Durch Überlagerung insgesamt 120,2 GW an Zubaukonsens. Die Grafik rechts unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.



## Wind: Überlagerung von vier Gerechtigkeitsvorstellungen

Die Berücksichtigung von vier Gerechtigkeitsmetriken reduziert die maximal erreichbare Konsensleistung weiter. Zwei Kombinationen führen zu besonders hohen Konsenswerten: „Verbrauchsnah“, „Bevölkerungsnah“, „Gesamtfläche“ und „Potentialfläche“ mit 93 GW, sowie „Verbrauchsnah“, „Bevölkerungsnah“, „Gesamtfläche“ und „Bevölkerungsfern“ mit 90 GW (siehe Tabelle 7-5). Alle weiteren Kombinationen verbleiben unterhalb von 80 GW.

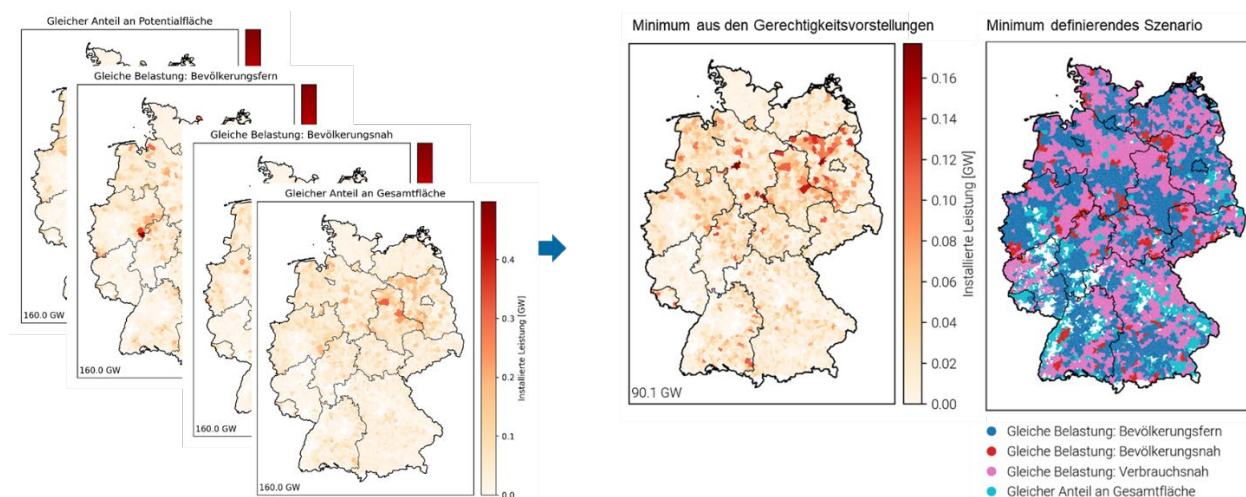
Abbildung 7-7 zeigt die räumliche Verteilung der letztgenannten Kombination. In vielen Gemeinden begrenzt die Metrik „Bevölkerungsfern“ den möglichen Ausbau – ein Hinweis darauf, dass dünn besiedelte Regionen mit den anderen Ansätzen räumlich schwer vereinbar sind.

**Tabelle 7-6: Ausbaukonsens Wind: Schnittmenge aus vier Flächen**

Zubaukonsens in GW (Ziel: 160 GW)	Gleiche Belastung: <b>Verbrauchsnah</b>	Gleiche Belastung: <b>Verbrauchsnah</b>	Gleiche Belastung: <b>Verbrauchsnah</b>	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsnah</b>	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsnah</b>
UND	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsnah</b>	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsnah</b>	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsfern</b>	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsfern</b>	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsfern</b>
UND	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsfern</b>	Gleicher Anteil an <b>Potentialfläche</b>	Gleicher Anteil an <b>Potentialfläche</b>	Gleicher Anteil an <b>Potentialfläche</b>	Gleicher Anteil an <b>Potentialfläche</b>
Gleicher Anteil an <b>Gesamtfläche</b>	90	93	78	79	79
Gleiche Belastung: <b>Verbrauchsnah</b>				77	77

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

**Abbildung 7-7: Ausbaukonsens Wind: Überlagerung Bevölkerungsnah, Bevölkerungsnah, Verbrauchsnah und gleicher Anteil an Gesamtfläche für alle Gemeinden**



Durch Überlagerung insgesamt 90,1 GW an Ausbaukonsens. Die Grafik rechts unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

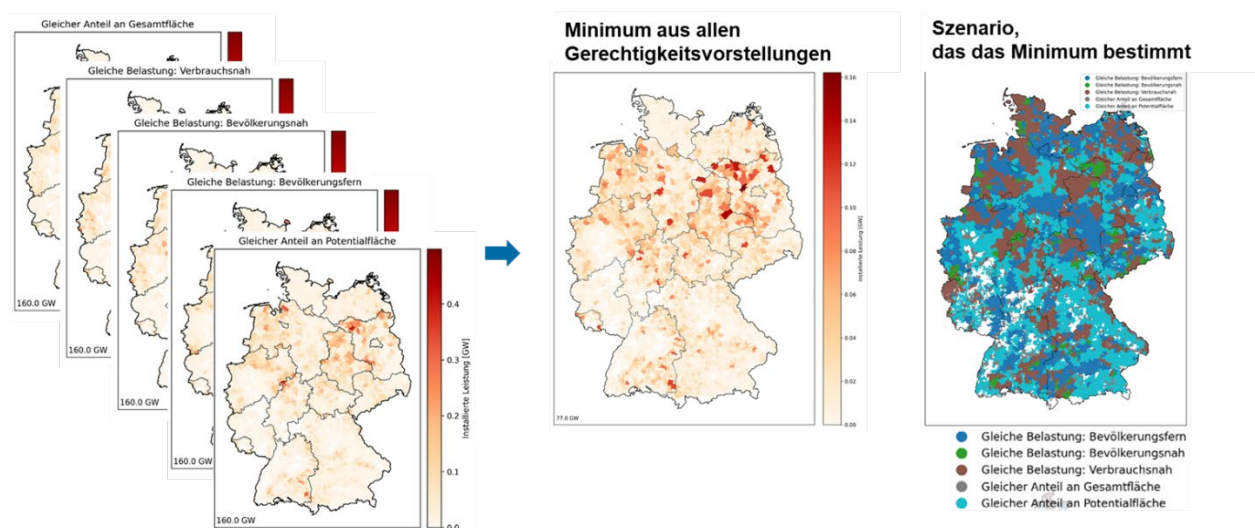
## Wind: Überlagerung von fünf Gerechtigkeitsvorstellungen

Die vollständige Überlagerung aller fünf Gerechtigkeitsvorstellungen ergibt einen bundesweiten Konsens von 77 GW – weniger als die Hälfte des ursprünglichen Zubauziels von 160 GW.

Abbildung 7-8 zeigt die räumliche Verteilung der Konsensflächen. In den meisten Fällen ist „Potentialfläche“ der begrenzende Faktor. Dies verdeutlicht, dass potentialorientierte Verteilungen deutlich von anderen Gerechtigkeitslogiken abweichen.

Die regionale Perspektive in Abbildung 7-8 zeigt das Ergebnis der Fünferüberlagerung für die Planungsregion Oderland-Spree. Dort schwanken die Zubauempfehlungen der Einzelverteilungen zwischen 1,9 und 2,5 GW, während der Konsens lediglich 1,2 GW beträgt – etwa 64 % des Minimalwerts. Am häufigsten begrenzt auch hier die Metrik „Bevölkerungsfern“ die Konsensfläche.

### Abbildung 7-8: Ausbaukonsens Wind: Überlagerung Bevölkerungsfern, Bevölkerungsnah, Verbrauchsnah, gleicher Anteil an Gesamtfläche und Potentialfläche für alle Gemeinden



Durch Überlagerung insgesamt 77 GW an Zubaukonsens. Die Grafik unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

## Wind: Zoom in die Region: Konsenspotential in Oderland-Spree

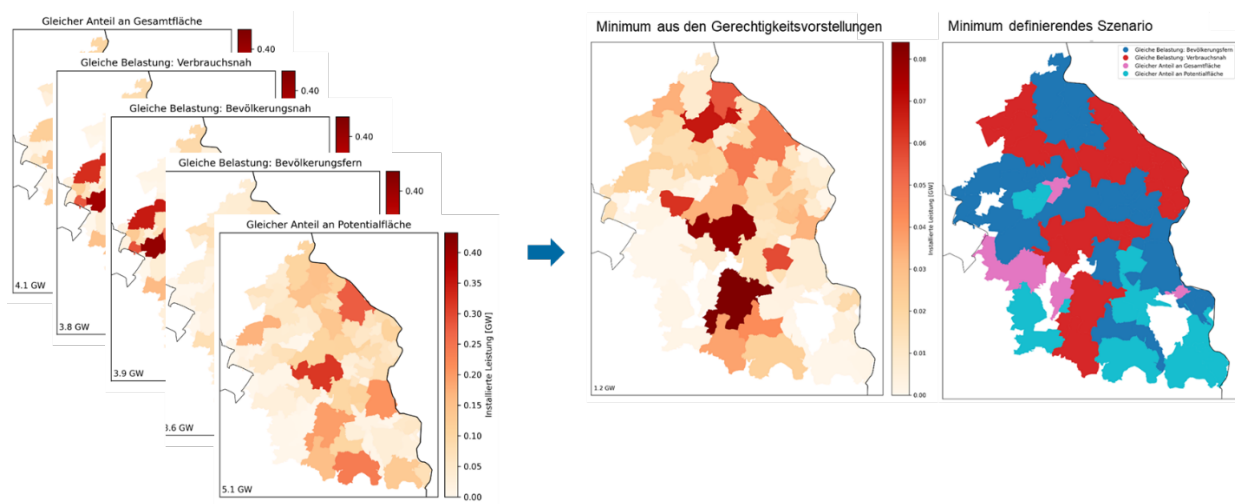
Während auf Bundesebene der Zielzubau (160 GW) als feste Größe gesetzt war, lag für die Planungsregion Oderland-Spree kein eigener verbindlicher Zielwert vor. Daher ergibt sich hier eine besondere Situation: Der maximal mögliche Ausbau im Einvernehmen zwischen allen betrachteten Gerechtigkeitsvorstellungen ist identisch mit dem jeweils geringsten Einzelwert – also der restriktivsten Ausbauempfehlung, die in einem der fünf Szenarien für die Region berechnet wurde.

Im vorliegenden Fall beträgt dieser minimale Einzelwert 1,86 GW (Szenario „Bevölkerungsfern“). Der aus der Überlagerung abgeleitete Konsenswert liegt bei 1,2 GW. Das bedeutet: Rund 64 % des maximal möglichen konsensfähigen EE-Ausbaus werden durch die Schnittmenge aller fünf Gerechtigkeitsmetriken abgedeckt. Anders formuliert: Zwei Drittel der Flächen, die in mindestens einer Gerechtigkeitslogik als gerecht gelten, werden auch von allen anderen geteilt.

Bezugsweise auf die höchste regionale Einzelzuweisung (2,48 GW, „Potentialfläche“) liegt der Anteil des Konsensausbaus bei knapp 48 %. Die Differenz macht deutlich, wie stark sich das Konsenspotential verringert, wenn viele normative Anforderungen gleichzeitig erfüllt werden sollen – aber auch, dass ein erheblicher gemeinsamer Ausbau möglich bleibt.

Alle Überlagerungen wurden auch auf regionaler Ebene durchgeführt – das heißt, für jede Kombination von zwei bis fünf Gerechtigkeitsmetriken wurde der Konsenswert auch für die Region Oderland-Spree berechnet. In Abbildung 7-9 ist exemplarisch die vollständige Überlagerung aller fünf Gerechtigkeitsvorstellungen dargestellt.

**Abbildung 7-9: Ausbaukonsens Wind für Oderland-Spree: Überlagerung Bevölkerungsforn, Bevölkerungsnah, Verbrauchsnah, gleicher Anteil an Gesamtfläche und Potentialfläche für alle Gemeinden**



Durch Überlagerung insgesamt 1,2 GW an Ausbaukonsens. Die Grafik rechts unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

### 7.3.3 PV-FF: Überlagerung von zwei Gerechtigkeitsvorstellungen

Bei der Überlagerung von jeweils zwei Gerechtigkeitsvorstellungen im Bereich PV-FF zeigt sich ein differenziertes Bild hinsichtlich der Übereinstimmung und des erreichbaren Konsensumfangs. In allen betrachteten Einzelverteilungen wird eine Gesamtleistung von 207,3 GW verteilt. Die Analyse der Schnittmengen – also der Flächen, die in beiden Verteilungen gleichermaßen für den Ausbau vorgesehen sind – offenbart erhebliche Unterschiede in der räumlichen Überlappung und damit im möglichen Konsens.

Am konfliktfreiesten erweist sich die Kombination der Gerechtigkeitsvorstellungen „verbrauchsnahe“ und „bevölkerungsnahe“, bei der ein sehr hoher Konsenswert von 192 GW erreicht wird. Dies deutet darauf hin, dass sich beide Verteilungen räumlich stark ähneln und ähnliche Flächen für den EE-Zubau priorisieren. Bei den Überlagerungen der Ergebnisse zu Wind führten ebenfalls die genannten Gerechtigkeitsmetriken zu den höchsten Ausbaumengen. Der konfliktreichste Fall ergibt sich bei der Kombination von „verbrauchsnahe“ und „bevölkerungsforn“, mit einer Konsensleistung von lediglich



90 GW. Die geringe Überlappung zeigt, dass sich diese beiden Gerechtigkeitsprinzipien räumlich weitgehend ausschließen, etwa weil bevölkerungsferne Flächen typischerweise nicht mit verbrauchsnahen Standorten übereinstimmen. Der Einfluss der Verteilung nach Potentialfläche ist im Vergleich zu den Ergebnissen der Überlagerung bei den Wind Szenarien geringer. Hauptgrund hierfür ist die deutlich größere Potentialfläche für FF-PV.

Die Ergebnisse zur Überlagerung der Zweierkombinationen in Summe für ganz Deutschland sind in Tabelle 7-7 dargestellt. Dort lässt sich der Konsens in GW für jede Paarung ablesen.

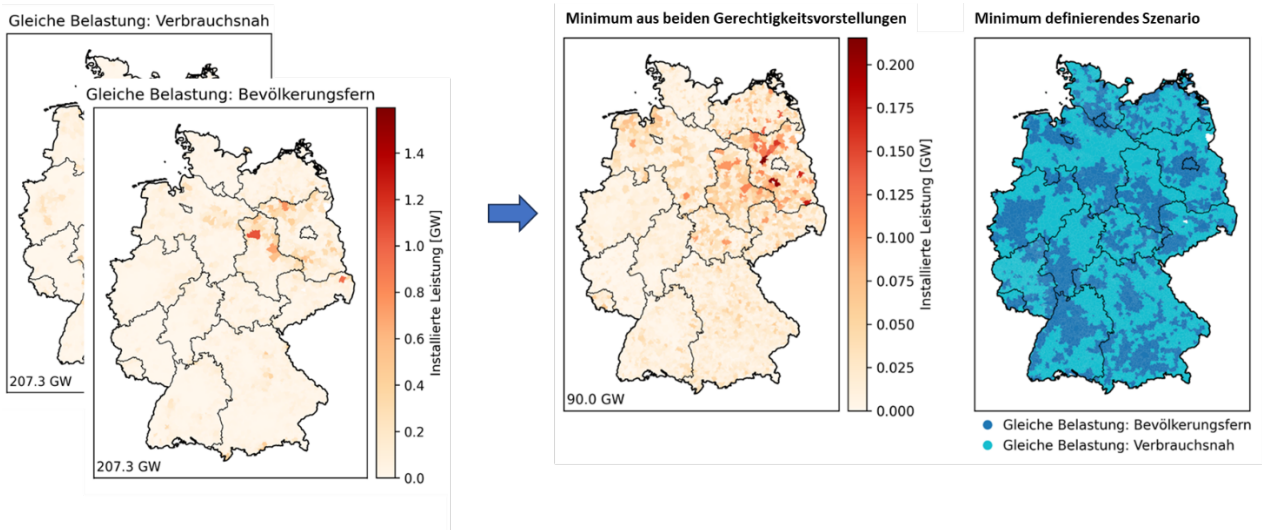
**Tabelle 7-7: Ausbausens PV-FF: Schnittmenge aus zwei Flächen**

Zubausens in GW (Ziel: 207 GW)	Gleiche Belastung: Verbrauchsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern	Gleicher Anteil an Potentialfläche
Gleicher Anteil an Gesamtfläche	130	134	155	166
Gleiche Belastung: Verbrauchsnah		192	90	116
Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah			93	120
Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern				140

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Abbildung 7-10 zeigt die Konsensflächen für alle deutschen Gemeinden der Überlagerung von „verbrauchsnah“ und „bevölkerungsfern“ als Gerechtigkeitsvorstellung. Zum besseren Verständnis sind zuerst die beiden Einzelverteilungen als Heatmap dargestellt. Dort werden die Unterschiede zwischen den beiden Verteilungen bezüglich der Höhe der installierten Leistung an PV-FF je Gemeinde deutlich. Die beiden unteren Grafiken zeigen das Ergebnis der Überlagerung. Die linke Grafik zeigt die installierte Leistung an PV-FF in GW auf den Flächen, die bei den beiden Gerechtigkeitsvorstellungen „verbrauchsnah“ und „bevölkerungsfern“ übereinstimmen. Insgesamt ergibt die Überlagerung dieser beiden Flächen einen Ausbausens von 90 GW. In der Grafik rechts unten werden die Gemeinden dahingehend eingefärbt, welche Gerechtigkeitsvorstellung das Minimum bei der Überlagerung bestimmt. In den Gemeinden, die bspw. dunkelblau eingefärbt sind, wird der Konsens durch die Ausbaumenge der Verteilung nach „Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah“ begrenzt. Die Verteilung „Gleiche Belastung: Verbrauchsnah“ führt demnach in der entsprechenden Gemeinde zu einer höheren installierten Leistung.

**Abbildung 7-10: Ausbaukonsens PV-FF: Überlagerung Verbrauchsnah und Bevölkerungsnah für alle Gemeinden**

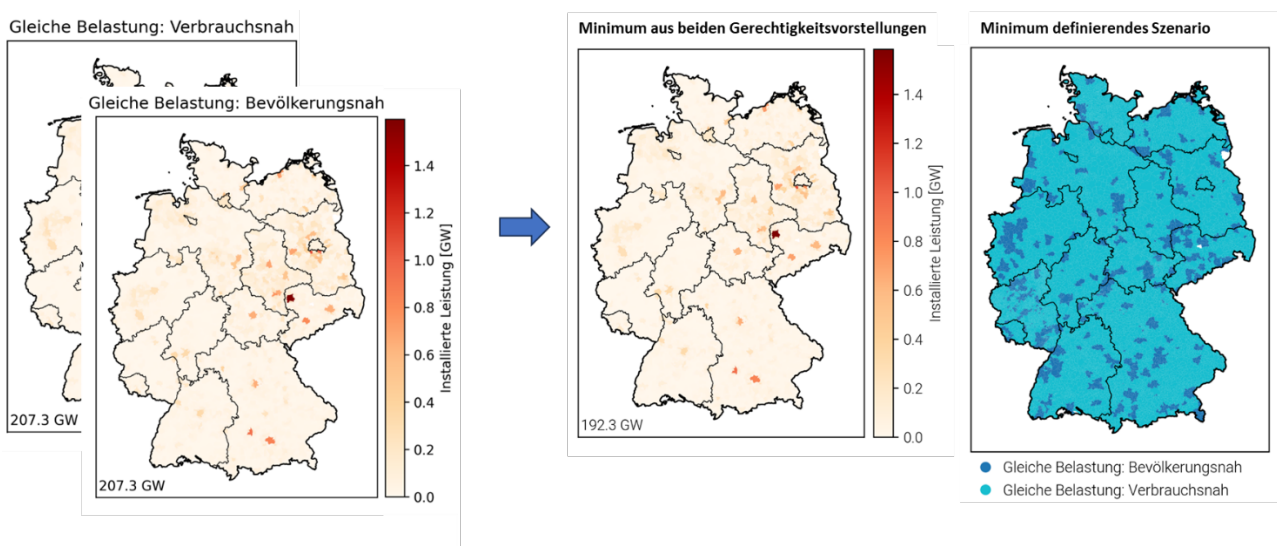


Durch Überlagerung insgesamt 90 GW an Ausbaukonsens. Die Grafik rechts unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Kaum ein Unterschied lässt sich erkennen zwischen den in Abbildung 7-11 dargestellten Ausbaumengen der beiden Verteilungen „verbrauchsnahe“ und „bevölkerungsnahe“. Der Ausbaukonsens liegt bei knapp 192 GW, dementsprechend nur 15 GW unterhalb des Zielwerts bei Verteilung nach nur einer Gerechtigkeitsvorstellung. Die verbrauchsnahe Verteilung bestimmt in den überwiegenden Gemeinden den Konsenszubau.

**Abbildung 7-11: Ausbaukonsens FF-PV: Überlagerung Verbrauchsnah und Bevölkerungsnah für alle Gemeinden**



Durch Überlagerung insgesamt 192,3 GW an Ausbaukonsens. Die Grafik rechts unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Die Analyse der euklidischen Distanzen zwischen jeweils zwei Gerechtigkeitsverteilungen ermöglicht eine ergänzende Perspektive auf die zuvor betrachteten Ergebnisse der Überlagerung durch die minimale Schnittmenge. Während die Überlagerung nach dem kleinsten gemeinsamen Nenner sichtbar macht, wie groß der gemeinsame Konsensraum in absoluten Ausbauzahlen ist, zeigt die euklidische Distanz auf, wie stark sich die räumliche Verteilung der installierten Leistung zwischen zwei Verteilungen unterscheidet. Tabelle 7-8 zeigt die euklidischen Distanzen zwischen jeweils zwei Gerechtigkeitsvorstellungen in GW.

Auch hier bestätigt sich die hohe Übereinstimmung zwischen den Gerechtigkeitsvorstellungen „verbrauchsnahe“ und „bevölkerungsnahe“. Mit einer euklidischen Distanz von nur 30 GW sind sie sich nicht nur im Hinblick auf die gemeinsam nutzbaren Flächen sehr ähnlich, sondern weisen auch eine nahezu deckungsgleiche räumliche Verteilung der installierten Leistung auf. Die Verteilung nach „gleichem Anteil an Gesamtfläche“ zeigt erneut eine moderate Position: Mit euklidischen Distanzen zwischen 83 und 183 GW liegt sie weder besonders nah noch weit entfernt von den übrigen Verteilungen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den zuvor beschriebenen Überlagerungsergebnissen, in denen diese Verteilung durchgängig mittelgroße Konsensflächen mit den anderen Gerechtigkeitsansätzen teilt. Besonders auffällig ist erneut die Verteilung nach „bevölkerungsfern“, die mit euklidischen Distanzen von 229 GW zu „bevölkerungsnahe“ und 235 GW zu „verbrauchsnahe“ die größten räumlichen Unterschiede aufweist. Dies steht im Einklang mit den niedrigen Konsenswerten in der Schnittmengenanalyse, wie etwa der geringste gemeinsame Ausbau von nur 90 GW mit der „verbrauchsnahe“ Verteilung.

**Tabelle 7-8: Euklidische Distanzen PV-FF: Unterschiede zwischen jeweils zwei Flächen**

Euklidische Distanz in GW zwischen...	Gleiche Belastung: Verbrauchsnahe	Gleiche Belastung: Bevölkerungsnahe	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern	Gleicher Anteil an Potentialfläche
Gleicher Anteil an Gesamtfläche	155	146	105	83
Gleiche Belastung: Verbrauchsnahe		30	235	183
Gleiche Belastung: Bevölkerungsnahe			229	174
Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern				134

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

#### 7.3.4 PV-FF: Überlagerung mehrerer Gerechtigkeitsvorstellungen – Konsensräume im Vergleich

Mit jeder zusätzlich berücksichtigten Gerechtigkeitsmetrik verringert sich die Anzahl der Flächen, auf die sich alle Ansätze einigen können. Im Folgenden werden die Überlagerungen von drei bis fünf Gerechtigkeitsvorstellungen analysiert. Für jede Kombination wird sowohl die Konsensmenge in GW als auch die räumliche Verteilung dargestellt. Die Tabellen zeigen die maximal erreichbaren Ausbaumengen je Kombination, die Karten verdeutlichen, welche Gerechtigkeitsvorstellung jeweils zum limitierenden Faktor wird.

## PV-FF: Überlagerung von drei Gerechtigkeitsvorstellungen

Die Überlagerung von drei unterschiedlichen Gerechtigkeitsvorstellungen führt zu einer weiteren Reduktion der möglichen Gesamtausbaumenge an PV-FF. Die höchste Überschneidung bei drei Flächen wird durch die Gerechtigkeitskriterien „Gleicher Anteil an Gesamtfläche“, „Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern“ und „Gleicher Anteil an Potentialfläche“ mit insgesamt 130 GW PV-FF erreicht. Der geringste Konsens entsteht bei der Kombination der Ausbauszenarien „Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern“, „Gleicher Anteil an Potentialfläche“ und „Gleiche Belastung: Verbrauchsnah“ mit 83 GW. Tabelle 7-9 zeigt alle Ergebnisse möglicher Konsensbildung bei drei Gerechtigkeitsvorstellungen.

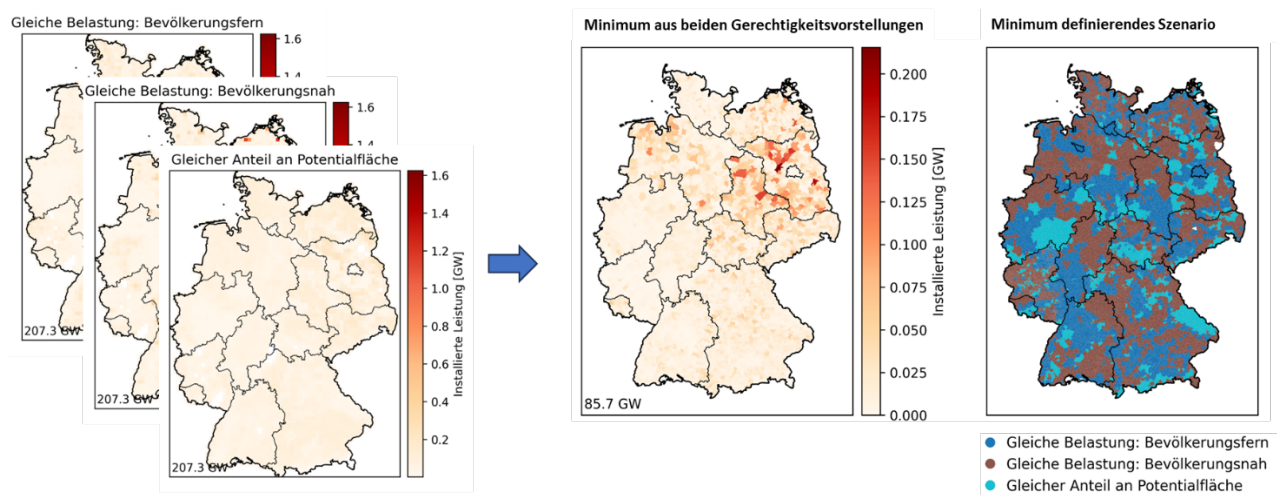
**Tabelle 7-9: Ausbaukonsens PV-FF: Schnittmenge aus drei Flächen**

Zubaukonsens in GW (Ziel: 207 GW)	Gleiche Belastung: Verbrauchsnah	Gleiche Belastung: Verbrauchsnah	Gleiche Belastung: Verbrauchsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern
UND	Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern	Gleicher Anteil an Potentialfläche	Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern	Gleicher Anteil an Potentialfläche	Gleicher Anteil an Potentialfläche
Gleicher Anteil an Gesamtfläche	128	90	111	93	114	130
Gleiche Belastung: Verbrauchsnah				88	114	83
Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah						86

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Abbildung 7-12 zeigt die Konsensflächen für alle deutschen Gemeinden der Überlagerung von „Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern“, „Gleicher Anteil an Potentialfläche“ und „Gleiche Belastung: Bevölkerungsnah“ als Gerechtigkeitsvorstellung. Die linke Grafik zeigt die installierte Leistung an PV-FF in GW auf den Flächen, die bei den drei Gerechtigkeitsvorstellungen übereinstimmen. Insgesamt ergibt die Überlagerung einen Ausbaukonsens von 85,7 GW. In der Grafik rechts werden die Gemeinden dahingehend eingefärbt, welche Gerechtigkeitsvorstellung das Minimum bei der Überlagerung bestimmt. In den Gemeinden, die bspw. dunkelblau eingefärbt sind, wird der Konsens durch die Ausbaumenge der Verteilung nach „Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern“ begrenzt.

**Abbildung 7-12: Ausbaukonsens FF-PV: Überlagerung Bevölkerungsfern, Bevölkerungsnah und gleicher Anteil an Potentialfläche für alle Gemeinden**

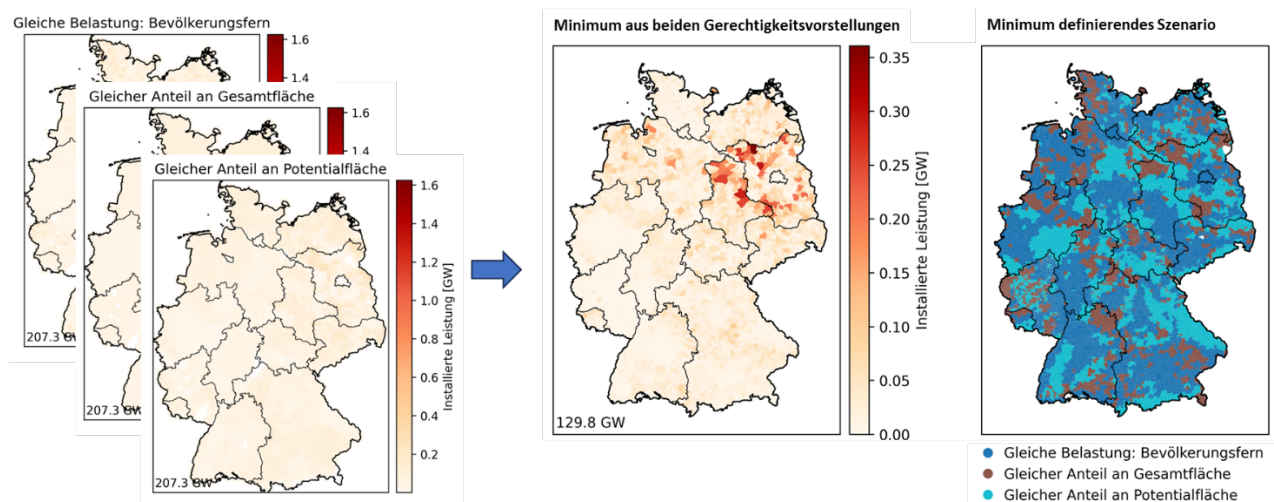


Durch Überlagerung insgesamt 85,7 GW an Ausbaukonsens. Die Grafik rechts unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Der größtmögliche Ausbaukonsens von knapp 130 GW bei einer Überlagerung von drei Flächen wird in Abbildung 7-13 für alle Gemeinden Deutschlands abgebildet. Die linke Grafik zeigt das Ergebnis des Ausbaukonsens der Überlagerung von „Gleiche Belastung: Bevölkerungsfern“, „Gleicher Anteil an Gesamtfläche“ und „Gleicher Anteil an Potentialfläche“ für alle Gemeinden. Die linke Grafik zeigt, dass in mehr als der Hälfte der Gemeinden die Gerechtigkeitsvorstellung „Bevölkerungsfern“ zu einer Begrenzung geführt hat.

**Abbildung 7-13: Ausbaukonsens PF-FF: Überlagerung Bevölkerungsfern, gleicher Anteil an Gesamtfläche und gleicher Anteil an Potentialfläche für alle Gemeinden**



Durch Überlagerung insgesamt 129,8 GW an Ausbaukonsens. Die Grafik rechts unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

## PV-FF: Überlagerung von vier Gerechtigkeitsvorstellungen

Die Überlagerung von vier unterschiedlichen Gerechtigkeitsvorstellungen führt zu einer weiteren Reduktion der möglichen Gesamtausbaumenge an PV-FF. Die höchsten Überschneidungen bei vier Flächen werden durch die Gerechtigkeitskriterien „Gleiche Belastung: Verbrauchsnah“, „Gleiche Belastung: Bevölkerungsnahe“, „Gleicher Anteil an Gesamtfläche“ und „Gleicher Anteil an Potentialfläche“ mit insgesamt 109 GW PV-FF erreicht. Alle anderen Kombinationen führen zu Ausbaumengen unter 88 GW. Tabelle 7-10 zeigt alle Ergebnisse möglicher Konsensbildung bei vier Gerechtigkeitsvorstellungen.



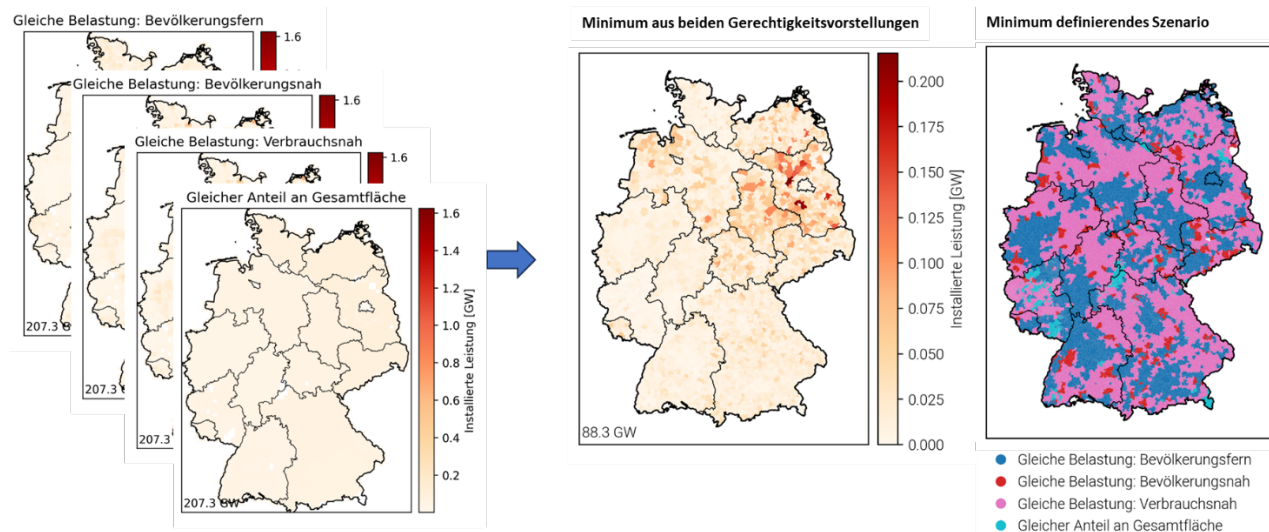
**Tabelle 7-10: Ausbaukonsens PV-FF: Schnittmenge aus vier Flächen**

Zubaukonsens in GW (Ziel: 207 GW)	Gleiche Belastung: <b>Verbrauchsnahe</b>	Gleiche Belastung: <b>Verbrauchsnahe</b>	Gleiche Belastung: <b>Verbrauchsnahe</b>	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsnahe</b>	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsnahe</b>
UND	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsnahe</b>	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsnahe</b>	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsfern</b>	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsfern</b>	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsfern</b>
UND	Gleiche Belastung: <b>Bevölkerungsfern</b>	Gleicher Anteil an <b>Potentialfläche</b>	Gleicher Anteil an <b>Potentialfläche</b>	Gleicher Anteil an <b>Potentialfläche</b>	Gleicher Anteil an <b>Potentialfläche</b>
Gleicher Anteil an <b>Gesamtfläche</b>	88	109	83	86	86
Gleiche Belastung: <b>Verbrauchsnahe</b>				82	82

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Ein konfliktreicher Ausbaukonsens von 88 GW bei einer Überlagerung von vier Flächen wird in Abbildung 7-14 für alle Gemeinden Deutschlands abgebildet. Die linke Grafik zeigt das Ergebnis des Ausbaukonsens der Überlagerung von „Bevölkerungsfern“, „Bevölkerungsnahe“, „Verbrauchsnahe“ und „Gleicher Anteil an Gesamtfläche“ für alle Gemeinden. Die linke Grafik verdeutlicht für jede Gemeinde welche Gerechtigkeitsvorstellung den Ausbaukonsens begrenzt.

**Abbildung 7-14: Ausbaukonsens PV-FF: Überlagerung Bevölkerungsfern, Bevölkerungsnahe, Verbrauchsnahe und gleicher Anteil an Gesamtfläche für alle Gemeinden**



Durch Überlagerung insgesamt 88,3 GW an Ausbaukonsens. Die Grafik rechts unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

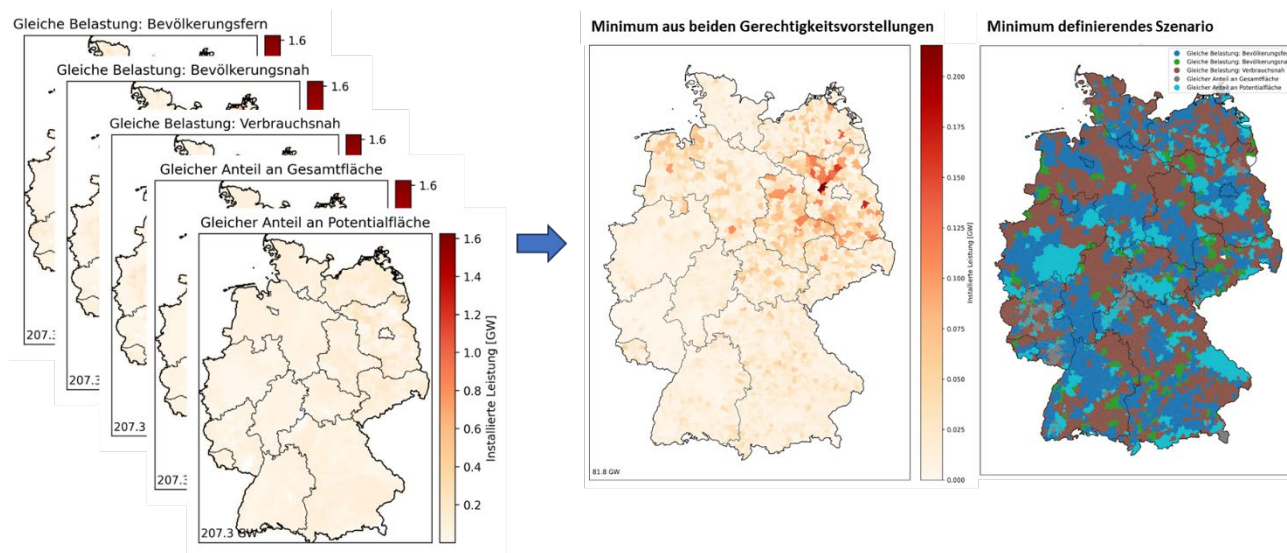
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

## PV-FF: Überlagerung von fünf Gerechtigkeitsvorstellungen

Wird ein Konsens über alle fünf Gerechtigkeitskriterien hinweg gesucht, so kann ein Zubau von insgesamt 82 GW an PV-FF in ganz Deutschland erreicht werden. Abbildung 7-15 zeigt das Ergebnis der Überlagerung über alle fünf Flächen. Werden alle Gerechtigkeitsvorstellungen

überlagert, dann kommt es am häufigsten zu einer Begrenzung der Konsensfläche durch die Metrik „Gleiche Belastung: Verbrauchsnah“.

**Abbildung 7-15: Ausbaukonsens PV-FF: Überlagerung Bevölkerungsforn, Bevölkerungsnah, Verbrauchsnah, gleicher Anteil an Gesamtfläche und Potentialfläche für alle Gemeinden**



Durch Überlagerung insgesamt 82 GW an Ausbaukonsens. Die Grafik rechts zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

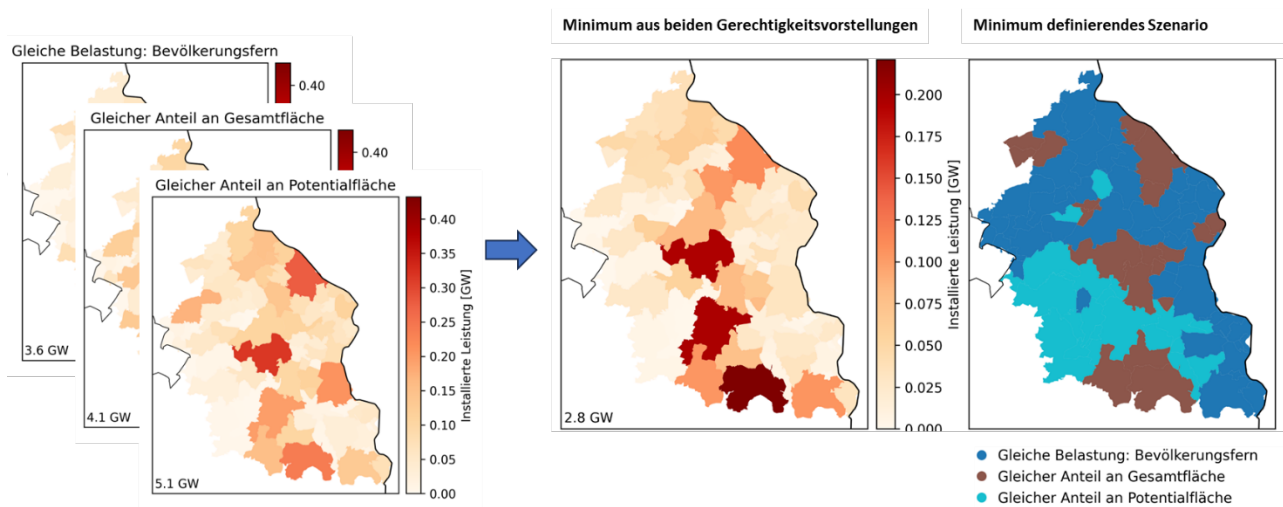
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

## PV-FF: Zoom in die Region: Konsenspotential in Oderland-Spree

Alle Überlagerungen wurden auch auf regionaler Ebene durchgeführt – das heißt, für jede Kombination von zwei bis fünf Gerechtigkeitsmetriken wurde der Konsenswert auch für die Region Oderland-Spree berechnet. In Abbildung 7-16 ist exemplarisch die Überlagerung von drei Gerechtigkeitsvorstellungen dargestellt.



**Abbildung 7-16: Ausbaukonsens PV-FF für Oderland-Spree: Überlagerung Bevölkerungsfern, gleicher Anteil an Gesamtfläche und Potentialfläche für alle Gemeinden**



Durch Überlagerung insgesamt 2,8 GW an Ausbaukonsens. Die Grafik rechts unten zeigt die Verteilung, die das Minimum der Überlagerung der Flächen bestimmt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Während auf Bundesebene der Zielzubau (207,3 GW) als feste Größe gesetzt war, lag für die Planungsregion Oderland-Spree kein eigener verbindlicher Zielwert vor. Daher ergibt sich hier eine besondere Situation: Der maximal mögliche Ausbau im Einvernehmen zwischen allen betrachteten Gerechtigkeitsvorstellungen ist identisch mit dem jeweils geringsten Einzelwert – also der restriktivsten Ausbauempfehlung, die in einem der fünf Szenarien für die Region berechnet wurde.

Im vorliegenden Fall beträgt dieser minimale Einzelwert 3,6 GW (Szenario „Bevölkerungsfern“). Der Ausbaukonsens bei einer Überlagerung der drei Gerechtigkeitsvorstellungen „Bevölkerungsfern“, „Gleicher Anteil an Gesamtfläche“ und „Gleicher Anteil an Potentialfläche“ liegt bei 2,8 GW.

In diesem Kapitel wurde gezeigt, wie sich mit dem Konsensansatz gemeinsame Ausbaufächen identifizieren lassen, die unterschiedlichen Gerechtigkeitsvorstellungen zugleich genügen. Die Ergebnisse machen sichtbar, wo trotz normativer Unterschiede ein gemeinsamer Ausbau möglich ist – und welche Vorstellungen dabei den größten Einfluss auf die Konsensmenge haben.

## 8 Schlussfolgerungen

### Methodische Einordnung und Reichweite

In der vorliegenden Studie wurde ein methodisches Instrument entwickelt und demonstriert, dass Gerechtigkeitsvorstellungen im Kontext der räumlichen Verteilung erneuerbarer Energien quantifizierbar und vergleichbar macht. Mit dem Fokus auf die algorithmisch gestützte Überlagerung verschiedener Gerechtigkeitsmetriken wurde ein neuer Zugang geschaffen, um normativ aufgeladene Fragen systematisch zu analysieren. Dabei ging es nicht darum, eine verbindliche Definition von Gerechtigkeit zu formulieren, sondern darum, deren unterschiedliche Verständnisse rechnerisch zu operationalisieren und methodisch zugänglich zu machen.

Die Auswahl der betrachteten Metriken war bewusst exemplarisch. Sie bildet zentrale Prinzipien wie Gleichheit oder Leistungsgerechtigkeit ab, schließt aber andere, etwa besitzstandsorientierte oder partizipative Ansätze, zunächst aus. Auch wurden kompensatorische Logiken, historische Belastungen oder finanzielle Beteiligungsmodelle nicht vertieft bearbeitet. Das Projekt definiert sich damit klar als methodischer Beitrag und nicht als abschließende Gerechtigkeitsbewertung.

## **Anwendungsperspektiven und Relevanz**

Die entwickelten Verfahren sind nicht nur theoretisch fundiert, sondern auch praktisch anschlussfähig. In der Planungspraxis können sie dabei helfen, konfliktarme Flächen zu identifizieren, transparente Entscheidungsgrundlagen zu schaffen und Priorisierungen nachvollziehbar zu begründen. In der Energiesystemmodellierung eröffnen sie die Möglichkeit, sozio-politische Kriterien in quantitative Modellläufe zu integrieren. Für die Politik schließlich bieten sie ein Werkzeug, um Gerechtigkeitskonflikte nicht durch Ausschluss, sondern durch die Visualisierung gemeinsamer Handlungsspielräume zu bearbeiten.

Besonders der Konsensansatz – die Überlagerung mehrerer Gerechtigkeitsverteilungen – erweist sich als praxisrelevant. Er schafft eine Grundlage für eine evidenzbasierte Diskussion über den EE-Ausbau, die unterschiedlichen gesellschaftlichen Vorstellungen Rechnung trägt, ohne sich normativ festzulegen.

## **Erweiterungspotentiale und methodische Weiterentwicklungen**

Ein naheliegender nächster Schritt liegt in der Integration gesellschaftlicher Präferenzgewichte. Das Verfahren der Überlagerung behandelt alle berücksichtigten Gerechtigkeitsmetriken als gleichwertig, unabhängig davon, wie stark sie gesellschaftlich verankert oder politisch repräsentiert sind. Ein naheliegender nächster Schritt bestünde darin, diese Gerechtigkeitsvorstellungen nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ zu gewichten, etwa auf Grundlage empirischer Daten zur öffentlichen Meinung oder über politische Repräsentanz. Ein solches Vorgehen würde es ermöglichen, nicht nur Konsensräume, sondern auch mehrheitsfähige Flächenkonstellationen zu identifizieren. Gleichzeitig stellt sich damit die Frage, ob mehr Zustimmung auch mit höherer Legitimität gleichgesetzt werden kann oder ob Minderheitenpositionen strukturell übergangen würden.

Eine noch offene Analyseperspektive betrifft die Flächenaufnahme-Reihenfolge je Gerechtigkeitsmetrik. Diese wäre grundlegend für eine differenzierte Priorisierung innerhalb eines Szenarios und eröffnet Anschlussmöglichkeiten für präferenzbasierte Planungsverfahren.

Ein weiterer methodischer Aspekt betrifft den Umgang mit kombinierten Belastungen. Zwar erscheint es naheliegend, verschiedene Infrastrukturen wie Windkraft, PV, Netze oder Speicher in einem gemeinsamen Belastungsindikator zu erfassen. Praktisch ist dies jedoch aufgrund fehlender Vergleichbarkeit und hoher Kontextabhängigkeit kaum sinnvoll. Die Entscheidung, Belastungen technologiegetrennt auszuweisen, erwies sich daher als methodisch robust. Auch kompensatorische Ansätze, etwa durch Berücksichtigung historischer Vorbelastungen, konnten aufgrund von Inkonsistenzen nicht sinnvoll integriert werden.

Ebenso spannend wäre eine Analyse jener Flächen, die von keiner Gerechtigkeitsmetrik als bevorzugt ausgewiesen werden. Solche Zonen könnten als systematisch konfliktbelastet oder entkoppelt von bestehenden Gerechtigkeitslogiken gelten und verdienen gesonderte Betrachtung.

Schließlich wurde im Projekt die methodisch und politisch relevante Frage diskutiert, ob sich Gerechtigkeitsverteilungen besser an installierter Leistung oder erzeugtem Strom orientieren sollten. Politisch ist die Leistungsgröße anschlussfähiger, weil sie die aktuell relevante Steuerungsgröße darstellt. Gerechtigkeit ließe sich aber auch über gleichwertige Beiträge zur Stromversorgung definieren. Eine ergänzende Analyse hat gezeigt, dass Gerechtigkeit auf Basis gleicher Erzeugung mit erheblichen Mehrkosten und Flächenbedarfen verbunden ist. Diese Ergebnisse werden in einem separat veröffentlichten Fachartikel vertieft behandelt (Flachsbarth et al. 2025).

## Forschungsbedarf und Ausblick

Die Studie öffnet zahlreiche Anschlussfragen. Zunächst ist die Weiterentwicklung des Gerechtigkeitsverständnisses erforderlich: Dazu gehört die Einbeziehung zusätzlicher Metriken, etwa besitzstandsbasierter, historischer oder beteiligungsorientierter Prinzipien. Auch die räumliche Differenzierung von Gerechtigkeitsvorstellungen nach Regionen oder Raumtypen stellt eine zentrale Herausforderung dar. Darüber hinaus bedarf es Methoden, die Aushandlungsprozesse und Präferenzkonflikte modellseitig abbilden – etwa durch simulationsgestützte Verhandlungen oder partizipative Szenarienarbeit.

Eine zusätzliche Forschungsperspektive ergibt sich aus der von Heyen (2022) vorgeschlagenen analytischen Trennung zwischen Aspekten sozialer Ungleichheiten im Umweltkontext (z. B. Verursachung, Betroffenheit, Beteiligung, Anerkennung) und deren Verteilungsachsen (z. B. Raum, Zeit, Sozialstruktur). Diese Matrix erlaubt es, bestehende oder geplante Infrastrukturen nicht nur unter dem Gesichtspunkt der Lastenverteilung, sondern auch in Bezug auf Verantwortung oder Sichtbarkeit sozialer Gruppen zu analysieren. Im Kontext der regionalen EE-Verteilung könnten damit etwa Fragen nach historischer Beteiligung am Ausbau, ungleichen Planungslasten oder mangelnder Repräsentanz bestimmter Regionen systematischer untersucht werden. Die Operationalisierung solcher Dimensionen steht zwar noch am Anfang, könnte aber durch die Kombination quantitativer und qualitativer Datenformate (z. B. Partizipationsprofile, Konfliktindizes, Diskursanalysen) weiterentwickelt werden. Perspektivisch wäre auch die Entwicklung mehrdimensionaler Bewertungsmodelle denkbar, die konkurrierende Gerechtigkeitsziele explizit gegeneinander abwägen und so zur Legitimität zukünftiger Planungsprozesse beitragen könnten.

Da auch die ökonomisch optimierte Verteilung häufig als gerecht legitimiert wird, wäre eine Integration dieser Perspektive in die Überlagerung ein nächster logischer Schritt. Erste Auswertungen könnten hier mit geringem Aufwand erfolgen.

Die vorliegende Studie zeigt, dass Gerechtigkeit im EE-Ausbau nicht nur ein normativer Anspruch ist, sondern auch technisch modellierbar, räumlich sichtbar und politisch verhandelbar gemacht werden kann. Die hier vorgestellte Methodik ist ein Beitrag zur Versachlichung und Transparenz einer oft emotional geführten Debatte – und eine Einladung, Gerechtigkeit nicht nur zu fordern, sondern proaktiv in Planungsprozesse und Energiesystemanalysen zu integrieren.

## 9 Literaturverzeichnis

- 50Hertz Transmission (50Hertz); Amprion; TenneT TSO (TenneT); TransnetBW (Hg.) (2024): Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045, Version 2025. Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. Online verfügbar unter <https://www.netzentwicklungsplan.de/nep-aktuell/netzentwicklungsplan-20372045-2025>, zuletzt geprüft am 03.12.2024.
- Aakko-Saksa, Päivi T.; Lehtoranta, Kati; Kuittinen, Niina; Järvinen, Anssi; Jalkanen, Jukka-Pekka; Johnson, Kent et al. (2023): Reduction in greenhouse gas and other emissions from ship engines: Current trends and future options. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 94. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101055>.
- Agora Energiewende (Hg.) (2023): Solarstrom vom Dach: das Energiewendepotenzial auf Deutschlands Gebäuden. Methodisches Vorgehen. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-16\\_DE\\_Dach-PV-Potenzial/2023-16\\_DE\\_Dach-PV-Potenzial\\_Dokumentation.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-16_DE_Dach-PV-Potenzial/2023-16_DE_Dach-PV-Potenzial_Dokumentation.pdf), zuletzt geprüft am 18.07.2025.
- Amme, Jonathan (2022): Der Photovoltaik- und Windflächenrechner - Geodaten Potenzialflächen.
- Bons, Marian; Jakob, Martin; Sach, Tobias; Klessmann, Corinna (2022a): Analyse der Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030. Ermittlung eines Verteilungsschlüssels für das 2-%-Flächenziel auf Basis einer Untersuchung der Flächenpotenziale der Bundesländer. Unter Mitarbeit von Dr.Carsten Pape, Christoph Zink, David Geiger, Benedikt Häckner, Dr.Nils Wegner, Steffen Benz et al. Guidehouse; Stiftung Umweltenergierecht; Fraunhofer IEE; Bosch & Partner. Berlin.
- Bons, Marian; Sach, Thobias; Pape, Carsten; Wegner, Nils (2022b): Auswirkungen einer Rotor-in-Planung auf die Verfügbarkeit von Windflächen. Ad-hoc-Analyse zur Verfügbarkeit von Windflächen, die ein Überstreichen der Gebietsgrenzen durch den Rotor nicht zulassen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (Climate Change 41/2022). Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc\\_41-2022\\_auswirkungen\\_einer\\_rotor-in-planung\\_auf\\_die\\_verfuegbarkeit\\_von\\_windflaechen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_41-2022_auswirkungen_einer_rotor-in-planung_auf_die_verfuegbarkeit_von_windflaechen.pdf), zuletzt geprüft am 13.02.2025.
- Bundesministerium der Justiz (BMJ) (20.07.2022): Gesetz zur Festlegung von Flächenbedarfen für Windenergieanlagen an Land. WindBG. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/windbg/>, zuletzt geprüft am 13.02.2025.
- Bundesnetzagentur (2020): Marktstammdatenregister. Stromerzeugungseinheiten. Stand 10. Januar 2020. Online verfügbar unter <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Einheit/Einheiten/OeffentlicheEinheitenuebersicht>.
- Christ, Marion; Soethe, Martin; Degel, Melanie; Wingenbach, Clemens (2016): Wind energy scenarios for the simulation of the German power system until 2050: The effect of social and ecological factors. IV. In: Volker Wohlgemuth, Frank Fuchs-Kittowski und Jochen Wittmann (Hg.): *Advances and New Trends in Environmental Informatics. Stability, Continuity, Innovation*. Cham, Schweiz: Springer, S. 167–180.
- Christ, Marion; Soethe, Martin; Wingenbach, Clemens; Hilpert, Simon (2017): BuergEN - Perspektiven der Bürgerbeteiligung an der Energiewende unter Berücksichtigung von Verteilungsfragen. Modul 3: Berücksichtigung gesellschaftlicher Faktoren bei der Entwicklung

der Stromnetze. Projektabschlussbericht. Europa-Universität Flensburg, Zentrum für nachhaltige Energiesysteme (ZNES). Flensburg.

EPSC 3035, 24.02.2024: EPSC:3035. Online verfügbar unter <https://epsc.io/3035>, zuletzt geprüft am 12.02.2025.

Flachsbarth, Franziska; Wingenbach, Marion; Koch, Matthias (2021): Addressing the Effect of Social Acceptance on the Distribution of Wind Energy Plants and the Transmission Grid in Germany. In: *Energies* 14, Artikel 4828, S. 1–18. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.3390/en14164824>.

Flachsbarth, Franziska; Wingenbach, Marion; Winger, Christian (2025): Gerechtigkeit im EE-Ausbau: Systemische Wirkung gerechter EE-Verteilungen. Kosten, Emissionen und Strommarktimplikationen. Teilvorhaben Power, Big pictures and participation des Gesamtvorhabens EmPowerPlan: Regionale Planung der Energiewende – Partizipation und Gerechtigkeit vor Ort und das große Ganze im Blick. Hg. v. Öko-Institut. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Gerechtigkeit-im-EE-Ausbau-FI%C3%A4che.pdf>.

Fraunhofer ISI; Consentec; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu); TU Energy and Resources (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. T-45 Szenarien, Szenarienexplorer. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/szenario-explorer/>, zuletzt geprüft am 18.02.2023.

Gerke, Michael (2008): Formen der Gerechtigkeit nach Aristoteles. Online verfügbar unter <http://www.polit-bits.de/Lernzone/Formen%20der%20Gerechtigkeit%20nach%20Aristoteles.pdf>, zuletzt geprüft am 18.07.2025.

Habermas, Jürgen (1987): Theorie des kommunikativen Handelns 1. Handlungsrationalität und gesellschaftliche Rationalisierung. Frankfurt a.M.

Haldar, Stuti; Grillitsch, Markus; Bazaz, Amir (2025): A human-centric approach to energy justice: embedding agency and capabilities in transitions discourse. Online verfügbar unter <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13549839.2025.2506593?src=exp-la>.

Hersbach, Hans; Bell, Bill; Berrisford, Paul; Hirahara, Shoji; Horányi, András; Muñoz-Sabater, Joaquín et al. (2020): The ERA5 global reanalysis. In: *Quart J Royal Meteor Soc* 146 (730), S. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

Heyen, Dierk Arne (2022): Social justice in the context of climate policy: systematizing the variety of inequality dimensions, social impacts, and justice principles. Online verfügbar unter <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2022.2142499>.

Hofmann, Fabian; Hampp, Johannes; Neumann, Fabian; Brown, Tom; Hörsch, Jonas (2021): atlite: A Lightweight Python Package for Calculating Renewable Power Potentials and Time Series. In: *JOSS* 6 (62), S. 3294. DOI: 10.21105/joss.03294.

Jäger, Mareike; Vaccaro, Christina; Boos, Jürg; Junghardt, Johann; Strebel, Sven; Anderegg, Dionis et al. (2022): Machbarkeitsstudie Agri-Photovoltaik in der Schweizer Landwirtschaft, zuletzt geprüft am 27.03.2024.

Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang; Wiese, Andreas (2013): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin: Springer Verlag. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-03249-3>, zuletzt geprüft am 18.07.2025.



- Kaspar, Frank; Niermann, Deborah; Borsche, Michael; Fiedler, Stephanie; Keller, Jan; Potthast, Roland et al. (2020): Regional atmospheric reanalysis activities at Deutscher Wetterdienst: review of evaluation results and application examples with a focus on renewable energy. In: *Advances in Science and Research* (17), S. 115–128. DOI: 10.5194/asr-17-115-2020.
- Knight, Carl; Le Merle, Kevin (2023): Climate Justice Principles. Policy Brief. Hg. v. Foundation for European progressive studies (FEPS). Online verfügbar unter [https://feps-europe.eu/wp-content/uploads/2023/02/PB\\_Climate-Justice.pdf](https://feps-europe.eu/wp-content/uploads/2023/02/PB_Climate-Justice.pdf), zuletzt geprüft am 18.07.2025.
- Kohler, Manuel; Wingenbach, Marion (2024): Potenzialflächen für Agri-Photovoltaik. Eine GIS basierte Potenzialanalyse für Deutschland. Hg. v. Öko-Institut. Freiburg. Online verfügbar unter <https://zenodo.org/records/10878761>.
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW); Ministerium für Umwelt Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hg.) (2022): Energieatlas Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://www.energieatlas-bw.de/energieatlas>.
- Lehmann, Paul; Gawel, Erik; Meier, Jan-Niklas; Reda, Milan Jakob; Reutter, Felix; Sommer, Stephan (2024): Spatial distributive justice has many faces: The case of siting renewable energy infrastructures. In: *Eneyg Research and Social Science* 118, zuletzt geprüft am 15.10.2024.
- Levenda, A. M.; Behrsin, I.; Disano, F. (2021): Renewable energy for whom? A global systematic review of the environmental justice implications of renewable energy technologies. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629620304126>.
- Lödl, Martin; Kerber, Georg; Witzmann, Rolf; Hoffmann, Clemens; Metzger, Michael (2010): Abschätzung des Photovoltaik-Potentials auf Dachflächen in Deutschland. Graz, Österreich. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/doc/969497/969497.pdf>, zuletzt geprüft am 18.07.2025.
- Mau, Steffen; Lux, Thomas; Westheuser, Linus (2023): Triggerpunkte. Konsens und Konflikt in der Gegenwartsgesellschaft. Berlin: Suhrkamp Verlag. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=7390695>.
- Neumann, Fabian (2021): Costs of regional equity and autarky in a renewable European power system. In: *Energy Strategy Reviews* (35). Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100652>, zuletzt geprüft am 25.06.2025.
- Platon (1855): Politeia. "Dialogorum de Republica". Der Staat. Stuttgart. Online verfügbar unter <http://www.opera-platonis.de/Politeia.pdf>, zuletzt geprüft am 18.07.2025.
- Quatschning, Volker (2012): Wege zur Energiewende: Eine vollständige dezentrale regenerative Stromversorgung ist möglich. Hg. v. Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW). Berlin. Online verfügbar unter [https://www.volker-quaschning.de/publis/vortraege/2012-11-15\\_Energieforum-Buch\\_Quaschning.pdf](https://www.volker-quaschning.de/publis/vortraege/2012-11-15_Energieforum-Buch_Quaschning.pdf), zuletzt geprüft am 18.07.2025.
- Rawls, John (1971): A theory of justice. Cambridge, Massachusetts, London, England: The Belknap Press of Harvard University Press.
- Seidl, R.; Wirth, T. von; Krütli, P. (2019): Social acceptance of distributed energy systems in Swiss, German, and Austrian energy transitions. In: *Energy Research & Social Science* 54, S. 117–128. DOI: 10.1016/j.erss.2019.04.006.
- Sen, Amartya (2002): Ökonomie für den Menschen – Wege zur Gerechtigkeit und Solidarität in der Marktwirtschaft. München: Deutscher Taschenbuch Verlag.

- Stiftung Klimaneutralität (Hg.) (2021): Photovoltaik (PV) - Potentiale. Literaturrecherche. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/02/2021-02-18-PV-Potentiale-Literaturrecherche.pdf>, zuletzt geprüft am 18.07.2025.
- Umweltbundesamt (UBA) (2013): Potenzial der Windenergie an Land. Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial\\_der\\_windenergie.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf), zuletzt geprüft am 29.07.2018.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2022): CORINE Land Cover – CLC. Europaweit harmonisierte Landbedeckungs- und Landnutzungsdaten. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten/corine-land-cover-clc>, zuletzt aktualisiert am 18.07.2025, zuletzt geprüft am 18.07.2025.
- Wingenbach, Marion; Flachsbarth, Franziska; Winger, Christian; Aschauer, Johannes (2025): EmPowerPlan EE-Regionalisierungsszenarien [Data set]. Öko-Institut. Online verfügbar unter <https://zenodo.org/records/15188220?preview=1>, zuletzt geprüft am 23.07.2025.