

Modellierung klimaneutraler Energielandschaften – eine kritische Reflexion regionaler Strategien zum Ausbau erneuerbarer Energien unter Berücksichtigung des Zwei-Grad-Ziels

Stephan Bosch, Dominik Kienmoser

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Bosch, Stephan, and Dominik Kienmoser. 2022. "Modellierung klimaneutraler Energielandschaften – eine kritische Reflexion regionaler Strategien zum Ausbau erneuerbarer Energien unter Berücksichtigung des Zwei-Grad-Ziels." *Geographica Helvetica* 77 (4): 523–46. <https://doi.org/10.5194/gh-77-523-2022>.

Nutzungsbedingungen / Terms of use:

CC BY 4.0





Modellierung klimaneutraler Energiedienstleistungen – eine kritische Reflexion regionaler Strategien zum Ausbau erneuerbarer Energien unter Berücksichtigung des Zwei-Grad-Ziels

Stephan Bosch and Dominik Kienmoser

Lehrstuhl für Humangeographie und Transformationsforschung, Universität Augsburg, Augsburg, Deutschland

Correspondence: Stephan Bosch (stephan.bosch@geo.uni-augsburg.de)

Received: 27 December 2021 – Revised: 20 October 2022 – Accepted: 3 November 2022 – Published: 5 December 2022

Kurzfassung. With the Paris Agreement, it was decided to limit global warming to below two degrees. Hence, national governments are currently confronted with the challenge of implementing concrete climate protection measures. This poses a major challenge especially for Germany, as the phase-out of low-emission nuclear energy additionally increases the pressure to rapidly promote the expansion of renewable energies. Unfortunately, there is a great variety of potential regional energy strategies, which differ considerably in terms of landscape implications. Therefore, we analysed the spatial restructuring of energy supply and the associated social conflicts. To do so, we modelled potential regional energy landscapes that can be derived from the two-degree target and visualised them based on Geographical Information Systems by using five scenarios involving changes to the planning guidelines. The analyses reveal that the development of a carbon-neutral energy system is possible. Yet the potential spatial patterns of renewable energies differ considerably. Furthermore, it becomes obvious that spatial planning must take greater account of the perspectives of those social groups facing the installation of renewable energies in the very vicinity of their own living environment.

1 Einleitung

Auf den UN-Klimakonferenzen von Kopenhagen (2009) und Cancun (2010) ist es dem Weltklimarat gelungen, eine Einigung auf das 2 °C-Ziel sowie den zu Grunde liegenden Budgetansatz zu erwirken (Simonis, 2017:92 ff.). Mit dem Klimaabkommen von Paris wurden die Zielsetzungen nochmals verschärft, indem sich 197 Staaten darauf einigten, die Erderwärmung „deutlich unter“ zwei Grad Celsius halten zu wollen (UNFCCC, 2015:3). Die nationalen Regierungen sehen sich nun mit der Herausforderung konfrontiert, diesen Zielsetzungen konkrete Maßnahmen folgen zu lassen. Problematisch ist, dass Politik und Planung nur wenige Erkenntnisse und Informationen zur räumlichen Organisation eines klimaneutralen Energiesystems vorliegen. Aus diesen Gründen greifen wir die inspirierende, jedoch nicht konkretisierte Vision von Van der Horst (2017) auf, Energiedienstleistungen zu modellieren, die die Erderwärmung auf unter 2 °C begren-

zen können. Ziel der Studie ist es zu analysieren, wie sich unsere Umwelt landschaftlich und sozial verändern würde, wenn die Forderungen der internationalen Klimapolitik vollumfassend in die Transformation des Energiesystems eingebunden werden. Im Besonderen gilt es, mögliche räumliche Entwicklungspfade beim Ausbau erneuerbarer Energien auf regionaler Ebene aufzuzeigen und zudem kritisch zu reflektieren.

Wenngleich die diskursive Dimension der Energiewende (Frage des „Warum“) – vgl. Selk et al. (2019:34) – auf einem breiten wissenschaftlichen Fundament steht und insoweit geklärt ist, so ist dies bei der prozeduralen Dimension (Frage des „Wie“) und der lokalen Dimension (Frage des „Wo“) keineswegs der Fall. Vielmehr bilden sie die Ursache starker gesellschaftlicher Konflikte um eine gerechte Energieversorgung (Pellegrini-Masini et al., 2020), die die klimapolitischen Zielsetzungen zu konterkarieren drohen. Im dicht besiedelten Deutschland treten diese Konflikte im Be-

sonderen hervor, da der große Energiebedarf des wirtschaftsstarken Landes mit einem flächenintensiven Ausbau erneuerbarer Energien einhergeht, die sich gegenüber dem fossilen Kraftwerkspark durch eine sehr geringe Energiedichte auszeichnen (Bosch et al., 2016; Bosch und Rathmann, 2018). Speziell die landschaftlichen Veränderungen in den einst technologiefreien ländlichen Räumen, deren Ästhetik und Landnutzungssysteme innerhalb weniger Jahre durch die technologischen Intrusionen der Wind-, Solar- und Bioenergie überformt wurden, haben die Akzeptanz von Energieinfrastrukturen stark reduziert (Bosch und Schmidt, 2020). Mit Blick auf die Dringlichkeit, die dem Klimaschutz inhärent ist, erhöht dieser Akzeptanzverlust den Handlungsdruck auf Politik und Planung erheblich. Erschwerend hinzu kommt die Strategie Deutschlands, aus der Kernenergienutzung auszusteigen und so auf eine klimaneutrale und grundlastfähige Technologie zu verzichten. Der Krieg um die Ukraine und die daraus entstandene Gefährdung der Energieversorgungssicherheit hat die deutsche Regierung zwar dazu veranlasst, die letzten drei Atommeiler dreieinhalb Monate länger als ursprünglich geplant laufen zu lassen (Stratmann und Kersting, 2022). An der grundlegenden Ausstiegsstrategie wird jedoch festgehalten.

Das Ausland verfolgt bereits seit Längerem mit großer Aufmerksamkeit, wie Deutschland diesen ambitionierten Transformationsprozess meistern wird. Nicht zuletzt untermauerte „Merkel's Energiewende“ (Paul, 2018:4), die als Reaktion auf die Ereignisse von Fukushima im Jahr 2011 zu verstehen ist, das Narrativ vom „Pionerland“ einer nachhaltigen Energiepolitik (Hake et al., 2015:532). Dies habe die Bundesrepublik in eine globale „Vorreiterrolle“ (Konrad-Adenauer-Stiftung, 2013:29) gerückt und, indem sie andere Staaten zur Umsetzung ähnlicher Maßnahmen inspirierte (Valdes et al., 2019:12), zum „Wegbereiter einer klimaneutralen Energiezukunft“ (Schreurs, 2020:113) stilisiert.

Die wesentlichen rechtlichen und institutionellen Grundlagen wurden aber nicht unter Merkel geschaffen, sondern auf Initiative der Vorgängerregierung, einer Koalition aus Sozialdemokraten und Grünen (Stenzel und Frenzel, 2008:2650). Im Zentrum stand das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das die gesamte Bandbreite erneuerbarer Energien durch ein stabiles Vergütungssystem fördern sollte. Anlagenbetreiber:innen wurde ein fester Einspeisetarif und eine Abnahmегарантie über einen Zeitraum von 20 Jahren garantiert (Kunzl, 2015:16). Dieses Gesetz wurde jedoch mit Wirkung vom Januar 2017 grundlegend novelliert. So wurde der weitere Ausbau an technologiespezifische Ausschreibungen geknüpft, die eine am jährlichen Bedarf orientierte Leistungskapazität nicht mehr überschreiten durften (BMJV, 2017b:30 ff.). Ziel der Novellierung ist es, die Energiewende planbarer und kosteneffizienter zu gestalten.

Parallel zur Anpassung der Förderinstrumente hat die Bundesregierung mit dem überarbeiteten Bundes-Klimaschutzgesetz die Vorgaben zur Einsparung von CO₂-Emissionen verschärft. So sollen im Jahr 2030 die

Emissionen um 65 % und 2040 um 88 % gegenüber 1990 verringert werden. Klimaneutralität wird bis zum Jahr 2045 angestrebt, 2050 soll die Treibhausgas-Bilanz Deutschlands sogar negativ sein (BMU, 2021:5). Angesichts der politischen Unwägbarkeiten in Bezug auf die soziale Akzeptanz der Energiewende scheint der Erfolg dieser ambitionierten Klimapolitik gefährdet zu sein. Das „Wie“ der Energiewende, das im Kontext von prozeduraler sowie distributiver Gerechtigkeit bereits von vielen Seiten beleuchtet wurde (Bickerstaff, 2017; Jenkins et al., 2016) und Fragen der Energiademokratie (Van Veelen und Van der Horst, 2018), der Energiegerechtigkeit (Bouzarovski und Simcock, 2017) und der Umweltgerechtigkeit (Levenda et al., 2021) in den Fokus sozialwissenschaftlicher Energieforschung gerückt hat, polarisiert nach wie vor. Dies liegt nach unserer Auffassung auch daran, dass die prozedurale Dimension in direktem Zusammenhang mit der bislang wenig bearbeiteten *lokalen Dimension* steht. Das „Wo“ der Energiewende beinhaltet dabei keineswegs nur die Frage nach geeigneten Standorten im Sinne ihrer materiellen Ausstattung (z. B. Energiepotenziale, Distanz, Erreichbarkeit), wie Matthes et al. (2018) dies im Rahmen ihrer Studie zur Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung für Deutschland gezeigt haben. Ebenso kontrovers erscheint das Immaterielle, das aus Standorten soziale Orte werden lässt, die mit starken emotionalen sowie symbolischen Bezugspunkten versehen sind (Van Veelen und Haggett, 2016:535 ff.). Zustimmung und Opposition gegenüber der Energiewende sind für Politik und Planung daher nur schwer zu antizipieren. Deshalb wollen wir die Frage nach dem materiellen und immateriellen „Wo“ der Energiewende in den Mittelpunkt dieser Studie rücken, da wir auf diesem Gebiet folgende übergeordnete Forschungslücke identifizieren konnten: Die Strategien der Bundesregierung zum Umbau der Energieversorgung lassen völlig offen, *wo* der zu erwartende starke Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen von Klimaneutralität konkret erfolgen soll, wie dabei die jährlichen Ausbauschritte aussehen könnten und welche sozialen Implikationen bei dieser räumlichen Transformation zu berücksichtigen sind. Daraus lassen sich vier untergeordnete Forschungslücken ableiten.

1. Der Flächenbedarf für die Transformation des deutschen Energiesystems und die räumlich-zeitlichen Muster erneuerbarer Energien, die der internationalen Klimapolitik Rechnung tragen, wurden noch nicht in ihrer landschaftlichen Komplexität analysiert.
2. Unklar ist zudem, inwiefern klimaneutrale Energielandschaften neuen sozialen Konflikten das Fundament setzen und welche räumlichen Zielkonflikte dabei entstehen könnten.
3. Darüber hinaus ist fraglich, inwieweit die aktuelle Landnutzung den rechtzeitigen Umbau der Energieversorgung in Richtung Klimaneutralität erschwert und in-

wiefern die Politik potenziellen Flächenengpässen erfolgreich mit der Anpassung von planungsrechtlichen Rahmenbedingungen begegnen kann.

4. Schließlich gibt es keine hinreichenden Handlungsempfehlungen für eine stringente und sozial ausgewogene regionale Energiewende, die die Vorgaben der internationalen Klimapolitik aufgreift und dabei versucht, potenzielle räumliche Konflikte frühzeitig zu bedenken.

Es erscheint aus zwei Gründen lohnend, diesem Defizit in der Politikformulierung und Politikimplementierung Abhilfe zu leisten: (1) Entsprechend dem Mehrebenensystem der Klimagovernance, das auf globaler und nationaler Ebene wichtige politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen setzt, entfalten sich konkrete Handlungsperspektiven sowie die Orchestrierung der entsprechenden Instrumente der Klimasteuerung primär auf lokaler und regionaler Ebene (Simonis, 2017:213). Die Institutionalisierung der globalen Klimapolitik folge damit der Kleinteiligkeit des natürlichen Klimasystems, das aus unzähligen ökologischen Subsystemen besteht und in dieser Form die sozio-ökologischen Lebensbedingungen präge. (2) Aufgrund des hohen Flächenverbrauchs erneuerbarer Energien, der vielfältigen konkurrierenden Flächennutzungen, der rückläufigen sozialen Akzeptanz und der Unwägbarkeiten im Planungsrecht kann Deutschlands Klimapolitik nur gelingen, wenn frühzeitig umfassende Analysen zu potenziellen klimaneutralen Energielandschaften vorgenommen und die aus ihnen möglicherweise hervorgehenden sozialen Konflikte frühzeitig bedacht werden. Verschärfend wirken dabei die Ziele der Bundesregierung im Kontext der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie, den Flächenkonsum, der zwischen 2016 und 2019 noch 52 ha pro Tag betrug, bis 2030 auf 20 ha zu senken (UBA, 2021). Wir gehen daher von folgenden Forschungsfragen aus:

1. Inwieweit transformiert das Zwei-Grad-Ziel unsere heimatlichen Landschaften, wenn Politik und Planung sich ernsthaft darum bemühen, die internationalen Klimaziele auf Basis des Ausbaus von Wind- und Solarenergie zu erreichen?
2. Mit welchem Flächenverbrauch müssten wir bei dieser Energietransformation durch den Ausbau von Windkraft- und Photovoltaik-Freiflächenanlagen rechnen, welche territorial-institutionellen Rahmenbedingungen sind hierbei maßgebend und welche alternativen räumlichen Entwicklungen sind möglich?
3. An welchen Orten wären die räumlichen Veränderungen am größten und wie kann dort eine zu starke landschaftliche Überformung abgemildert werden?
4. Welche Erfordernisse erwachsen aus diesen Erkenntnissen für eine stringente regionale Energiestrategie, die die internationalen Ziele im Klimaschutz rechtzeitig und konfliktarm umsetzen soll?

Aus diesen Gründen werden wir potenzielle Energielandschaften, die sich aus dem Zwei-Grad-Ziel ableiten lassen, (1) in ihrer landschaftlichen Komplexität modellieren und auf Basis von Geographischen Informationssystemen (GIS) visualisieren. Die Transformation des deutschen Energiesystems wird hierbei an das Klimaabkommen von Paris gekoppelt, so dass jene räumlich-zeitlichen Muster erneuerbarer Energien identifiziert werden, die es ermöglichen, die globale Erwärmung unter 2 °C zu halten. Auf Basis der Technologien Windkraft und Photovoltaik soll der Stromsektor spätestens dann Klimaneutralität erreichen, wenn die CO₂-Budgets noch nicht ganz aufgebraucht sind. In technologischer Perspektive liegt der Fokus unserer Studie auf der Windenergie und Photovoltaik, denn wenngleich Wasserkraft und Biogärne eine nicht unbedeutende Rolle im Strommix spielen, so ist das Potenzial der Ersteren weitestgehend ausgeschöpft und Letztere ist politisch nicht mehr erwünscht. Die fossil-nuklearen Kapazitäten im Strommix werden daher sukzessive und jährlich zu gleichen Teilen bis 2045 durch die Windenergie und Photovoltaik substituiert (vgl. Abb. 1). Diese Substitution zu gleichen Teilen erscheint angebracht, da sich bei einem offenen Wettbewerb die Photovoltaik aufgrund der hohen Globalstrahlung an allen Standorten des Untersuchungsgebietes gegen die Windenergie durchsetzen würde. Die Gewährleistung der Netzstabilität macht es jedoch notwendig, beide Technologien zu entwickeln, da sie ihr jeweiliges Optimum unter gänzlich unterschiedlichen meteorologischen Voraussetzungen erreichen. Zusätzlich werden die intermittierenden Quellen Wind und Sonne von den zahlreichen grund- und spitzenlastfähigen Biogasanlagen, die in der Region bereits stark ausgebaut wurden, gestützt.

Die Vielzahl an energielandschaftlichen Optionen wird dabei (2) mittels Szenarien abgebildet, indem die planungsrechtlichen Vorgaben für Windkraft und Photovoltaik, die die Raumordnung, den Naturschutz, den Tourismus sowie die Siedlungs- und Abstandsflächen betreffen, variiert werden. Hierdurch ist es möglich zu analysieren, inwieweit die rechtlichen Bestimmungen zum Ausbau erneuerbarer Energien und die aus ihnen hervorgehenden Landnutzungssysteme mit den Klimaschutzz Zielen in Einklang zu bringen sind und inwiefern Veränderungen im Planungsrecht über räumliche Engpässe beim Aufbau einer klimaneutralen Energiewirtschaft hinweghelfen oder diese verschärfen. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden (3) potenzielle räumliche und soziale Konflikte, die sich aus den landschaftlichen Veränderungen in Folge der Energiewende ergeben könnten, identifiziert und kritisch reflektiert.

Beispielhaft werden wir dies anhand der Planungsregion Augsburg (4063 km²) illustrieren. Diese Untersuchungsregion ist deshalb von großem Interesse, da die Bayerische Staatsregierung das Bayerische Aktionsprogramm Energie auf den Weg gebracht hat, in dem zahlreiche Maßnahmen zur weiteren Umsetzung der Energiewende konkretisiert wurden, wie der zusätzliche Ausbau von 300 Windkraftanlagen, der Zubau von 3,2 GWp PV-Leistung sowie die Erweiterung

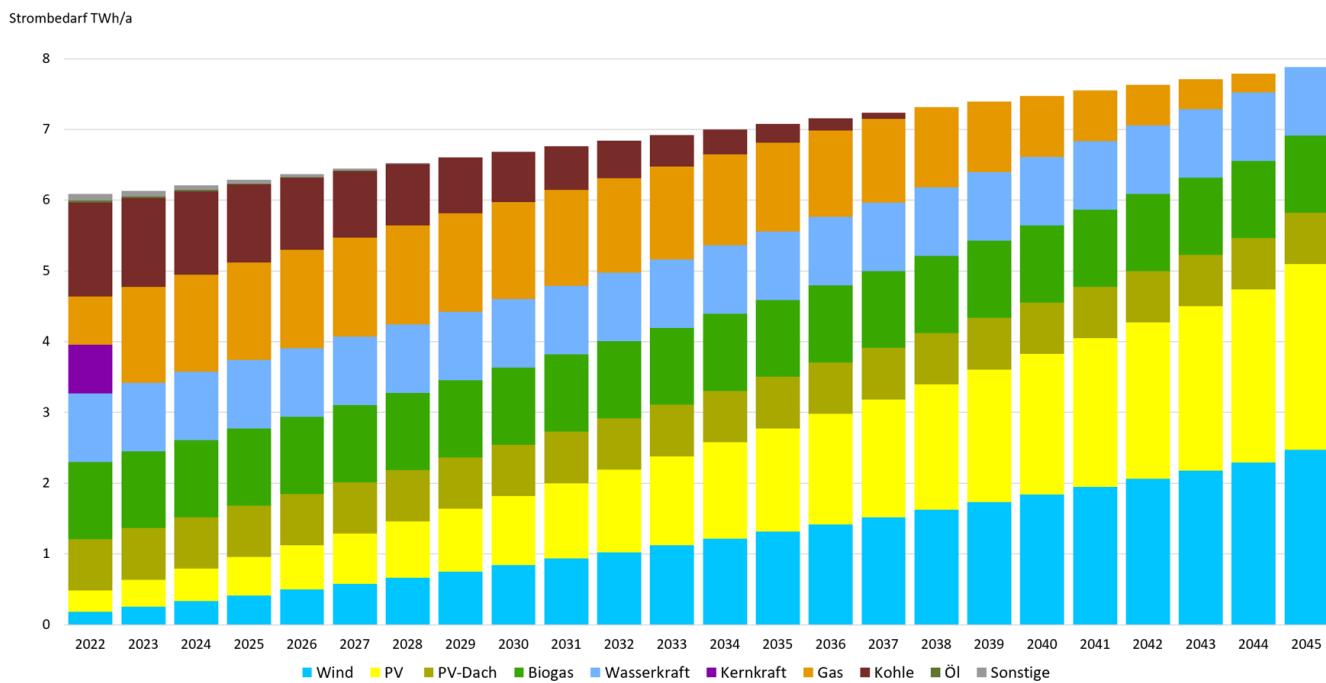


Abb. 1. Entwicklung des regionalen Strommixes nach dem Zwei-Grad-Ziel.

der Kollektorfläche im Bereich Solarthermie um 250 000 m² (StMWi, 2019). Die Region ist zudem stark vom Ausstieg aus der klimaneutralen Kernenergie betroffen, weshalb der Ausbau erneuerbarer Energien nicht nur im Sinne des Klimaschutzes bedeutsam ist, sondern auch zur Sicherung der industriellen Standortgunst. Letztere ist seit dem Beginn des Angriffes Russlands auf die Ukraine am 24. Februar 2022 in derart hohem Maße gefährdet, dass die Bundesregierung beschlossen hat, den für Ende 2022 geplanten Ausstieg aus der Kernenergienutzung „längstens“ auf den 15. April 2023 zu verschieben (Stratmann und Kersting, 2022). Die Stromversorgung Bayerns wird folglich über den kurzfristigen Weiterbetrieb des Kernreaktors Isar 2 stabilisiert. Noch wesentlich dramatischer wirkt sich die Krise auf die Wärmeversorgung aus, da das Bundesland Bayern den überwiegenden Teil seines Erdgases bislang aus Russland bezogen hatte, und zwar über die Mitteleuropäische Gasleitung (MEGAL), die im oberpfälzischen Waidhaus ankommt. Die gesteigerten Erdgaslieferungen aus Übersee, Norwegen und den Niederlanden, die das russische Erdgas mittelfristig komplett ersetzen sollen, kommen im entfernten Norden Deutschlands an. Zwar schließt die Bundesnetzagentur eine räumliche Benachteiligung Bayerns im Krisenfall aus, dennoch gibt es inzwischen Überlegungen, Bayern auch durch den Bau neuer Pipelines, unter Anbindung an den italienischen Hafen Triest, mit Erdgas zu versorgen (Storch, 2022).

Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal der Region sind die strengen Abstandsregelungen für Windkraftanlagen und das Einbeziehen landwirtschaftlich benachteiligter Gebiete für die Photovoltaik. Die Bedeutung landschaftsästhetischer Ar-

gumentationsmuster zur Verhinderung von Energieprojekten ist in Bayern zudem überdurchschnittlich groß. Nicht zuletzt ist die Region Augsburg reich an touristisch relevanten kulturlandschaftlichen Elementen, die es beim Aufbau regenerativer Energiesysteme zu berücksichtigen gilt.

Wir bauen mit diesem inhaltlichen und räumlichen Fokus auf den Erkenntnissen unserer vorbereitenden Studie auf (Bosch und Kienmoser, 2021), deren energiepolitischer Rahmen sich inzwischen gravierend verändert hat. Seit Kurzem gilt der zeitliche Rahmen des deutschen Kohleausstiegsgesetzes (BMWi, 2020), aus dem wir eine lineare Modellierung der Energietransformation für den Zeitraum 2022 bis 2045 ableiten. Folglich muss sowohl auf einen planmäßigen Ausbau erneuerbarer Energien als auch auf den Rückbau fossiler Kapazitäten geachtet werden.

2 Theoretischer Hintergrund

Mit den folgenden Ausführungen entfalten wir einerseits den theoretischen Rahmen für die Entwicklung von Szenarien zum Aufbau klimaneutraler Energielandschaften. Andererseits werden wir die konzeptionellen und normativen Prämissen, die unseren Modellierungen zu Grunde liegen, offenlegen.

Die Analyse von Flächenpotenzialen für den Ausbau erneuerbarer Energien wird in der Regel mit einer positivistischen Raumforschung in Verbindung gebracht, bei der Räume auf messbare Größen, wie Flächenertrag, Windhöufigkeit, Hangneigungen etc., reduziert werden (Weber und Kühne, 2019:60 f.). Die zahlreichen GIS-gestützten Stand-

ortanalysen, die ihren Fokus auf räumliche Einzelphänomene richten, die in Form von sog. Layern dargestellt und miteinander verschnitten werden, stehen beispielhaft hierfür (Shao et al., 2020; Xiao und Murray, 2019). Wenn wir die räumlichen Grenzen und Möglichkeiten von klimaneutralen Energienlandschaften tiefer ergründen wollen, muss jedoch beachtet werden, dass dieser Typus von Landschaft aus ganz unterschiedlichen Arten von „menschlichem Ausdrucksvermögen“ (Berger und Luckmann, 2010:36) hervorgehen kann. „Energienlandschaften“ – vgl. Pasqualetti und Stremke (2018), Stremke (2017) und Calvert et al. (2019) – sind folglich das „Ergebnis gesellschaftlich gebildeter Deutungs- und Bewertungsmuster“ (Kühne, 2019:69) und je nach Kontext spezifische gesellschaftliche Konstruktionen der Wirklichkeit. Nach diesem Verständnis gehen wir von mehreren möglichen „Energiezukünften“ (Rohde und Quitzow, 2021:189) aus, die ihren Ursprung jeweils in spezifischen subjektiven Empfindungen und Handlungen haben, die durch Wiederholung und Institutionalisierung zu „dauerhaften Indikatoren“ und „Typisierungen“ (Berger und Luckmann, 2010:36) verfestigt werden. Das bedeutet, dass wengleich wir mittel- bis langfristig von der Realisierung einer klimaneutralen Gesellschaft ausgehen können, sind die „Objektivationen“ (Berger und Luckmann, 2010:37), die uns in diese Wirklichkeit einer kohlenstofffreien Alltagswelt führen werden, vielfältig und in Bezug auf ihre Durchsetzungsfähigkeit sowie Dauerhaftigkeit unklar. Daher wollen wir im Rahmen dieser Studie unterschiedliche räumlich-technologische Entwicklungen in Abhängigkeit von gesellschaftlichen Zielen und rechtlichen Rahmenbedingungen modellieren und analysieren. Hierzu werden wir Szenarien entwickeln, die von unterschiedlichen Objektivationen bspw. in Bezug auf Planungsrecht, Gesetzgebung sowie Natur- und Artenschutz geprägt sind. Im Speziellen betrachten wir das Verhältnis zwischen *Restriktionsflächen* und *restriktionsfreien Flächen* für den Ausbau erneuerbarer Energien als ein dynamisches Gebilde von Typisierungen, das für alle Akteur:innen und Denkweisen einen beeinflussbaren „Möglichkeitsraum“ (Bruns und Kühne, 2013:88) schafft.

Unterschiedliche soziale Prozesse können sich demnach in die materielle Gestaltung von klimaneutralen Energienlandschaften einschreiben, wobei gegenwärtig noch unklar ist, (1) inwieweit das Neukonfigurieren sozialer Beziehungen rund um die Energieversorgung neue räumlich-technische Systeme etabliert (Bridge, 2018; Häußling, 2019), (2) welche Interessen sich dabei mit Macht durchsetzen werden und (3) wo entsprechend diesen Interessen die neuen Energienlandschaften sich erstrecken werden. An die Frage des „Wo der Energiewende?“, d. h. die planerische Umsetzung klimaneutraler Energienlandschaften, schließt sich folglich unmittelbar die Reflexion ihrer sozialen Implikationen und der zu Grunde liegenden gesellschaftlichen Konventionen an (Schweiger et al., 2018:432). Energienlandschaften sind aus dieser Perspektive nicht per se mit Bedeutung ausgestattet, sondern ohne menschliches Zutun vollkommen unstruktur-

riert (Diaz-Bone, 2006:73). Die Strukturierung erfolgt erst durch die diskursive Praxis. Das gesprochene und das geschriebene Wort sind daher zentral, wie Lefebvre (1991:28) betont. Bemerkenswert dabei ist, dass vor allem jene sprachlichen Codes die gesellschaftlichen Diskurse prägen, die von Akteur:innen stammen, die an einer kapitalistischen Strukturierung von Gesellschaft und Raum interessiert sind (Fuchs, 2019:138). Die aus dieser sozialen Praxis hervorgehenden Landschaften spiegeln diese Machtasymmetrien wider, wodurch Energienlandschaften zu Abbildern hegemonialer Diskurse werden (Haas, 2017).

In diesem Sinne können die Grenzen und Möglichkeiten klimaneutraler Energienlandschaften als räumlicher Nebeneffekt der Strategie der machtvollen Akteur:innen einer Gesellschaft verstanden werden, die Gesetze, Institutionen und Eigentumsverhältnisse zu stabilisieren. Dieser machtvolle Aneignungsprozess führt zu Raumproduktionen, die Lefebvre (1991:57) dem sog. *konzipierten Raum* zuordnet. Dominante Akteur:innen prägen dabei auf „kalkulierende und quantifizierende“ Weise die territorial-institutionellen Rahmenbedingungen einer Gesellschaft (Fuchs, 2019:137).

Die zentralen territorial-institutionellen Rahmenbedingungen und Akteur:innen (vgl. hierzu Bosch, 2021:160 f.), die dabei zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung (§ 1 Abs. 1 ROG) der klimaneutralen Energienlandschaften herangezogen werden, sind in erster Linie die drei Planungsebenen Bundesraumordnung, Landes- bzw. Regionalplanung und kommunale Bauleitplanung (BMJV, 2008). Die räumliche Planung hat entsprechend § 2 Abs. 2 Nr. 6 des Raumordnungsgesetzes (ROG) die räumlichen Voraussetzungen für den Ausbau erneuerbarer Energien zu schaffen. Hierbei sollen die wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Funktionen von Räumen aufeinander abgestimmt werden, wie das Leitbild der nachhaltigen Raumentwicklung (§ 1 Abs. 2 ROG) es verlangt. Die Träger:innen der Raumplanung müssen zwischen den regenerativen Technologien und etwaigen konkurrierenden Flächenansprüchen vermitteln, indem sie öffentliche und private Belange abwägen und die Ergebnisse dieses Prozesses in den Raumordnungsplänen fixieren (§ 7 Abs. 1 u. 2 ROG). Als planerisches Instrument stehen gebietsbezogene Nutzungsregelungen, wie Vorrang-, Vorbehalt- und Eignungsgebiete, zur Verfügung. Diese können den erneuerbaren Energien einen räumlichen Vorrang gewähren (§ 7 Abs. 3 Nr. 1/2/3 ROG), sie aber auch kategorisch ausschließen. Des Weiteren ist das Baugesetzbuch (BMJV, 2017a) zu erwähnen, das die solare Strahlungsenergie an Gebäuden sowie die Windenergie im Außenbereich von Gemeinden als privilegierte Vorhaben ausweist, solange keine öffentlichen Belange, wie Denkmal-, Boden- und Wasserschutz, entgegenstehen (§ 35 Abs. 1 Nr. 5/6/8). Auch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) übt eine räumliche Steuerungswirkung aus, da es den Ausbau in Richtung sog. vorbelasteter Standorte, wie wohnliche, gewerbliche, infrastrukturelle oder militärische Brachflächen, lenkt (BMJV, 2017b). Schließlich werden die Standortmuster der Energie-

landschaften von ökologischen Faktoren geprägt, da es das Ziel des Natur- und Artenschutzes ist, ökologisch sensible Gebiete vor einer Technisierung zu schützen und die Diversität an "Ökosystemen, Arten und genetischen Ausstattungen" zu sichern (Job et al., 2016:483).

Im Rahmen eines Basisszenarios werden wir zeigen, welche räumlichen Korridore den erneuerbaren Energien gegenwärtig territorial-institutionell offenstehen. Diese aktuelle „planungsrechtliche Wirklichkeit“, die hinter dem Basisszenario steht, ist als Resultat von „gesellschaftlich entwickeltem, vermitteltem und bewahrtem Wissen“ (Berger und Luckmann, 2010:3) zu betrachten und besitzt in diesem Sinne eine große Persistenz. Dennoch kann es durch übergeordnete soziale Prozesse (externe Schocks, Megatrends, arbiträre Stopps in Diskursen) oder Basisinnovationen in Nischenbereichen transformiert werden (Geels, 2011), so dass alternative Objektivierungen im Kontext zulässiger Landnutzungen wahrscheinlicher werden. Alle weiteren Szenarien, die wir modellieren werden, gehen daher von signifikanten Machtverschiebungen im Kontext der gesellschaftlichen Aushandlungsprozesse zur räumlichen Organisation klimaneutraler Energiedienstleistungen aus und sind als potenzielle „spezifische Konglomerate von Wirklichkeit und Wissen“ (Berger und Luckmann, 2010:3) zu betrachten.

Mulvaney (2017:155) betont, dass die Verteilung von Macht entscheidenden Einfluss darauf haben wird, wie die künftigen Energiedienstleistungen gestaltet werden. Quantitative räumliche Modellierungen müssen diese Variabilität in der Einflussnahme auf die territorial-institutionellen Rahmenbedingungen erfassen, da nicht absehbar ist, in welche Richtungen Gesellschaften sich langfristig entwickeln werden. In diesem Sinne bringen die neuen Energiedienstleistungen Gewinner:innen und Verlierer:innen hervor (Bridge et al., 2018:175), wobei sich die Konflikte um die Energiewende entlang bestehender sozialer und ökologischer Ungerechtigkeiten entzünden und Machtasymmetrien so eher verstetigt als neu geschaffen werden. Energiedienstleistungen greifen folglich auch in das alltägliche Leben jener Menschen ein, die den Aufbau klimaneutraler Energiedienstleistungen eher passiv erleben und deren Raumproduktionen marginalisiert oder sogar unterdrückt werden (Fuchs, 2019:136). Diese sog. *gelebten Räume*, die sich parallel zu den dominanten *konzipierten Räumen* klimaneutraler Energiedienstleistungen entwickeln, werden wir im Rahmen unserer Studie zwar nicht explizit analysieren. Den „Antagonismus“ (Fuchs, 2019) zwischen *konzipiertem* und *gelebtem Raum* wollen wir dennoch mitbedenken, indem wir den Grad der sozialen Ausgewogenheit jener Landnutzungen, die sich aus den Szenarien ergeben, kritisch reflektieren.

Aus dem theoretischen Hintergrund ergeben sich daher folgende Prämissen:

1. Die territorial-institutionellen Rahmenbedingungen, die unseren Modellierungen zu Grunde liegen (z. B. Gesetze, energiepolitische Ziele, räumliche Restriktionen,

Abstandsflächen, Förderregime), sind das Ergebnis eines machtvollen gesellschaftlichen Aushandlungsprozesses und spiegeln primär die Interessen spezifischer, machtvoller Akteur:innen wider. Aus dem Theorierahmen leiten wir daher ab, mögliche *Energiezukünfte* im Kontext des Aufbaus klimaneutraler Energiedienstleistungen durch Variation der territorial-institutionellen Rahmenbedingungen und dem daraus sich ableitenden variablen Verhältnis zwischen *Restriktionsflächen* und *restriktionsfreien Flächen* zu ergründen, indem wir konkurrierende gesellschaftliche Raumneigungen in Form von Szenarien analysieren. Wenn wir verschiedene Szenarien zur Landnutzung modellieren, greifen wir aktiv in die territorial-institutionellen Rahmenbedingungen sowie in die ihnen zu Grunde liegenden Machtverhältnisse ein und verdeutlichen damit ihre räumlichen Implikationen.

2. Wenn wir bei den Modellierungen die territorial-institutionellen Strukturen variieren und von den gegenwärtigen Paradigmen im Planungsrecht, in der Gesetzgebung und im Natur- und Artenschutz abweichen, rücken wir jene Interessen von Akteur:innen in den Vordergrund, deren Vorstellungen von einer klimarechten Gesellschaft bislang marginalisiert wurden. Aus dem Theorierahmen leiten wir daher die Notwendigkeit ab, mittels quantitativer Methoden einen Beitrag zur Debatte um mehr Energiegerechtigkeit zu leisten und in diesem Sinne auf die prozedurale und lokale Dimension der Energiewende zu verweisen.

3 Methode

3.1 Modellierung

Mittels GIS sollen Energiedienstleistungen entwickelt werden, die es ermöglichen, die globale Erwärmung auf weniger als 2 °C zu begrenzen. Die Programmiersprache Python bildet die Software für die Modellierung klimaneutraler Landnutzungssysteme. Mit Hilfe der Python-Bibliothek ArcGIS Python API können GIS-Werkzeuge aus ArcGIS Pro mit Python verknüpft und komplexe Geovisualisierungen sowie ein umfassendes Geodatenmanagement durchgeführt werden (Bosch und Kienmoser, 2021). Unsere Vorgehensweise bei der Modellierung von Energiedienstleistungen gliedert sich in die Datenerhebung, die Modellierung sowie die Ergebnisaufbereitung und unterscheidet zwischen einem theoretischen (physikalisch), einem technischen (Anlagenart), einem ökonomischen (Flächenertrag) und einem erschließbaren (Planungsrecht) Potenzial.

Die zentralen natürlichen Standortfaktoren sind mit Blick auf die Windenergie – vgl. Bremen und Wessel (2015), Emeis (2015), Mengelkamp (2015) – die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit, ihre zeitlichen Variationen, die Häufigkeitsverteilungen mittlerer Windverhältnisse, die Turbu-

lenzintensitäten, die Extremwerte, die raum-zeitlichen Variabilitäten sowie die Windprofile über komplexem Gelände. Da die Windleistung proportional zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit steigt, wirken sich geringfügige Änderungen in den meteorologischen Bedingungen erheblich auf den Ertrag aus. Bei der Modellierung von Windpotenzialen gehen wir aus Gründen der Komplexitätsreduktion von standortbezogenen Durchschnittswerten aus. Ertragsrelevante Standortfaktoren für PV-Freiflächenanlagen – vgl. Müller (2015), Heinemann und Lorenz (2015) – sind die Globalstrahlung (Direkt- und Diffusstrahlung), die Temperatur (Einfluss auf Wirkungsgrad), die Luftfeuchtigkeit und Wolkenbildung, die Extremwerte sowie die raum-zeitlichen Variabilitäten. Mit Blick auf den Ertrag ist es vor allem notwendig, Standorte mit einer hohen Globalstrahlung zu identifizieren. Aus diesem Grund liegt der Fokus unserer Modellierungen auf diesem Parameter.

Methodisch gesehen handelt es sich um eine multikriterielle Entscheidungsanalyse (Shao et al., 2020). Mit Hilfe von Ausschlusskriterien werden die Gebiete bestimmt, die für erneuerbare Energien unzugänglich sind (z. B. Pufferzonen, Schutzgebiete, Erholungsgebiete, Siedlungsgebiete). Für die restriktionsfreien Gebiete müssen weitere Bewertungskriterien herangezogen werden, um beurteilen zu können, welche Technologie für einen bestimmten Standort am besten geeignet ist (z. B. Ertrag). Da die Kriterien in Form von numerischen Werten und/oder qualitativen Merkmalen vorliegen können, müssen sie in einem weiteren Schritt für die quantitativen Analysen aufbereitet werden (Kriterienwertnormierung). Anschließend können die verschiedenen Geodaten in Form von einzelnen Layern überlagert und miteinander verschnitten werden (Overlay-Analyse). Im Rahmen dieser Verschneidung von Geodaten gewichten wir die einzelnen Daten gleich (equal weighting), da eine große Unsicherheit darüber besteht, welchen Einfluss einzelne Parameter in bestimmten Regionen tatsächlich haben. Mit Hilfe von Szenarien wollen wir jedoch erkunden, inwieweit die Variation von Ausschlusskriterien zu signifikanten ökologischen und sozialen Veränderungen in den Landnutzungsmustern erneuerbarer Energien führt.

Der Aufbau der klimaneutralen Stromversorgung, der auf einer in Python automatisierten GIS-Analyse von Rasterzellen basiert (raster grid approach), gestaltet sich methodisch wie folgt: Die ertragreichsten und restriktionsfreien Standorte der Region werden so lange mit Windkraft- bzw. PV-Freiflächenanlagen besetzt, bis die innerhalb eines Jahres entstandene Stromlücke, die durch den Rückbau der fossilen Kraftwerke entsteht, geschlossen ist. Es darf nur diejenige Technologie an einem Standort (Rasterzelle 100 m) aufgestellt werden, die dort entsprechend den natürlichen Potenzialen (Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung) den höchsten Stromertrag erzielt und für die zudem keine Ausschlusskriterien (z. B. Naturschutz, Gewässer) gelten. Im modellierten Zeitraum 2022–2045 findet dieser Vorgang so lange statt, bis die vollständige Versorgung mit regenerativem

Strom erreicht ist. Das regionale CO₂-Budget, das am Ende der Transformation nahezu den Wert Null erreicht, wird folglich über diesen Zeitraum gestreckt, so dass 2045 Klimaneutralität herrscht (vgl. Abb. 2). Da der Strommix der Untersuchungsregion bereits zu 54 % regenerativ ist, müsste der weitere Ausbau nur noch 46 % des regionalen Bedarfs decken.

Der Ablauf des Transformationsprozesses wird grundsätzlich durch die regionalen CO₂-Budgets bestimmt, die nicht überschritten werden dürfen. Daraus folgt, dass der Ausbau erneuerbarer Energien reziprok an den Rückbau fossilkerniger Kraftwerke gekoppelt ist. Innerhalb des Modells muss diese Exnovation des alten Energiesystems nicht unbedingt sofort und möglichst schnell erfolgen. Wichtig ist es jedoch, die kumulativen Emissionsmengen der noch länger produzierenden fossilen Kraftwerke im Blick zu behalten. Für die Modellierungen gilt daher: Solange fossile Kraftwerke in der Region noch Strom erzeugen, werden die daraus resultierenden CO₂-Emissionen pro erzeugte Kilowattstunde vom jeweils aktuellen regionalen CO₂-Gesamtbudget abgezogen (vgl. Abb. 2). Dabei orientieren wir uns am Datensatz von Statista (2022a), der die CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde in Abhängigkeit von der Kraftwerksart angibt (z. B. Braunkohle = 1153 CO₂ pro kWh, Steinkohle = 949 CO₂ pro kWh). Je nachdem, wie lange bestimmte fossile Kraftwerke am Netz bleiben (variabel), emittieren diese weiter Kohlenstoffdioxid und reduzieren das CO₂-Budget der Region. Dies ist unproblematisch, solange das Budget nicht überschritten wird.

Bei der Berechnung des gesamten regionalen CO₂-Budgets, von dem die kraftwerksspezifischen Emissionen abgezogen werden, orientieren wir uns an den Angaben des IPCC (2021:38), der darlegt, dass die Erderwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % auf 1,5, 1,7 bzw. 2,0 °C begrenzt werden kann, wenn, beginnend mit dem Jahr 2020, global nicht mehr als 500, 850 bzw. 1350 Gt CO₂ emittiert werden. Können die Emissionen auf 330, 550 bzw. 900 Gt begrenzt werden, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit auf 83 %. Bei Emissionswerten von 900, 1450 bzw. 2300 Gt verringert sie sich auf 17 %. Entsprechend unseren Zielsetzungen orientieren wir uns am Budget des Zwei-Grad-Ziels, das wir mit einer Wahrscheinlichkeit von 83 % erreichen wollen. Unsere Modellierungen stützen sich daher auf den Wert von 900 Gt, woraus sich für das Jahr 2022 (Beginn des Modellierungszeitraumes) ein globales CO₂-Budget von 825 Gt ergibt, wenn die bereits verbrauchten CO₂-Emissionen der Jahre 2020 und 2021 (75 Gt) miteinbezogen werden (Statista, 2021). Der Fokus der Modellierungen muss daher stets auf das noch verfügbare regionale CO₂-Budget gerichtet sein. Hierzu wird das globale CO₂-Budget (siehe unten), das der Weltbevölkerung noch zur Verfügung steht, in ein Pro-Kopf-Budget umgerechnet. Dabei ist anzumerken, dass das Gleichheitsprinzip bei den Emissionsrechten der Erdenbürger:innen, das unseren Modellierungen zu Grunde liegt, ein mittelfristiges Ziel der Weltgemeinschaft darstellt. Un-

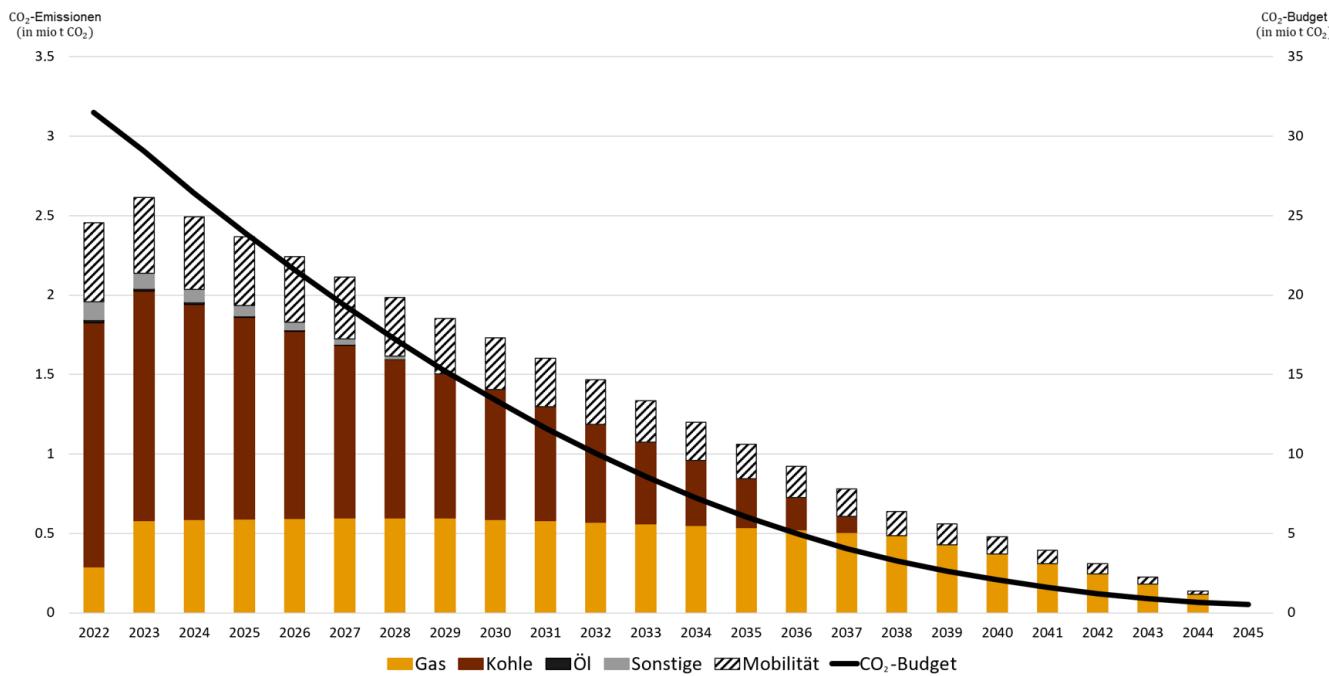


Abb. 2. Verbrauchsentwicklung des regionalen CO₂-Budgets nach dem Zwei-Grad-Ziel.

ter dem Leitbild „Contraction and Convergence“ verpflichten sich die Industrieländer zunächst zu stärkeren Bemühungen im Klimaschutz, als dies bei Entwicklungs- und Schwellenländern der Fall ist (Simonis, 2017:93 f.). Nicht zuletzt ist das Niveau der Pro-Kopf-Emissionen in den Industrieländern deutlich höher.

Zur Ermittlung des für die Untersuchungsregion verfügbaren CO₂-Budgets wird das Verteilungsprinzip der Lastenteilung (burden-sharing) verwendet, bei welchem das noch zur Verfügung stehende CO₂-Budget pro Nation anteilig an der Weltbevölkerung verteilt wird (Friedlingstein et al., 2019; Raupach et al., 2014). Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich der Anteil der bundesdeutschen Bevölkerung an der Weltbevölkerung im Zeitraum der Modellierung verändert (Statistisches Bundesamt, 2022). Aus diesem Grund wird in der Methodik der Mittelwert zwischen dem aktuellen Anteil an der Weltbevölkerung sowie dem Anteil zum Ende des Modellierungszeitraums (2045) gebildet und so das Gesamtbudget der Bundesrepublik bestimmt. Der Anteil der Bevölkerung der Untersuchungsregion an der Bundesrepublik bleibt im Zeitraum der Modellierung in etwa gleich (Statistisches Bundesamt, 2022). Gegenwärtig tragen die Bundesrepublik Deutschland und die Untersuchungsregion 1,8 % zu den weltweiten CO₂-Emissionen bei (Statista, 2020), während ihr Anteil an der Weltbevölkerung nur 1,1 % beträgt (Statista, 2022b; Statistisches Bundesamt, 2022). Diesem Ungleichgewicht sowie den historischen Treibhausgasemissionen der Industrienationen muss über den Emissionshandel Rechnung getragen werden.

Angesichts einer errechneten durchschnittlichen Weltbevölkerungszahl während des Modellierungszeitraumes von 8,685 Mrd. ergibt sich ein absolutes Pro-Kopf-Budget von 95 t CO₂. Daraus leitet sich ein regionales CO₂-Budget von 90 Mt ab, wenn eine durchschnittliche Bevölkerungszahl der Region Augsburg von 946 500 zu Grunde gelegt wird. Von diesem regionalen Gesamtbudget werden die Anteile des Kraftstoff- und Wärmesektors abgezogen, womit das CO₂-Budget des Stromsektors von 31 Mt verbleibt. An dieser Stelle gilt es jedoch die Sektorkopplung zu beachten, die die Bedeutung des Stromsektors zumindest langfristig erheblich steigern wird (z. B. Elektromobilität, Wärmepumpen). In Folge des bereits angelaufenen Ausbaus der Elektromobilität gehen wir langfristig von einer Steigerung des Strombedarfs um 30 % aus, weshalb wir diese zusätzliche Menge zum aktuellen Strombedarf addieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass vom CO₂-Budget des Kraftstoffsektors etwa 4 Mt auf das regionale Budget des Stromsektors übertragen werden müssen.

3.2 Daten und Szenarien

Der CORINE Land Cover-Datensatz bildet die wichtigste Datengrundlage unserer räumlichen Modellierungen. Dieser unterteilt die Erde in 44 Landnutzungsklassen (z. B. forests, semi-natural areas) (Copernicus, 2018). Hierdurch können wir definieren, welche Flächen für den Ausbau erneuerbarer Energien im Rahmen der Restriktionsanalyse auszuschließen sind. Einen Überblick zu weiteren Datensätzen, die in die Analysen miteingeflossen sind, so-

wie die entsprechenden Datenquellen bietet Tabelle 1. Von Bedeutung sind insbesondere die vom Bundesamt für Naturschutz gestellten Vektordaten zu den Schutzgebietskategorien (BfN, 2020) sowie Daten zu Hangneigungen und Hangexpositionen, die auf dem Digitalen Geländemodell des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) der Bayerischen Vermessungsverwaltung basieren (LDBV, 2018). Durch Letztere können Hangneigungen von mehr als 10 Grad für PV-Anlagen ausgeschlossen werden, da dort die Installationskosten zu hoch und folglich die Rentabilitäten zu gering wären. Zudem werden südlich exponierte Standorte mit Hangneigungen zwischen 5 und 10 Grad gegenüber nördlich exponiertem Gelände bevorzugt. Hänge ab 10 Grad Neigung werden auch für Windprojektierungen aus Gründen überhöhter Installationskosten ausgeschlossen. Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass 30 % der Modulfläche als ökologische Ausgleichsfläche auszuweisen und damit Teil der kartierten PV-Fläche sind. Die Linienvektordaten, die das Fundament der Energiepotenzialanalysen im Bereich der Verkehrs-Korridore bilden, werden ebenso vom ATKIS der Bayerischen Vermessungsverwaltung bereitgestellt (LDBV, 2018). Besondere Kulturlandschaften, die es vor einer Technisierung durch erneuerbare Energien zu schützen gilt und zu denen Abstandsflächen einzuhalten sind, werden als raumbezogene Informationen bspw. über das Digitale Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM) sowie vom Landesamt für Denkmalpflege bereitgestellt. Um die Analysen durchführen zu können, werden schließlich zahlreiche Daten zur Untersuchungsregion, wie Bevölkerungszahl, regionaler Stromverbrauch, Anteile fossiler und regenerativer Quellen am Energieverbrauch, CO₂-Emissionen des Wärme-, Kraftstoff- und Stromsektors, Anlagentechnik (z. B. Nennleistung, CO₂-Emissionen, Wirkungsgrad) sowie die Standorte der bereits ausgebauten Energieanlagen, benötigt. Im Besonderen basieren unsere Modellierungen auf Daten zu natürlichen Standortfaktoren und zur Energieinfrastruktur, die wir aus dem Energieatlas Bayern (StMWi, 2021) und von der Bundesnetzagentur erhalten haben.

Im Anschluss an die Aufbereitung der Daten wird die Region Augsburg in ein Raster unterteilt, dessen Auflösung 100 m beträgt. Je Rasterzelle sind folgende Informationen verankert: Art der Landnutzung, die damit verbundenen rechtlichen Restriktionen für Windenergie und Photovoltaik, die infrastrukturellen Gegebenheiten sowie der potenzielle Stromertrag je Anlage, der sich aus Anlagentechnik und natürlichen Voraussetzungen ergibt. Für die Windenergie wird die bislang in der Projektentwicklung häufig verwendete Anlage Enercon E-138 EP3 (3,5 MW) modelliert; die von Hanwha Q.Cells entwickelte Anlage Q.Plus BFR-G4.1. (285 Wp) bildet die technische Grundlage zu den Photovoltaik-Modellierungen. Die Windgeschwindigkeiten werden in Nabenhöhe erfasst und in m s⁻¹ angegeben, die am Boden eintreffende Globalstrahlung in kWh m⁻². Beide Datensätze liegen in einem 200 m-Raster vor. Durch Interpo-

lierung in ein 100 m-Raster werden sie daher für die Modellierung aufbereitet.

Anhand von Szenarien werden die räumlichen Ausschlusskriterien sodann variiert, um zu analysieren, wie sich Änderungen im Planungsrecht auf die Möglichkeiten des Aufbaus eines CO₂-neutralen Stromsektors auswirken. Das Erstellen der Szenarien erfolgt dabei unter Beachtung von Güte- und Prozesskriterien, wie sie von Dewald et al. (2019:335) formuliert wurden. Damit stellen wir sicher, dass die berechneten Entwicklungen möglich, wenn auch nicht zwingend wahrscheinlich oder wünschenswert sind (Plausibilität). Des Weiteren achten wir darauf, dass die modellierten Zukunftspfade in sich stimmig sind (Konsistenz). Zudem ist die Nachvollziehbarkeit der Szenarien mit Blick auf mögliche Implikationen für Politik und Planung zentral. Wir erreichen dies, indem wir eine geeignete Aggregationsebene wählen, auf der die Modellierungen detailliert genug, aber nicht in zu hoher Komplexität dargestellt werden (Granularität). Wichtig ist zudem, dass die Szenarien gut unterscheidbar sind, da nur so die Implikationen verschiedener Zukunftsentwürfe verstanden werden können (Trennschärfe). Um die Legitimität unserer Szenarien zu erhöhen, legen wir überdies die unterstellten Annahmen offen. Typologisch betrachtet – vgl. Börjeson et al. (2006) – handelt es sich bei allen Szenarien um normative Szenarien, da konkrete gesellschaftliche Ziele, wie Klimaneutralität und das Zwei-Grad-Ziel, angestrebt und so spezifische Wertesysteme vertreten werden. Abgesehen vom Basisszenario könnte man auch von explorativen Szenarien sprechen, da wesentliche Treiber der Energietransformation variiert und so unterschiedliche Energiezukünfte ergründet werden. Beim ersten Szenario, das wir im Folgenden vorstellen werden, handelt es sich zudem um ein prädiktives Szenario, das auf der Fortschreibung von Trends (Trendextrapolation) beruht und insfern eine sehr wahrscheinliche Entwicklung abbildet.

Szenario Basis: In diesem Szenario wird analysiert, inwieweit klimaneutrale Energienlandschaften angesichts der gegenwärtigen gesellschaftlichen Rahmenbedingungen realisierbar sind. Dies betrifft die Anlagentechnik, die Landnutzungen sowie das Planungsrecht (Vorranggebiete, Abstandsflächen, Erneuerbare-Energien-Gesetz, Restriktionsflächen etc.). Beispielsweise stellen Nationalparke, Naturschutzgebiete und Kernzonen von Biosphärenreservaten kategorische Ausschlussgebiete für Windkraft- und PV-Anlagen dar. Für Erstere sind zudem Vogelschutzgebiete ein unzugängliches Areal. Des Weiteren dürfen PV-Freiflächenanlagen entlang von Autobahnen und Bahnlinien nur innerhalb eines 200-Meter-Korridors errichtet werden. Darüber hinaus können pro Jahr maximal 200 PV-Anlagen auf landwirtschaftlich benachteiligten Standorten projektiert werden. Da die Möglichkeiten des Netzanschlusses sich erst durch das Einbeziehen von Mikrofaktoren, wie bspw. Eigentumsverhältnisse in Bezug auf Flächen, bewerten lassen und der empirische Aufwand für die Untersuchungsregion zu hoch wäre, ist dieser Faktor im Rahmen der Modellierungen, die eher auf der Me-

Tabelle 1. Für die Modellierungen benötigte Geo- und Sachdaten.

Datensatz	Attribut	Quelle
Landnutzungen	Landwirtschaft, Wälder, bebaute Flächen, Siedlungen, Gewässer etc.	CORINE Land Cover-Datensatz (Copernicus), OpenStreetMap (OSM)
Schutzgebiete	Biosphärenreservate, NATURA2000, Naturschutzgebiete, Naturparke etc.	Geodienst des Bundesamtes für Naturschutz
Gegenwärtiges Klima und natürliche Standortfaktoren	Temperatur (°C), Niederschlag (mm) Globalstrahlung (kWh m ⁻² a ⁻¹), Windhöufigkeit (m s ⁻¹ in Nabenhöhe)	Deutscher Wetterdienst (DWD), Energie-Atlas Bayern
Kulturlandschaftselemente	Schlösser, Burgen, Klöster, Burgställe, Ruinen, Streuobstwiesen, Hohlwege etc.	Landesamt für Denkmalpflege, untere Denkmalschutzbehörden (Landratsämter etc.)
(Kultur-)Landschaften	Gebiete von hoher/geringer landschaftlicher Qualität	Digitales Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, WebGIS-Anwendungen zur Landschaftsrahmenplanung
Erschließbarkeit	Hangneigungen (Grad od. Prozent), Hangexpositionen, Zufahrt	Digitales Geländemodell (DGM) des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS), OpenStreetMap (OSM)
Energieinfrastruktur	Regionale Anlagenkataster, Stromnetze, Einspeisepunkte	z. B. „Daten und Fakten“ Energie-Atlas Bayern
Kennzahlen regionales Energiesystem	Regionaler Stromverbrauch (TWh), Energiemix	z. B. „Daten und Fakten“ Energie-Atlas Bayern
Regionale Bevölkerungsentwicklung	Durchschnittliche Bevölkerungszahl (2022–2045)	„Rahmendaten“ Energieatlas Bayern, Statistisches Bundesamt (Destatis), Bundeszentrale für Politische Bildung (bpb)
Globale Bevölkerungsentwicklung	Durchschnittliche Bevölkerungszahl (2022–2045)	Statista – Business Data Platform
Zwei-Grad-Ziel global	Globales CO ₂ -Budget (t)	Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
Zwei-Grad-Ziel regional	Regionale CO ₂ -Budgets (t)	eigene Berechnungen
Klimawirksame Emissionen	CO ₂ -Emissionen Energiesektoren (t), CO ₂ -Emissionen Kraftwerkstyp (CO ₂ pro kWh)	„Daten und Fakten“ Energie-Atlas Bayern, Statista – Business Data Platform
Anlagentechnik Photovoltaik	Wirkungsgrad (%), Leistung (kWp)	Hanwha Q CELLS GmbH
Anlagentechnik Windenergie	Wirkungsgrad (%), Leistung (MW)	Enercon GmbH

soebene der Standortplanung ansetzen, keine raumdifferenzierende Größe.

Szenario Naturschutz: Die Vertreter:innen des Natur- und Artenschutzes versuchen starke technologische Eingriffe in die Umwelt zu verhindern (Zaspel-Heisters, 2015). Daher werden wir einerseits eine Verschärfung des Naturschutzes simulieren, indem der Zugang zu Naturparken, Flora-Fauna-Habitat-Gebieten (FFH), Landschaftsschutzgebieten und Vogelschutzgebieten (auch für PV) gesperrt wird (BfN, 2021).

Für Blaschke et al. (2013) besteht jedoch die Gefahr einer räumlichen Diskriminierung, wenn das Planungsrecht den ländlichen Raum in schützenswerte und nicht schützenswerte Gebiete unterteilt. Hierdurch wird der grundsätzliche kulturelle Wert von Landschaften, der überall und für alle Menschen besteht und dies unabhängig von Kategorisierungen wie unattraktiv, gewöhnlich oder ökologisch hochwertig, negiert. Zudem werden dadurch scheinbar minderwertige Gebiete in einer landschaftlich-ökologischen Hierarchie stigmatisiert.

tisiert. Diese Zuweisungen deklassieren Energiedienlandschaften zu „Nicht-Landschaften“, wie Schöbel (2012) formuliert, und widersprechen der verfassungsgemäßen Forderung des Raumordnungsgesetzes (BMJV, 2008), ausgleichende Lebensverhältnisse in den ländlichen Teilräumen Deutschland herzustellen. Es wird daher andererseits auch analysiert, wie sich die Öffnung bestimmter Schutzgebiete für den Ausbau erneuerbarer Energien – es geht um Naturschutzgebiete, Vogelschutzgebiete, Biosphärenreservate – auf die Umsetzbarkeit der Energiewende auswirkt. Beide Teil-Szenarien tragen damit dem schwierigen Verhältnis zwischen Natur- und Klimaschutz Rechnung.

Szenario Energierecht: In diesem Szenario geht es primär um die Flächeninteressen von Akteur:innen, die der Landwirtschaft oder der Projektentwicklung zuzuordnen sind und die sich stets dafür einsetzen, den erneuerbaren Energien mehr Raum zu verschaffen. Daher werden die rechtlichen Bestimmungen, die der Photovoltaik nur innerhalb eines 200-Meter-Korridors entlang von Verkehrsinfrastruktur einen Zugang gewähren und die zudem nur maximal 200 PV-Projektierungen pro Jahr auf landwirtschaftlich benachteiligten Flächen erlauben (StMELF, 2021), aufgehoben. Von der Analyse erhoffen wir uns tiefere Einblicke in die Dimensionen der Flächenkonkurrenz zwischen Landwirtschaft und Solarenergieproduktion. Für die Windenergie werden die geltenden Bestimmungen zu Abstandsflächen gelockert. Konkret geht es um die 10H-Regelung, die einen Abstand zwischen Anlage und Siedlung verlangt, die dem 10-fachen der Anlagenhöhe entspricht. Nach dem derzeitigen technischen Stand führt dies zu Abständen von etwa zwei Kilometern. Unter diesen Umständen sind Projekte kaum zu realisieren. Daher gilt es zu analysieren, inwieweit das Ziel einer klimaneutralen Energieversorgung besser erreicht werden kann, wenn die vor der 10H-Regelung geltenden Abstände von 800 m modelliert werden, die eine Mindestanforderung des Immissionsschutzgesetzes darstellen. So kann analysiert werden, welche quantitative Bedeutung Veränderungen in den Abstandsflächen generell haben.

Szenario Export: Dieses Szenario wurde für die Regionalentwicklung und Regionalpolitik konzipiert, deren Aufgaben unter anderem darin bestehen, die Kostenvorteile bzw. endogenen Potenziale einer Region zu erschließen. Das Szenario basiert daher auf den Erkenntnissen der volkswirtschaftlichen Theorie der komparativen Kostenvorteile. Diese besagt, dass ein Handel zwischen Regionen mit unterschiedlichen Ausstattungen von Produktionsfaktoren (z. B. Energieressourcen) ökonomische Vorteile für beide Seiten mit sich bringt (Praetorius, 2019:47). Die liefernde Region kann ihr erneuerbares Energiepotenzial besser ausschöpfen und so regionale Wirtschaftskreisläufe ankurbeln. Die empfangende Region kann ihren Strombedarf decken, ohne dabei die eigene Landschaft technisieren zu müssen. Aus diesem Grund nehmen wir an, dass ein Drittel der Stromproduktion der Planungsregion München von der

Region Augsburg übernommen wird. Die Stromproduktion müsste hierzu um 55 % gesteigert werden.

Szenario Effizienz: Das letzte Szenario bietet interessante Einblicke für Anlagenhersteller:innen im Bereich Windenergie sowie für die Regionalplanung. Speziell Letztere sollte stets darum bemüht sein, den technologischen Fortschritt in die Ordnung, Entwicklung und Sicherung der ländlichen Räume miteinzubeziehen, um die gesamtwirtschaftliche Flächeneffizienz zu erhöhen. Nicht zuletzt erzielen Forschung und Entwicklung Jahr für Jahr bemerkenswerte Erfolge bei der Leistungssteigerung von Energieanlagen. Dadurch kann die Flächeneffizienz der Energiewende stetig verbessert werden. Am Beispiel der Windenergie wird daher analysiert, wie sich eine erhöhte Nennleistung bei Windkraftanlagen auf die räumlichen Muster der klimaneutralen Energiedienlandschaft auswirkt. In diesem Szenario wird daher der gängige Anlagentyp ENERCON E-138 EP3 mit einer Nennleistung von 3,5 MW durch den Anlagentyp ENERCON E-147 EP5 E2 mit einer Nennleistung von 5 MW ersetzt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der räumlichen Analysen zu den einzelnen Szenarien ausführlich dargestellt.

4 Ergebnisse

Die folgenden Darstellungen zu den Ergebnissen der Studie beziehen sich unmittelbar auf die Forschungsfragen, d. h. auf die Frage nach der grundsätzlichen Intensität der landschaftlichen Transformation, die sich aus dem Zweigrad-Ziel ergibt, auf die Quantifizierung des technologie-spezifischen Flächenverbrauches, auf den Zusammenhang mit den territorial-institutionellen Rahmenbedingungen sowie auf die Frage, an welchen Orten die räumlichen Veränderungen am größten wären.

Die Analysen zeigen grundsätzlich, dass es möglich ist, klimaneutrale Energiedienlandschaften rechtzeitig zu entwickeln. In Abhängigkeit von den zu Grunde liegenden Annahmen im Planungsrecht ergeben sich jedoch deutliche Unterschiede im Ausbau erneuerbarer Energien, wie im Folgenden zu sehen ist.

Szenario Basis: Das Basisszenario zeigt, dass sich der Schwerpunkt des Windenergieausbaus im Norden der Region befindet, wobei es mehrere räumliche Cluster gibt (vgl. Abb. 3). Der noch wesentlich konzentriertere Ausbau der Photovoltaik entfaltet sich hingegen vor allem im Süden. Insgesamt stehen 105 090 ha für den Ausbau zur Verfügung. Dabei entfallen 38 141 ha auf die Windenergie und 66 949 ha auf die Photovoltaik. Benötigt werden 5641 ha für die Windenergie und 4677 ha für die Photovoltaik. Dies entspricht 1,4 % bzw. 1,2 % der Fläche des Untersuchungsgebietes. Damit weicht der Flächenverbrauch der Transformation des Stromsektors nach unseren Modellierungen deutlich von den Werten ab, die Matthes et al. (2018:21) in ihrer Studie zur Regionalisierung der Energiewende für ganz Deutschland berechnet haben. Sie kommen bei der Windenergie

auf eine Flächeninanspruchnahme von insgesamt 1,7 % und bei der Photovoltaik von 0,2 % der Bundesfläche. Diese Unterschiede zu unserer Studie sind einerseits darauf zurückzuführen, dass wir bereits die inzwischen eingetretenen energiepolitischen Entwicklungen, wie die Verabschaffung des Bundes-Klimaschutzgesetzes und die Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2021, aufgegriffen haben. Andererseits liegt unseren Modellierungen eine wesentlich größere räumliche Genauigkeit zu Grunde, die auf den von uns angewandten GIS-gestützten Verfahren und unserer methodischen Konzeption beruht, die viele Geodaten in hoher räumlicher Auflösung miteinander kombiniert. Zweifelsohne spielt auch der Unterschied in der Größe der Untersuchungsregionen eine Rolle, da die natürlichen und rechtlichen Voraussetzungen für den Ausbau erneuerbarer Energien in der Planungsregion Augsburg nicht durchwegs vergleichbar sind mit den durchschnittlichen Bedingungen für ganz Deutschland.

Szenario Naturschutz: In diesem Szenario wird in einem ersten Schritt analysiert, wie sich eine Abschwächung des Naturschutzes auf die räumliche Diffusion erneuerbarer Energien auswirkt. Im Vergleich zum Basis-Szenario werden daher Vogelschutzgebiete, Naturschutzgebiete und Biosphärenreservate in die Energienlandschaften miteinbezogen. Nationalparke bleiben weiterhin ausgeschlossen. Gegenüber dem Basis-Szenario erhöht sich die prinzipiell zur Verfügung stehende Fläche bei der Windenergie um 315 ha (+0,8 %), bei der Photovoltaik um 8326 ha (+12 %). Insgesamt stehen 113 731 ha (+8 %) für den Ausbau zur Verfügung (Windenergie: 38 456 ha, PV: 75 275 ha). Benötigt werden 5641 ha für die Windenergie (±0 %) und 4677 ha für die Photovoltaik (±0 %). Es zeigt sich folglich, dass die Verringerung naturschutzbedingter Restriktionen zu keinen Veränderungen bei den tatsächlich benötigten Flächen gegenüber dem Basis-Szenario führt, da die ertragreichsten Standorte kaum mit den schützenswerten Räumen überlappen. Dies ist insofern bemerkenswert, als von den Befürworter:innen erneuerbarer Energien ein zu starker Naturschutz oftmals als Hemmnis für die Energiewende angesehen wird (Leibnath, 2014:126 ff.).

In einem zweiten Schritt wird modelliert, wie sich das räumliche Muster von Energienlandschaften verändert, wenn der Naturschutz ausgeweitet wird. Dieses Szenario trägt damit dem konfliktreichen Verhältnis zwischen Klimaschutz und Biodiversität Rechnung (Jackson, 2011). Dabei ist die Annahme, dass Naturparke und Landschaftsschutzgebiete nicht mehr für erneuerbare Energien zugänglich sind. Die räumlichen Veränderungen gegenüber dem Basis-Szenario sind eklatant (vgl. Abb. 4). So verändert sich nicht nur die Zusammensetzung der Windenergie-Cluster im Norden der Region, vielmehr entstehen im Süden, Osten und Westen vollkommen neue Areale der Windenergie. Der Schwerpunkt der Photovoltaik verlagert sich zudem stark in Richtung Osten. Insgesamt stehen nur noch 46 856 ha zur Verfügung, was einer Verringerung von 55 % entspricht (Windenergie: 18 859 ha = -51 %, PV: 27 997 ha = -58 %). Benötigt wer-

den 6121 ha für die Windenergie (+9 %) und 4693 ha für die Photovoltaik (+0,3 %). Das bedeutet, dass die Verschärfung des Naturschutzes speziell den Windenergieausbau in Richtung der ertragsschwächeren Standorte verdrängt, mit dem Ergebnis eines deutlich höheren Flächenkonsums. Ein erhöhter Naturschutz würde folglich insgesamt zu größeren landschaftlichen Eingriffen führen und damit in gewissem Sinne seine eigenen Ziele konterkarieren.

Szenario Energierecht: In diesem Szenario wird analysiert, was geschieht, wenn die von der Politik festgelegten Regelungen zu den Ausbaukorridoren und Abstandsflächen für Photovoltaik und Windenergie aufgehoben werden. Damit heben wir das grundlegende räumliche Prinzip der aktuellen Energiepolitik auf, die den Ausbau erneuerbarer Energien in Richtung der vorbelasteten Räume verschieben will. Dieses Prinzip steht einer sozial gerechten Energietransformation nach Bosch und Schmidt (2020:241) im Weg, da hierdurch nur diejenigen Orte technisiert werden, die bereits industriell geprägt und damit ökologisch vorbelastet sind. Cowell (2010:222) erkennt darin eine selektive, aus der Ferne gesteuerte Planungsrationale, die auf Basis weniger Umweltfaktoren sowie losgelöst von lokalen sozialen Kontexten „acceptable locations“ für erneuerbare Energien festlegt. Unsere Analysen sollen daher eine erste Grundlage zu der Frage liefern, welche räumlichen Implikationen mit einem Verzicht auf die Kategorie „vorbelasteter Raum“ einhergehen. Die räumlichen Veränderungen in diesem Szenario stellen sich im Vergleich zum Basis-Szenario wie folgt dar (vgl. Abb. 5): Insgesamt stehen 373 487 ha (+355 %) für den Ausbau zur Verfügung (Windenergie: 168 097 ha = +340 %, PV: 205 390 ha = +207 %). Für die konkrete Transformation werden 5319 ha für Windenergie (-6 %) und 4648 ha für Photovoltaik (-1 %) benötigt. Daraus folgt, dass ein Verzicht auf die Kategorie „vorbelasteter Raum“ insgesamt zu einem geringeren Flächenverbrauch führt und damit die Technisierung von Landschaft reduziert. Ein sozial gerechterer Ausbau wäre damit auch ökologisch verträglicher. Dennoch kommt es auch hier zu räumlichen Konzentrationen, jedoch bei der Photovoltaik diesmal vor allem im Süden der Region, wo die hohe Globalstrahlung der Solarstromproduktion hervorragende natürliche Voraussetzungen bietet. Im Unterschied zu den vorhergehenden Szenarien sind die Konzentrationszonen diesmal aber das Ergebnis natürlicher Voraussetzungen und nicht das Produkt einer institutionell legitimierten räumlichen Marginalisierung bestimmter Teilregionen.

Szenario Export: In diesem Szenario versorgt die Untersuchungsregion nicht nur sich selbst mit regenerativem Strom, sondern auch eine benachbarte Region. Daher muss der Ausbau von Windenergie und Photovoltaik erheblich ausgeweitet werden. An der prinzipiellen räumlich-technologischen Zweiteilung ändert sich aber wenig (vgl. Abb. 6). Insgesamt stehen 105 090 ha (±0 %) zur Verfügung (Windenergie: 38 141 ha, PV: 66 949 ha). Benötigt werden 8636 ha für die Windenergie (+52 %) und 8273 ha für die Photovoltaik.

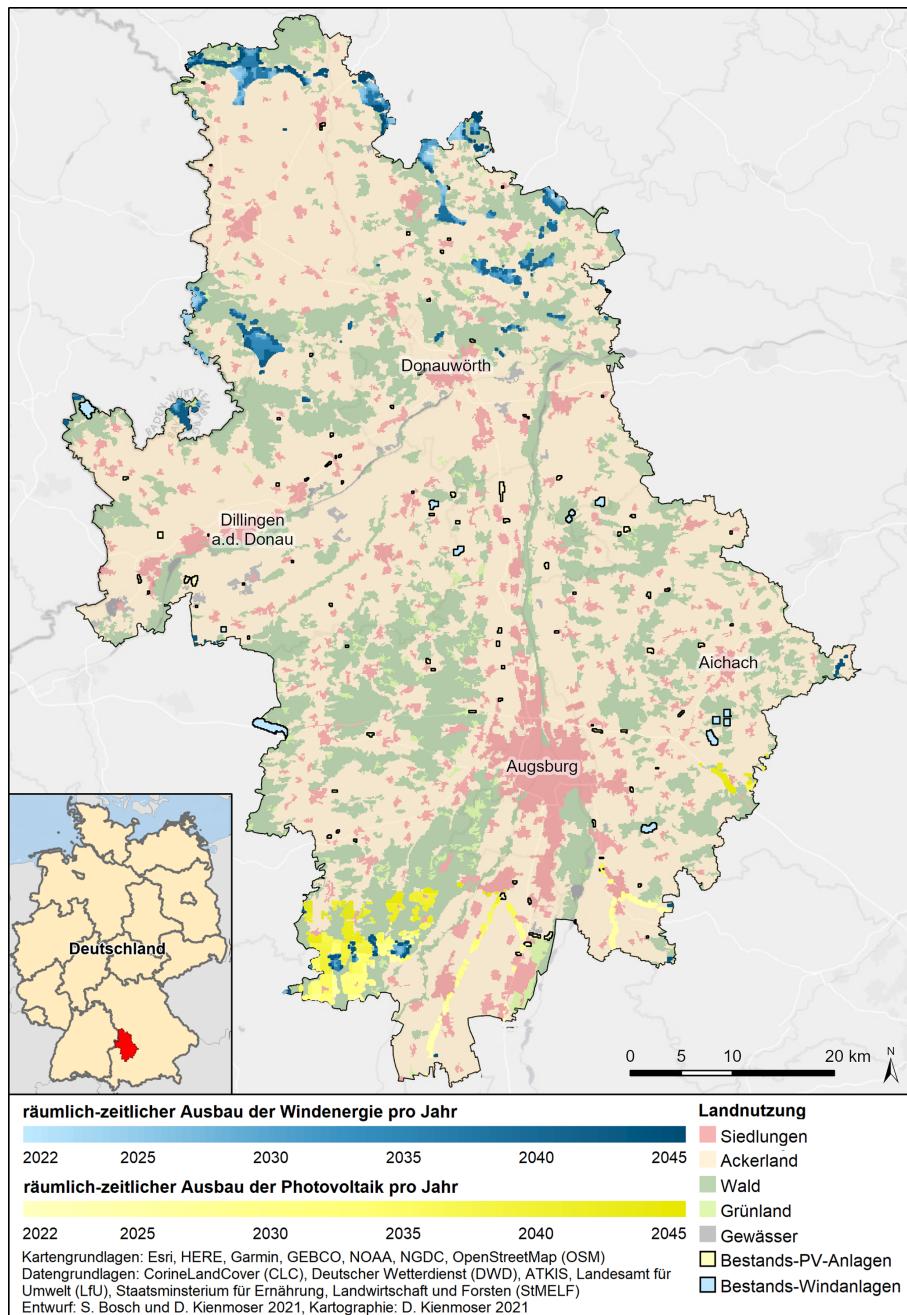


Abb. 3. Klimaneutrale Energielandschaft im Basis-Szenario.

taik (+76 %). Der Exportüberschuss geht folglich mit einem massiven landschaftlichen Eingriff einher.

Szenario Effizienz: Das Szenario offenbart, dass eine Erhöhung der installierten Leistung aller Windenergieanlagen um jeweils 1,5 MW zu einer Reduzierung des Flächenbedarfs um insgesamt 772 ha führt. Dies wirkt sich insbesondere auf den Norden der Region aus (vgl. Abb. 7). Für die Transformation werden nur noch 4864 ha für die Windenergie (−13 %) und 4220 ha für die Photovoltaik (−10 %) benötigt. Das be-

deutet, dass der technologische Fortschritt bei der Windenergie sich auch auf das Standortmuster der Photovoltaik auswirkt, da die Windenergie durch ihren geringeren Flächenbedarf Standorte mit einer hohen Globalstrahlung wieder für die Solarenergie freigibt. Hieraus folgt, dass technologische Weiterentwicklungen bei einzelnen erneuerbaren Energien das räumliche Muster der gesamten Energiewende verändern können.

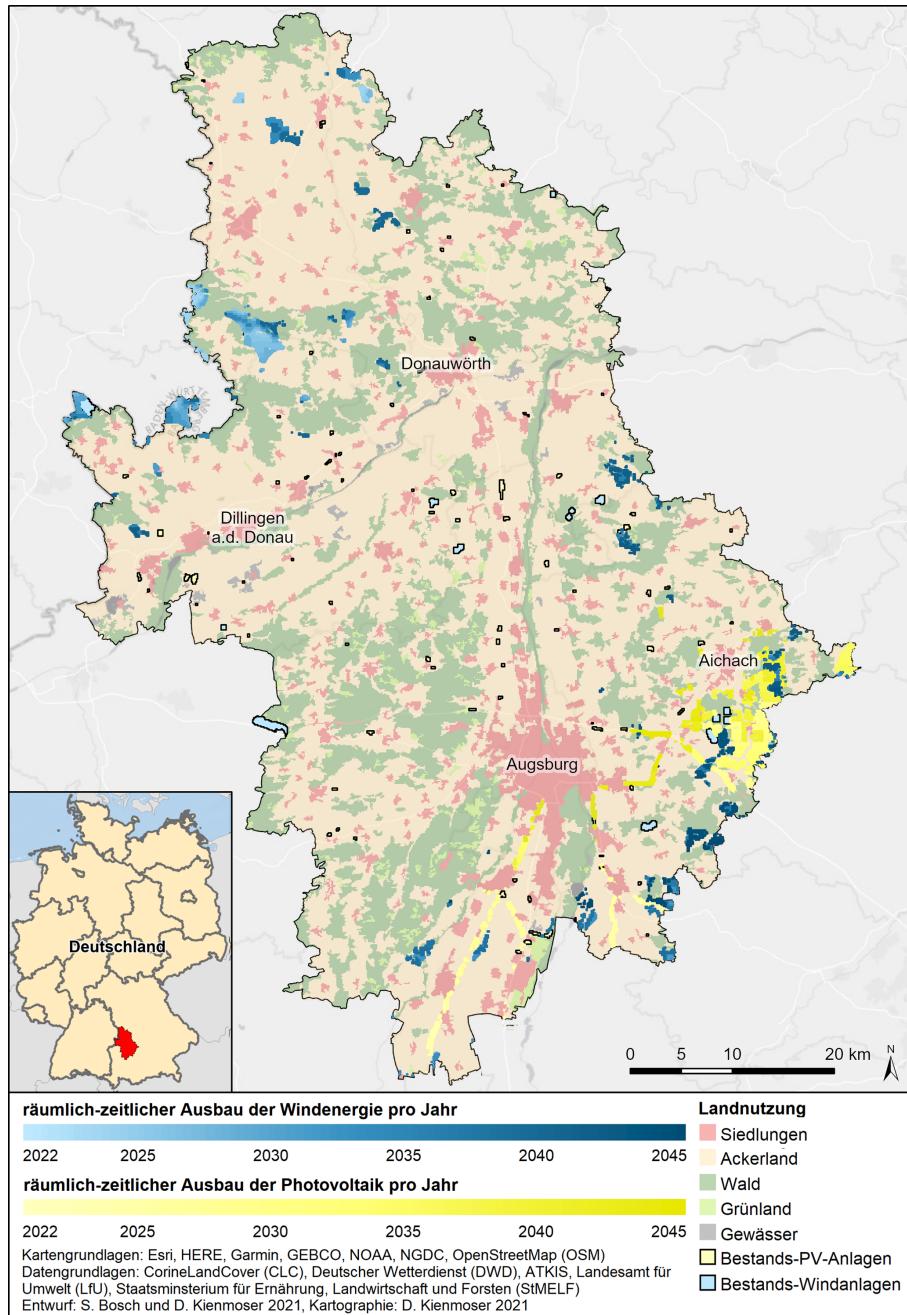


Abb. 4. Klimaneutrale Energielandschaft im Szenario Naturschutz.

5 Diskussion

5.1 Räumliche Auswirkungen und Übertragbarkeit

Grundsätzlich und mit Blick auf die ersten drei Forschungsfragen haben die Szenarien gezeigt, dass der Aufbau von klimaneutralen Energielandschaften zu erheblichen Veränderungen in der Landschaft und den zu Grunde liegenden Landnutzungsmustern führen kann. Dennoch gibt es bemerkenswerte Ausnahmen, die sich im Kontext der Variation der eta-

blierten Bewertungs- und Deutungsmuster zur Flächennutzung gezeigt haben: Überraschenderweise führt die Aufweichung der Naturschutzbestimmungen zu keinen Veränderungen im Vergleich zum Basis-Szenario, was von besonderem Interesse ist, da die räumliche Konkurrenz zwischen Klima- und Naturschutz als ein wesentliches Hindernis auf dem Weg zu einer kohlenstoffneutralen Gesellschaft gesehen wird. Dass die nachhaltige Energieerzeugung in unserem Szenario so wenig mit den Zielen des Natur- und Artenschutzes kolli-

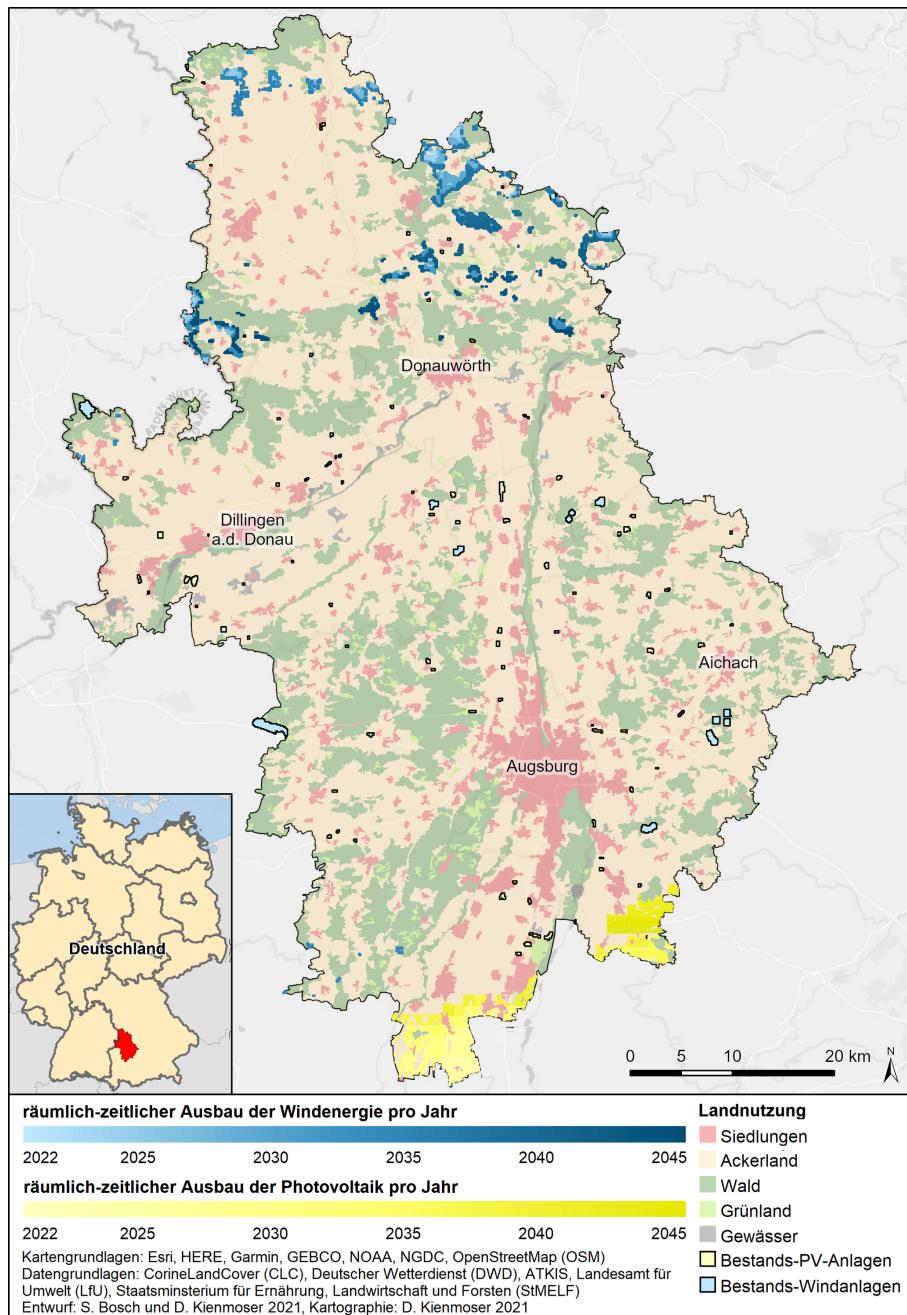


Abb. 5. Klimaneutrale Energielandschaft im Szenario Energierecht.

diert, liegt an den spezifischen Landnutzungsbedingungen in der Region Augsburg, wo die produktivsten Standorte überwiegend außerhalb von Schutzgebieten liegen. Der bestehende rechtliche Rahmen für den Naturschutz bietet somit ausreichende räumliche Möglichkeiten für die Energiewende. Diese Erkenntnis ist jedoch nicht unbedingt auf andere Regionen übertragbar, in denen die Schutzgebiete möglicherweise umfangreicher sind. Diese regionale Fallstudie entkräftet jedoch die Argumente jener Akteur:innen, die im

Natur- und Artenschutz eine wesentliche Blockade der Energiewende sehen. In diesem Sinne eröffnet uns eine konstruktivistische Perspektive die Gelegenheit, undifferenzierte Vorstellungen von einer optimalen Flächennutzung zu erkennen und zu entkräften.

Die zweite Variante des Naturschutzszenarios hat gezeigt, dass die Umsetzbarkeit von Klimaschutzstrategien in der Region erschwert wird, wenn der Naturschutz verstärkt wird. Windprojekte wären dann vor allem im Nordosten

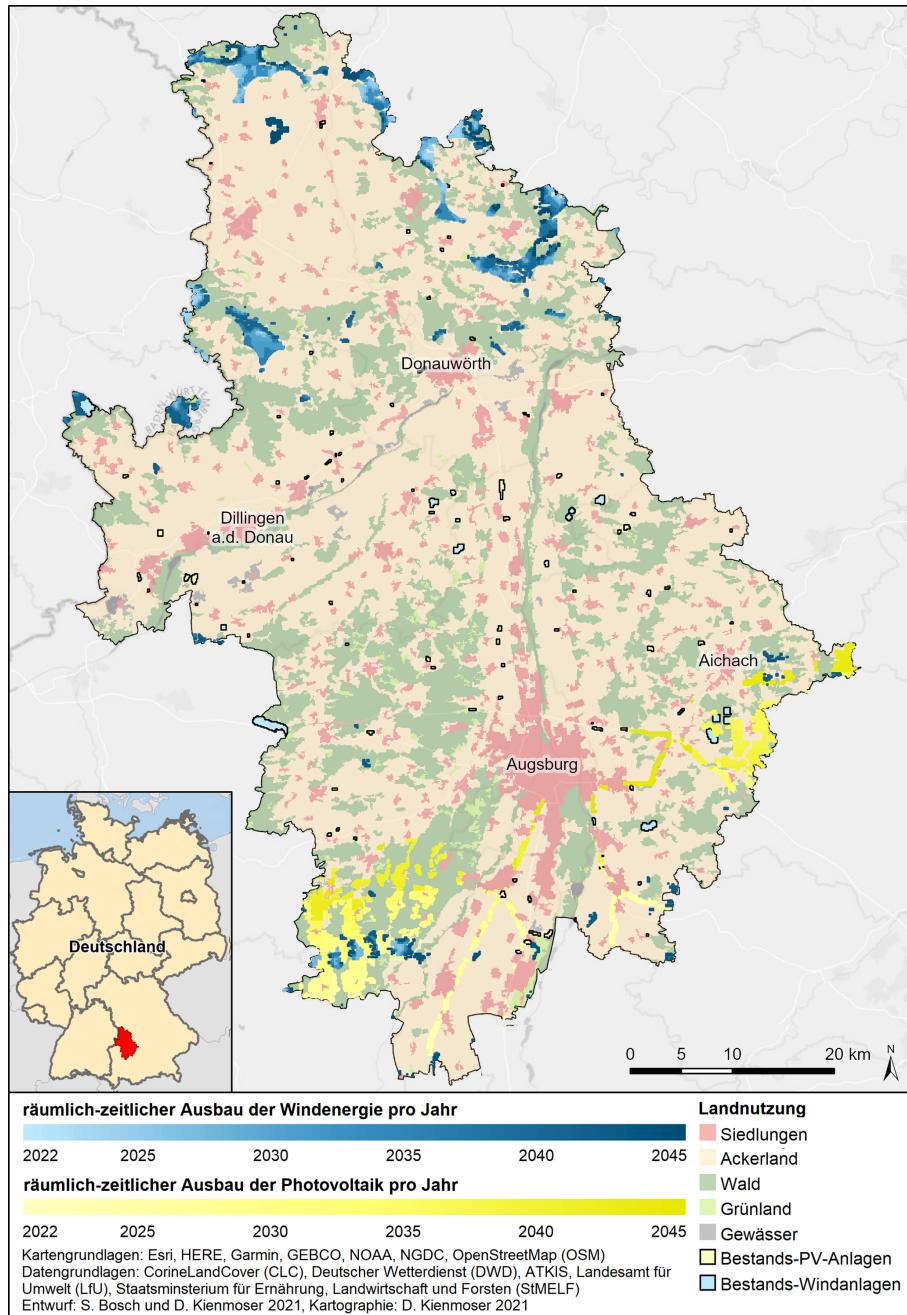


Abb. 6. Klimaneutrale Energielandschaft im Szenario Export.

der Region kaum noch möglich, so dass es zu einer räumlichen Verschiebung nach Nordwesten und teilweise nach Südosten kommen würde. Eine Stärkung des Naturschutzes sollte daher mit großer Sensibilität für die Auswirkungen auf die allgemeinen Landnutzungsmuster erfolgen. Inwie weit sich die gesellschaftlichen Diskurse in Richtung einer Lockerung oder Verschärfung des Naturschutzes bewegen, ist derzeit nicht absehbar. Klar ist, dass kontroverse Debatten aus der Unsicherheit resultieren, ob eine eher physiozen-

trische (Inglesi-Lotz, 2016) oder anthropozentrische (Jackson, 2011) Perspektive eingenommen werden soll bzw. ob es beim Widerstand gegen erneuerbare Energien um den Erhalt einer sauberen Umwelt oder um die Bewahrung menschlicher Errungenschaften der Landschaftskultur geht (Berr, 2018:63).

Ein Beispiel für einen massiven Einfluss veränderter Regelungen auf das räumliche Muster klimaneutraler Energielandschaften stellt die Zulassung von Photovoltaik auf land-

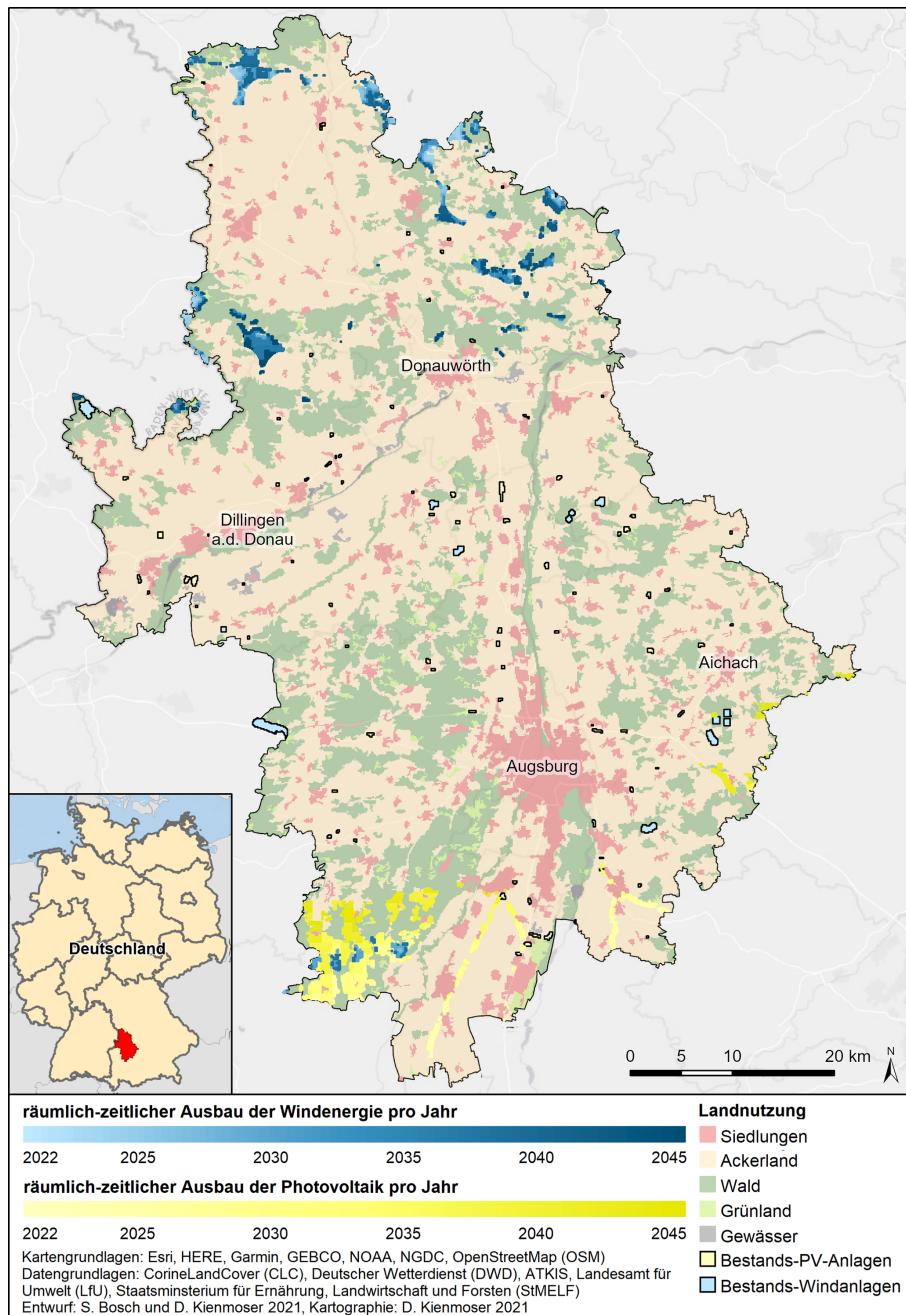


Abb. 7. Klimaneutrale Energielandschaft im Szenario Effizienz.

wirtschaftlichen Flächen dar (vgl. Szenario Energierecht): Fast der gesamte Ausbau würde sich in den Süden der Region verlagern, wo die sonnigsten Standorte zu finden sind. Diese Variante der Flächennutzung ist jedoch nur auf Regionen anwendbar, die sich durch eine ähnliche Ausstattung an landwirtschaftlich benachteiligten Flächen auszeichnen und deren Flächennutzungspolitik die Integration dieser Flächen in die Energiewende trotz der Flächenkonkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelindustrie ermöglicht. Derzeit ist

in Deutschland ein Trend zur verstärkten Einbindung von landwirtschaftlich benachteiligten Flächen in die Energiewende zu beobachten.

5.2 Methode – Gewichtung der Kriterien

Der Ausbau erneuerbarer Energien ist in allen Szenarien durch starke räumliche Konzentrationen und räumlich-technologische Polarisierungen gekennzeichnet, wobei die Windenergie ihren räumlichen Schwerpunkt im Norden und

die Photovoltaik im Süden der Region hat. Dies mag zumindest teilweise aus unserer Methode resultieren, die in erster Linie die ertragreichsten Standorte in das Ausbaukonzept einbezieht, um den Flächenverbrauch im Sinne der Ziele der Bundesregierung zur Steigerung der gesellschaftlichen Flächeneffizienz (UBA, 2021) möglichst gering zu halten. In einer weiteren Studie könnte dennoch untersucht werden, ob bei einer stärkeren Fokussierung der Regionalplanung auf einen ökologisch oder sozial verträglichen Ausbau erneuerbarer Energien suboptimale Stromerträge durch andere Kriterien (z. B. Umweltverträglichkeit, Akzeptanz, Landschaftsästhetik) überkompensiert werden könnten. Dies würde bedeuten, dass die ökonomisch besten Standorte nicht um jeden Preis vorrangig in die Etablierung einer klimaneutralen Gesellschaft einbezogen werden. Die stärkere Gewichtung sozialer oder ökologischer Kriterien (Rangordnungsgewichtung) muss jedoch auf Expert:innenwissen beruhen, das im Rahmen von Expert:inneninterviews mit lokalen Akteur:innen gewonnen werden sollte. Dies eröffnet Spielräume für qualitative Forschung.

Bekannt ist bereits, dass die Anlagenbetreiber:innen in der Region Augsburg bisher wenig Interesse an der wirtschaftlichen Optimierung von Energieprojekten zeigten (Bosch und Schwarz, 2019). Deshalb befinden sich die bestehenden Wind- und PV-Anlagen eher zwischen den mit unseren Modellen berechneten Ausbaupolen. Dieses unternehmerische Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass die ehemals üppige finanzielle Unterstützung über die EEG-Umlage, die vor allem die älteren Anlagen erfuhren und die allmählich durch Marktmechanismen ersetzt wurde, die Anlagenbetreiber:innen nicht dazu gezwungen hat, die rentabelsten Standorte zu wählen. Aus der Wirtschaftsgeographie ist bekannt, dass Unternehmer:innen trotz wirtschaftlichen Druckes oftmals ökonomisch suboptimale Standortentscheidungen treffen. Daher erscheint eine Gewichtung von Kriterien, die sich je nach Region an den spezifischen ökonomischen, ökologischen und sozialen Kontexten orientiert, plausibel.

Grundsätzlich ist dabei aber zu betonen, dass die tatsächlichen räumlichen Optionen erneuerbarer Energien vor allem an die spezifischen lokalen, regionalen und nationalen Machtverhältnisse geknüpft sind, die sich nur langsam und primär im Zuge wechselnder Regierungskoalitionen wandeln. Wie oben bereits erläutert wurde, sind die strikten territorial-institutionellen Rahmenbedingungen das Ergebnis gesellschaftlicher Machtasymmetrien, die nur schwer aufzubrechen sind. Selbst Naturschutzgebiete können hierbei zu einem sehr stabilen sozialen Konstrukt einer marktorientierten Raumplanung werden, wie Bridge et al. (2013:335) betonen. Die Gewichtung von Kriterien muss daher mit Blick auf die Realisierungswahrscheinlichkeiten von Energielandschaften aktuelle Machtstrukturen stets berücksichtigen.

5.3 Soziale Ausgewogenheit der Landnutzung

Welche Erfordernisse erwachsen aus den Erkenntnissen der Studie für eine stringente regionalpolitische Energiestrategie, die die Ziele im Klimaschutz rechtzeitig und konfliktarm umsetzen soll (vgl. Forschungsfrage 4)? Sollen soziale Belange stärker in den Vordergrund gerückt werden, so ist vor allem zu beachten, dass aufgrund der derzeitigen Landnutzungspolitik (Planungsrecht) nur ein Teil der Bevölkerung den klimaschutzbedingten Landschaftswandel zu tragen hat. Große Teile der Untersuchungsregion wären kaum betroffen. Dies könnte als eine Form der „Erneuerbare-Energien-(Un-)Gerechtigkeit“ (Pellegrini-Masini et al., 2020) angesehen werden, denn die soziale Balance und Akzeptanz der Energiewende, die die Grundlage für eine nachhaltige Entwicklung ist, erscheint als gefährdet, wenn bestimmte gesellschaftliche Gruppen durch die Standortentscheidungen der Energiewende räumlich und landschaftlich stärker belastet und marginalisiert werden. Auf die Kategorie „vorbelasteter Raum“, die im Kontext des Szenarios Energierecht explizit thematisiert wurde, sollte daher nach unserer Auffassung verzichtet werden. Nicht zuletzt haben die Analysen gezeigt, dass dies nicht nur aus sozialer Sicht ausgewogener wäre. Auch ökologische Vorteile würden damit einhergehen, da die Energietransformation in diesem Falle einen geringeren Flächenverbrauch verursachen würde.

Dieser Zusammenhang zwischen Sozialem und Ökologie deutet erneut auf den Wert der theoretischen Perspektive hin, die im Rahmen dieser Studie eingenommen wurde. Um eine nachhaltige Energietransformation ermöglichen zu können, sollten die „sozialen und ökologischen Wirklichkeiten“ einer großen Bandbreite an gesellschaftlichen Akteur:innen adressiert („recognition justice“) und vor allem die vom Ausbau der erneuerbaren Energien betroffenen Menschen an den Erträgen beteiligt („distributional justice“) oder mehr Möglichkeiten zur Partizipation an Standortentscheidungen („procedural justice“) generiert werden (vgl. auch Levenda et al., 2021). Auch partizipative Gestaltungsprozesse sollten in Betracht gezogen werden, wie z. B. partizipatives Kartieren von Energielandschaften (Stremke und Picchi, 2017). Dabei geht es um die Erfassung der tieferen Bedeutung von Orten für die jeweils lokale Bevölkerung und die Zuordnung von geeigneten Technologien zu bestimmten Ortsidentitäten. Es muss zudem darüber nachgedacht werden, wie das Planungsrecht überarbeitet werden kann, damit die technologischen Lasten des Transformationsprozesses gleichmäßiger und gerechter verteilt werden. Dies könnte nach unserer Einschätzung durch geringere Abstandsregelungen und gelockerte Restriktionen in denjenigen Teilregionen geschehen, in denen Infrastrukturmaßnahmen für die Energiewende nach dem derzeitigen Rechtsrahmen völlig ausgeschlossen sind. Hier ist an Schutzgebiete zu denken, in denen der Windenergieausbau bspw. aus Gründen des Vogelschutzes bislang verhindert wurde. Neueste Anlagentechniken mit Radargeräten können Vogelschwärme inzwischen orten und sich frühzeitig ab-

schalten (BfN, 2020), so dass dieser Flächennutzungskonflikt zumindest etwas minimiert und möglicherweise eine andere Region technologisch entlastet werden könnte, wenn Vogelschutzgebiete stärker in die Planungen zur Energiewende eingebunden werden.

Bei aller Kritik an der räumlichen Konzentration von erneuerbaren Energien ist jedoch auch darauf hinzuweisen, dass gerade die wirtschaftlich peripheren Regionen die Chance ergreifen könnten, als Exporteur:innen der Energiewende aufzutreten und durch den Ausbau regionale Wirtschaftskreisläufe zu stärken. Der rechtliche Rahmen der Flächennutzung sollte daher immer einen gewissen Spielraum lassen, innerhalb dessen eine Anpassung der Flächennutzung an lokale oder regionale Gegebenheiten möglich ist.

Erreicht werden könnte dies durch eine verstärkte Rekommunalisierung der Energieversorgung, mit dem Ziel, die öffentliche Kontrolle über das Energiesystem auf Basis der Gründung kommunaler oder städtischer Unternehmen zu stärken (Becker und Naumann, 2021:110f.). Aufgrund der Informationspflichten gegenüber Mitgliedern von Energiegenossenschaften und der Pflicht zur Veröffentlichung von Betriebskennzahlen und Strategien bei öffentlichen Stadtwerken würde sich die Transparenz der Standortplanung im Zuge der Rekommunalisierung erhöhen. Der Aufbau klimaneutraler Energielandschaften würde dabei über die verstärkte Einführung direktdemokratischer Entscheidungen eine größere gesellschaftliche Legitimation erfahren. Hier könnte der Wert unserer Studie zum Tragen kommen, wenn bspw. verschiedene Standortmuster bzw. energielandschaftliche Optionen diskutiert und mit Blick auf die angewandten Parameter transparent abgewogen werden. Verschiedene Akteur:innen können sich in unseren Szenarien wiederfinden und die Auswirkungen ihrer gruppenspezifischen Perspektive auf die Flächenakquise zur Energiewende besser nachvollziehen. Unsere Szenarien, die sicherlich noch erweiterbar sind, können insofern als ein ergebnisoffenes Zusammentragen unterschiedlicher soziotechnischer und sozioökologischer Perspektiven auf das Thema Energielandschaften verstanden werden. Der lokale oder regionale Kontext wird dann darüber entscheiden, welche Art von klimaneutraler Energielandschaft angestrebt und entwickelt wird. Machtasymmetrien und elitäres Wissen (vgl. Expertokratie) werden sicherlich auch dann noch eine Rolle spielen. Dennoch ist das gesellschaftliche Fundament einer rekommunalisierten und aus partizipativen Ansätzen bestehenden Energietransformation wesentlich breiter, als dies bei den derzeit noch vorherrschenden Top-down-Mechanismen der Fall ist.

6 Fazit

Grundsätzlich sind die klimapolitischen Ziele und Maßnahmen der Bundesregierung klar definiert (Klimaneutralität bis 2045, Ausstieg aus Kernenergie und Kohle) und erscheinen angesichts der immensen Herausforderungen des Klima-

wandels als angemessen. Dennoch muss betont werden, dass eine stärkere Reduktion der Kohlenstoffemissionen über die Forderungen des Bundes-Klimaschutzgesetzes hinaus wünschenswert ist. Immerhin geht der IPCC (2021:17f.) davon aus, dass mit einer drastischen Reduktion der Emissionen die globale Erwärmung auf 1,0–1,8 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden kann, wobei selbst bei maximalen Emissionsreduktionen ein vorübergehendes Überschreiten der 1,5 °C-Marke (ca. 2041–2060) sehr wahrscheinlich ist. Insofern gibt unsere Studie der Politik und Planung einen Rahmen vor, der als ein Minimum von Klimaschutzbemühungen verstanden werden sollte. Wie dringlich die Zeit ist, zeigen die Abbildungen 8 und 9, die unter Berücksichtigung der Kohlenstoffemissionen, die das Zwei-Grad-Ziel noch zulassen würden, prognostizieren, dass die CO₂-Budgets für das 1,5- und das 1,7 °C-Ziel bereits im Jahr 2026 bzw. 2030 überschritten werden.

Bei den Governance-Strategien wird deutlich, dass die Energiewende derzeit zwar noch von einer großen Vielfalt an Akteur:innen, wie Privatpersonen, Landwirt:innen, Kommunen, Regionalversorger:innen, Genossenschaften und Kapitalgesellschaften, vorangetrieben wird, die im Jahr 2017 etablierten Ausschreibungsverfahren jedoch für einen stärkeren Wettbewerb sorgen und so eher den Bedürfnissen der größeren Energiekonzerne Rechnung tragen (Ohlhorst, 2018:110f.). Wenngleich dadurch die Kosten der Transformation gesenkt werden, so besteht die Gefahr eines Akzeptanzverlustes, da kleinere Akteur:innen von den Entscheidungen und Renditen ausgeschlossen werden. Bei der weiteren Ausgestaltung des institutionellen Rahmens der Energiewende sollte daher darauf geachtet werden, die Interessen einer möglichst großen Bandbreite an Akteur:innen einzubinden. In den nationalen Vorgaben, die sich aus dem Erneuerbare-Energien-Gesetz und Bundes-Klimaschutzgesetz ergeben, ist hierzu wenig zu finden. Grundsätzlich eröffnen die föderativen Strukturen Deutschlands den einzelnen Bundesländern jedoch die Möglichkeit, den Ausbau erneuerbarer Energien besser an die lokalen und regionalen Kontexte anzupassen und akzeptanzfördernde Abweichungen von den nationalen Rahmenbedingungen (z. B. Abstandsflächen, Höhenbeschränkungen, Flächenrestriktionen) durchzusetzen. Energiegerechtigkeit, die in direktem Zusammenhang mit den Möglichkeiten der monetären und prozeduralen Teilhabe an den Klimaschutzmaßnahmen steht, ist eine zentrale Voraussetzung für die Akzeptanz der Energiewende. Dabei muss eingeräumt werden, dass eine Beteiligung Vieler auch immer die Gefahr von Opposition und Verzögerungen birgt. Umso wichtiger ist es, die notwendigen politischen Maßnahmen zu vermitteln und Konsense anzustreben. Dabei sollte die Politik darauf achten, dass die Energiegovernance nicht zu sehr von der Sorge um eine kostengünstige und stabile Energieversorgung getrieben wird. Das rechtspopulistische Narrativ von der „fehlgeleiteten, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie schädigenden Energiewende“ (Schreurs, 2020:113) erschwert dies.

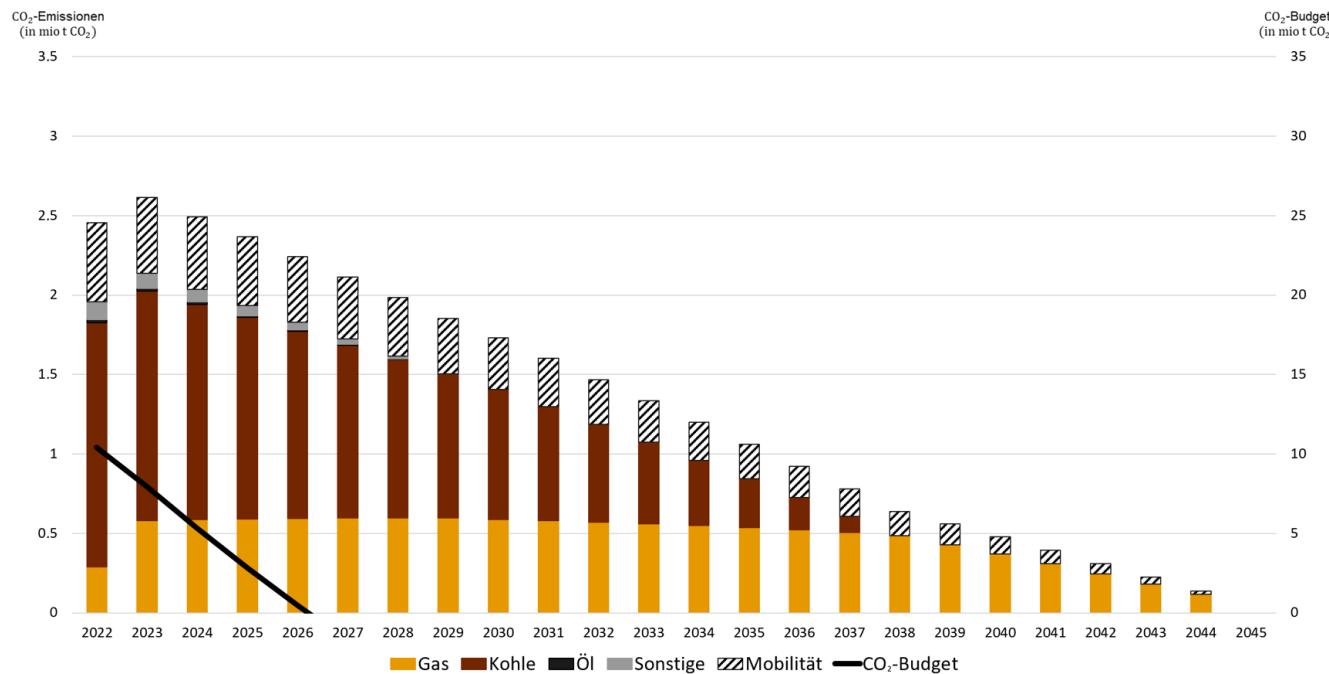


Abb. 8. Verbrauchsentwicklung des regionalen CO₂-Budgets nach dem 1,5-Grad-Ziel.

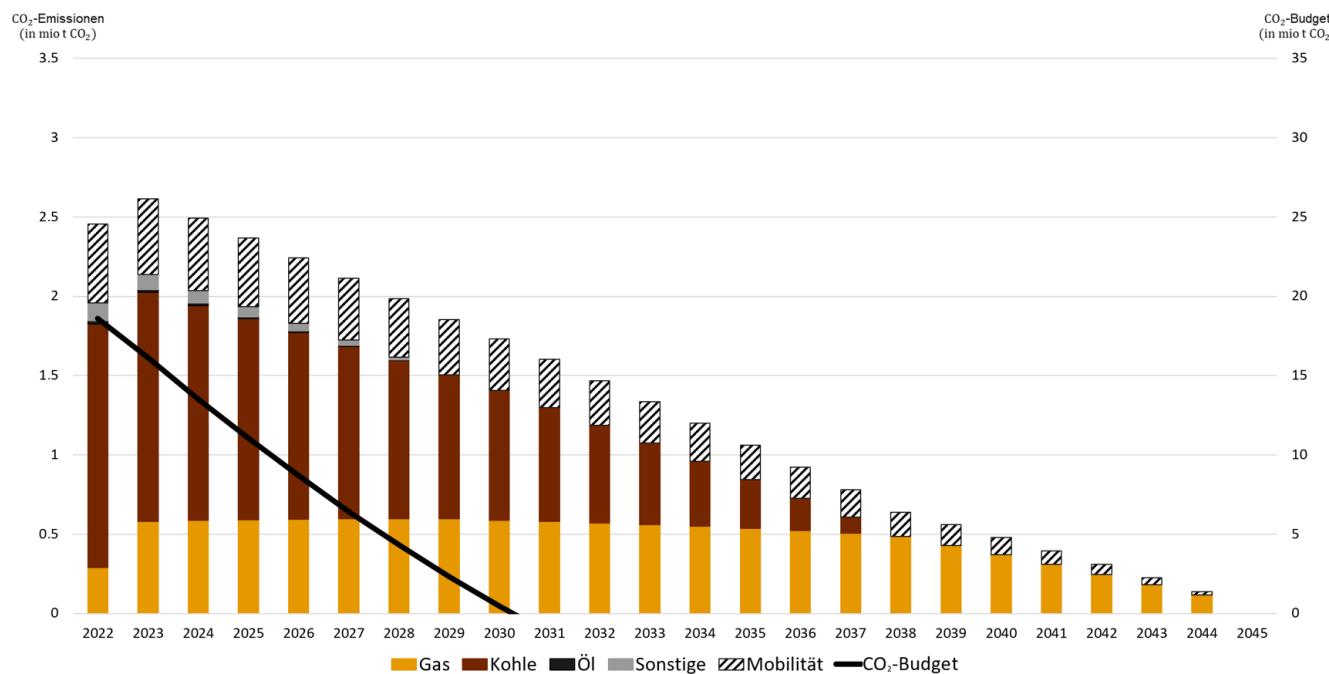


Abb. 9. Verbrauchsentwicklung des regionalen CO₂-Budgets nach dem 1,7-Grad-Ziel.

Abschließend ist festzuhalten, dass der rechtzeitige Aufbau einer klimaneutralen Energieversorgung möglich ist. Die planungsrechtlichen und gesetzlichen Grundlagen, die diesen Weg ebnen sollen, wurden jedoch nicht an die Erfordernisse einer nachhaltigen Entwicklung angepasst, die auch die soziale Ausgewogenheit von Energieinfrastrukturen adres-

siert. Eine konstruktivistische Perspektive hilft dabei, der sozialen Komplexität, die einer umfassenden Transformation zu Grunde liegt, besser gerecht zu werden. Hierdurch können unterschiedliche *Energiezukünfte* im Sinne eines transparenten Bottom-up-Prozesses ergründet und der Politik und Planung beratend zur Seite gestellt werden.

Datenverfügbarkeit. Die Datensätze, die der Studie zu Grunde liegen, sind beim korrespondierenden Autor auf Anfrage erhältlich.

Autor:innenmitwirkung. SB und DK haben die Studie konzipiert und erarbeitet. SB entwickelte den theoretischen Bezug des Themas und recherchierte die Literatur. Darüber hinaus verfassten SB und DK den Text und überarbeiteten das Manuskript. SB und DK haben das Manuskript gelesen und genehmigt.

Interessenkonflikt. Die Autor*innen erklären, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Haftungsausschluss. Anmerkung des Verlags: Copernicus Publications bleibt in Bezug auf gerichtliche Ansprüche in veröffentlichten Karten und institutionellen Zugehörigkeiten neutral.

Danksagung. Wir bedanken uns bei der Editorin Frau Hanna Hilbrandt und bei den anonymen Reviewern, die uns dabei geholfen haben, die Qualität des Aufsatzes sukzessive zu steigern.

Begutachtung. This paper was edited by Hanna Hilbrandt and reviewed by two anonymous referees.

Literatur

- Becker, S. und Naumann, M.: Energiedemokratie: Beteiligung und Mitbestimmung in der Energieversorgung, in: Energiegeographie: Konzepte und Herausforderungen, Herausgeber: Becker, S., Klagge, B., und Naumann, M., Eugen Ulmer/UTB, Stuttgart, 107–117, ISBN 9783825253202, 2021.
- Berger, P. L. und Luckmann, T.: Die gesellschaftliche Konstruktion der Wirklichkeit, in: 23. Auflage, S. Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt a. Main, ISBN 978-3-596-26623-4, 2010.
- Berr, K.: Ethische Aspekte der Energiewende, in: Bausteine der Energiewende, Herausgeber: Kühne, O. und Weber, F., Springer Verlag, Wiesbaden, 57–74, ISBN 978-3-658-19509-0, 2018.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz: Neue Publikation zu Radar- und Kamerasystemen zur Vermeidung von Vogelkollisionen an Windenergieanlagen, <https://www.natur-und-erneuerbare.de/aktuelles/details/neue-publikation-zu-radar-und-kamerasystemen-zur-vermeidung> (letzter Zugriff: 19. Juli 2022), 2020.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz: Kartendienst „Schutzgebiete in Deutschland“, <https://www.bfn.de/themen/biologische-vielfalt/nationale-strategie/projekt-des-monats/archiv/kartendienst-schutzgebiete-in-deutschland.html>, letzter Zugriff: 6. Juli 2021.
- Bickerstaff, K.: Geographies of energy justice: concepts, challenges and an emerging agenda, in: Handbook on the Geographies of Energy, edited by: Solomon, B. D. and Calvert, K. E., Edward Elgar, Cheltenham, Northampton, 438–449, <https://doi.org/10.4337/9781785365621.00043>, 2017.
- Blaschke, T., Biberacher, M., Gadocha, S., and Schardinger, I.: ‘Energy landscapes’: Meeting energy demands and human aspirations, *Biomass Bioenergy*, 55, 3–16, 2013.
- BMJV – Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Raumordnungsgesetz, https://www.gesetze-im-internet.de/rog_2008/ (letzter Zugriff: 11. Juli 2022), 2008.
- BMJV – Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Baugesetzbuch, <https://www.gesetze-im-internet.de/bbaug/> (letzter Zugriff: 11. Juli 2022), 2017a.
- BMJV – Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2017), http://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf (letzter Zugriff: 11. Juli 2022), 2017b.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Lesefassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 mit markierten Änderungen zur Fassung von 2019, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ksg_aendg_2021_3_bf.pdf, letzter Zugriff: 2. September 2021.
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz), <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Service/kohleausstiegsgesetz.html> (letzter Zugriff: 14. Oktober 2021), 2020.
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., and Finnveden, G.: Scenario types and techniques: Towards a user’s guide, *Futures*, 38, 723–739, 2006.
- Bosch, S.: Räumliche Steuerung von Erneuerbare-Energie-Anlagen: Planungsrecht, Wirtschaftlichkeit, Landschaftsästhetik und Partizipation, in: Energiegeographie: Konzepte und Herausforderungen, Herausgeber: Becker, S., Klagge, B., und Naumann, M., Eugen Ulmer/UTB, Stuttgart, 159–170, ISBN 9783825253202, 2021.
- Bosch, S. und Kienmoser, D.: Räumliche Differenzierung der Beiträge erneuerbarer Energien zur Einhaltung des Klimaabkommens von Paris mittels GIS, in: *Journal für Angewandte Geoinformatik* 7, Herausgeber: Strobl, J., Zagel, B., Griesebner, G., und Blaschke, T., Wichmann-Verlag, Offenbach a. Main, 9–19, ISBN 978-3-87907-707-6, 2021.
- Bosch, S. and Rathmann, J.: Deployment of Renewable Energies in Germany: Spatial Principles and their Practical Implications Based on a GIS-Tool, *Adv. Geosci.*, 45, 115–123, <https://doi.org/10.5194/adgeo-45-115-2018>, 2018.
- Bosch, S. and Schmidt, M.: Ungerechte Energienlandschaften – die Produktion von Raum im Kontext der Transformation des deutschen Energiesystems, *Geogr. Helv.*, 75, 235–251, <https://doi.org/10.5194/gh-75-235-2020>, 2020.
- Bosch, S. and Schwarz, L.: The energy transition from plant operators, perspective – a behaviorist approach, *Sustainability*, 11, 1621, <https://doi.org/10.3390/su11061621>, 2019.
- Bosch, S., Rathmann, J., and Simetsreiter, F.: Raumverträglicher Ausbau von erneuerbaren Energien – ein alternativer Standortplanungsansatz für eine nachhaltige Energiewende, *Geogr. Helv.*, 71, 29–45, <https://doi.org/10.5194/gh-71-29-2016>, 2016.
- Bouzarovski, S. and Simcock, N.: Spatializing energy justice, *Energy Policy*, 107, 640–648, 2017.

- Bremen, L. V. und Wessel, A.: Kurzfrist-Windleistungsvorhersage, promet – Meteorologische Aspekte der Nutzung erneuerbarer Energien, 39, 181–192, 2015.
- Bridge, G.: The map is not the territory: A sympathetic critique of energy research's spatial turn, *Energ. Res. Social Sci.*, 36, 11–20, 2018.
- Bridge, G., Barr, S., Bouzarovski, S., Bradshaw, M., Brown, M., Bulkeley, H., and Walker, G.: *Energy and Society. A Critical Perspective*, Routledge, New York, ISBN 9780415740746, 2018.
- Bruns, D. und Kühne, O.: Landschaft im Diskurs. Konstruktivistische Landschaftstheorie als Perspektive für künftigen Umgang mit Landschaft, *Naturschutz Landschaftspl.*, 45, 83–88, 2013.
- Calvert, K., Greer, K., and Maddison-MacFadyen, M.: Theorizing energy landscapes for energy transition management: Insights from a socioecological history of energy transition in Bermuda, *Geoforum*, 102, 191–201, 2019.
- Copernicus: CORINE Land Cover, <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> (letzter Zugriff: 5. August 2021), 2018.
- Cowell, R.: Wind power, landscape and strategic, spatial planning – The construction of acceptable locations in Wales, *Land Use Policy*, 27, 222–232, 2010.
- Dewald, U., Grunwald, A., Poganietz, W.-R., und Schippl, J.: Die Energiewende als sozio-technische Transformation – Von der Analyse zur Gestaltung, in: *Energiewende. Eine sozialwissenschaftliche Einführung*, Herausgeber: Radtke, J. und Canzler, W., Springer VS, Wiesbaden, 319–352, ISBN 978-3-658-26326-3, 2019.
- Diaz-Bone, R.: Die interpretative Analytik als methodologische Position, in: *Foucault: Diskursanalyse der Politik. Eine Einführung*, Herausgeber: Kerchner, B. und Schneider, S., Springer VS, Wiesbaden, 68–84, ISBN 978-3-531-15240-0, 2006.
- Emeis, S.: Windphänomene in der atmosphärischen Grenzschicht, die die Nutzung der Windenergie entscheidend beeinflussen, promet – Meteorologische Aspekte der Nutzung erneuerbarer Energien, 39, 151–162, 2015.
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Bakker, D. C. E., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Anthoni, P., Barbero, L., Bastos, A., Bastrikov, V., Becker, M., Bopp, L., Buitenhuis, E., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Currie, K. I., Feely, R. A., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkrizalis, T., Goll, D. S., Gruber, N., Gutekunst, S., Harris, I., Haverd, V., Houghton, R. A., Hurt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Joetzjer, E., Kaplan, J. O., Kato, E., Klein Goldeijk, K., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Marland, G., McGuire, P. C., Melton, J. R., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoaka, S.-I., Neill, C., Omar, A. M., Ono, T., Pergon, A., Pierrot, D., Poulet, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Séférian, R., Schwinger, J., Smith, N., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Werf, G. R., Wiltshire, A. J., and Zaehle, S.: Global Carbon Budget 2019, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1783–1838, <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>, 2019.
- Fuchs, C.: Henri Lefebvre's theory of the production of space and the critical theory of communication, *Commun. Theory*, 29, 129–150, 2019.
- Geels, F. W.: The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms, *Environ. Innov. Societ. Trans.*, 1, 24–40, 2011.
- Haas, T.: Energiearmut als neues Konfliktfeld in der Stromwende, in: *Energie und soziale Ungleichheit*, Herausgeber: Großmann, K., Springer Verlag, Wiesbaden, 377–402, ISBN 978-3-658-11723-8, 2017.
- Hake, J.-F., Fischer, W., Venghaus, S., and Weckenbrock, C.: The German Energiewende – History and status quo, *Energy*, 92, 532–546, 2015.
- Häußling, R.: *Techniksoziologie. Eine Einführung*, Verlag Barbara Budrich, Opladen, Toronto, ISBN 9783825250799, 2019.
- Heinemann, D. und Lorenz, E.: Vorhersage der Solarstrahlung und der Solarstromerzeugung, promet – Meteorologische Aspekte der Nutzung erneuerbarer Energien, 39, 219–231, 2015.
- Inglesi-Lotz, R.: The impact of renewable energy consumption to economic growth: A panel data application, *Energ. Econ.*, 53, 58–63, 2016.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change: *Climate Change 2021*, in: *The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf, letzter Zugriff: 26. August 2021.
- Jackson, A. L. R.: Renewable energy vs. Biodiversity: Policy conflicts and the future of nature conservation, *Global Environ. Change*, 21, 1195–1208, 2011.
- Jenkins, K., McCauley, D., Heffron, R., Stephan, H., and Rehner, R.: Energy justice: A conceptual review, *Energ. Res. Social Sci.*, 11, 174–182, 2016.
- Job, H., Woltering, M., Warner, B., Heiland, S., Jedicke, E., Meyer, P., Nienaber, B., Plieninger, T., Pütz, M., Rannow, S., und v. Ruschkowski, E.: Biodiversität und nachhaltige Landnutzung in Großschutzgebieten, *Raumforsch. Raumordn.*, 74, 481–494, 2016.
- Konrad-Adenauer-Stiftung: The perception of Germany's 'Energiewende' in emerging countries. Results of qualitative interviews on Germany's transformation of the energy system in Brazil, China and South Africa, https://www.kas.de/c/document_library/get_file?uuid=184f2e11-6da9-5e7f-b5ac-f0ee7c4f87fe&groupId=252038 (letzter Zugriff: 2. September 2021), 2013.
- Kühne, O.: Sozialkonstruktivistische Landschaftstheorie, in: *Handbuch Landschaft*, Herausgeber: Kühne, O., Weber, F., Berr, K., und Jenal, C., Springer VS, Wiesbaden, 69–79, ISBN 978-3-658-25745-3, 2019.
- Kungl, G.: Stewards or sticklers for change? Incumbent energy providers and the politics of the german energy transition, *Energ. Res. Social Sci.*, 8, 13–23, 2015.
- LDBV – Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung: ATKIS – Amtliches Digitales Basis-Landschaftsmodell, <https://www.ldbv.bayern.de/produkte/atkis-basis-dlm.html> (letzter Zugriff: 16. August 2021), 2018.
- Lefebvre, H.: *The production of space*, Blackwell, Malden, ISBN 978-0-631-18177-4, 1991.
- Leibnath, M.: Landschaft im Diskurs: Welche Landschaft? Welcher Diskurs? Praktische Implikationen eines alternativen Entwurfs konstruktivistischer Landschaftsforschung, *Naturschutz Landschaftspl.*, 46, 124–129, 2014.
- Levenda, A. M., Behrsin, I., and Disano, F.: Renewable energy for whom? A global systematic review of the environmental justice

- implications of renewable technologies, *Energ. Res. Social Sci.*, 71, 101837, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101837>, 2021.
- Matthes, F. C., Flachsbart, F., Loreck, C., Hermann, H., Falkenberg, H., und Cook, V.: Zukunft Stromsystem II – Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stromsystem-II-Regionalisierung-der-erneuerbaren-> (letzter Zugriff: 26. November 2021), 2018.
- Mengelkamp, H.-T.: Wind-, Ertrags- und Erlösgutachten für Windkraftanlagen, promet – Meteorologische Aspekte der Nutzung erneuerbarer Energien, 39, 193–202, 2015.
- Müller, R.: Solarstrahlung aus Satellitendaten, promet – Meteorologische Aspekte der Nutzung erneuerbarer Energien, 39, 203–218, 2015.
- Mulvaney, D.: Geographies of solar power, in: *Handbook on the Geographies of Energy*, edited by: Solomon, B. D. and Calvert, K. E., Edward Elgar, Cheltenham, Northampton, 148–162, ISBN 978 1 78536 561 4, 2017.
- Ohlhorst, D.: Akteursvielfalt und Bürgerbeteiligung im Kontext der Energiewende in Deutschland: das EEG und seine Reform, in: *Handbuch Energiewende und Partizipation*, Herausgeber: Holsenkamp, L. und Radtke, J., Springer Verlag, Wiesbaden, 101–124, ISBN 978-3-658-09416-4, 2018.
- Pasqualetti, M. J. and Stremke, S.: Energy landscapes in a crowded world: A first typology of origins and expressions, *Energ. Res. Social Sci.*, 36, 94–105, 2018.
- Paul, F. C.: Deep entanglements: History, space and (energy) struggle in the German Energiewende, *Geoforum*, 91, 1–9, 2018.
- Pellegrini-Masini, G., Pirni, A., and Maran, S.: Energy justice revisited: A critical review on the philosophical and political origins of equality, *Energ. Res. Social Sci.*, 59, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101310>, 2020.
- Praetorius, B.: Grundlagen der Energiepolitik, in: *Energiewende. Eine sozialwissenschaftliche Einführung*, Herausgeber: Radtke, J. und Canzler, W., Springer VS, Wiesbaden, 29–68, ISBN 978-3-658-26327-0, 2019.
- Raupach, M. R., Davis, S. J., Peters, G. P., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jotzo, F., Van Vuuren, D. P., and Le Quéré, C.: Sharing a quota on cumulative carbon emissions, *Nat. Clim. Change*, 10, 873–879, 2014.
- Rohde, F. und Quitzow, L.: Digitale Energiezukünfte und ihre Wirkungsmacht. Visionen der smarten Energieversorgung zwischen Technikoptimismus und Nachhaltigkeit, in: *In digitaler Gesellschaft. Neukonfiguration zwischen Robotern, Algorithmen und Usern*, Herausgeber: Braun, K. und Kropp, C., transcript Verlag, Bielefeld, 189–211, ISBN 978-3-8376-5453-0, 2021.
- Schöbel, S.: Windenergie und Landschaftsästhetik. Zur landschaftsgerechten Anordnung von Windfarmen, Berlin, ISBN 978-3-86859-150-7, 2012.
- Schreurs, M. A.: Competing perspectives on energy transition: a global comparison, *Z. Politikwissensch.*, 30, 113–121, 2020.
- Schweiger, S., Kamlage, J.-H., und Engler, S.: Ästhetik und Akzeptanz. Welche Geschichten könnten Energienlandschaften erzählen?, in: *Bausteine der Energiewende*, Herausgeber: Kühne, O. und Weber, F., Springer VS, Wiesbaden, 431–446, ISBN 978-3-658-19509-0, 2018.
- Selk, V., Kemmerzell, J., und Radtke, J.: In der Demokratiefalle? Probleme der Energiewende zwischen Expertokratie, partizipativer Governance und populistischer Reaktion, in: *Energiewende in Zeiten des Populismus*, Herausgeber: Radtke, J., Canzler, W., Schreurs, M., und Wurster, S., Springer VS, Wiesbaden, 31–66, ISBN 978-3-658-26103-0, 2019.
- Shao, M., Han, Z., Sun, J., Xiao, C., Zhang, S., and Zhao, Y.: A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection, *Renew. Energy*, 157, 377–403, 2020.
- Simonis, G.: *Handbuch Globale Klimapolitik*, UTB-Verlag, Paderborn, ISBN 9783825286729, 2017.
- Statista: 10 Länder verursachen zwei Dritteln der CO₂-Emissionen, <https://de.statista.com/infografik/23383/anteil-der-laender-an-den-weltweiten-co2-emissionen/> (letzter Zugriff: 14. Juli 2022), 2020.
- Statista: CO₂-Emissionen weltweit in den Jahren 1960 bis 2019, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37187/umfrage/der-weltweite-co2-ausstoss-seit-1751/> (letzter Zugriff: 29. September 2021), 2021.
- Statista: Ausstoß von CO₂-Emissionen durch Stromkraftwerke nach Kraftwerkstyp, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38910/umfrage/hoehe-der-co2-emissionen-nach-kraftwerk/>, letzter Zugriff: 29. November 2022a.
- Statista: Statistiken zur Weltbevölkerung, https://de.statista.com/themen/75/weltbevoelkerung/#topicHeader_wrapper, letzter Zugriff: 14. Juli 2022b.
- Statistisches Bundesamt: Bevölkerungsstand: Amtliche Einwohnerzahl Deutschlands 2021, https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/_inhalt.html, letzter Zugriff: 14. Juli 2022.
- Stenzel, T. and Frenzel, A.: Regulating technological change – The strategic reactions of utility companies towards subsidy policies in the German, Spanish and UK electricity markets, *Energy Policy*, 36, 2645–2657, 2008.
- StMELF – Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: Benachteiligte Gebiete in Bayern, <https://www.stmelf.bayern.de/agrarpolitik/foerderung/211365/>, letzter Zugriff: 9. August 2021.
- StMWi – Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie: Bayerisches Aktionsprogramm Energie, https://www.stmwii.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwii/Publikationen/2019/2019-11-27_AktionsprogrammEnergie.pdf (letzter Zugriff: 29. September 2021), 2019.
- StMWi – Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie: Energie-Atlas Bayern, <https://www.energieatlas.bayern.de/service/impressum.html>, letzter Zugriff: 14. Juli 2021.
- Storch, L.: Warum Bayern den Gasmangel mehr fürchtet, <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/energie-infrastruktur-sueddeutschland-101.html>, letzter Zugriff: 19. Oktober 2022.
- Stratmann, K. und Kersting, S.: Kanzler Scholz greift durch und verlängert die Laufzeiten für alle drei Atomkraftwerke, *Handelsblatt* vom 17.10.2022, <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/akw-laufzeiten-kanzler-scholz-greift-durch-und-verlaengert-die/>, letzter Zugriff: 19. Oktober 2022.
- Stremke, S.: Energy transition at the regional scale: building sustainable energy landscapes, in: *Infrastructure Space*, edited by: Ruby, I. and Ruby, A., Ruby Press, Berlin, 217–228, ISBN 978-3-944074-18-4, 2017.

- Stremke, S. and Picchi, P.: Co-designing energy landscapes: application of participatory mapping and Geographic Information Systems in the exploration of low carbon futures, in: *Handbook on the Geographies of Energy*, edited by: Solomon, B. D. and Calvert, K. E., Edward Elgar, Cheltenham, Northhampton, 368–379, ISBN 978 1 78536 561 4, 2017.
- UBA – Umweltbundesamt: Siedlungs- und Verkehrsfläche, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-landoekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsflaeche#anhaltender-flachenverbrauch-fur-siedlungs-und->, letzter Zugriff: 23. August 2021.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change: Paris Agreement, https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (letzter Zugriff: 7. September 2021), 2015.
- Valdes, J., Poque González, A. B., Ramirez Camargo, L., Valin Fenández, M., Masip Macia, Y., and Dorner, W.: Industry, flexibility, and demand response: Applying German energy transition lessons in Chile, *Energ. Res. Social Sci.*, 54, 12–25, 2019.
- Van der Horst, D.: Energy landscapes of less than two degrees global warming, in: *Handbook on the Geographies of Energy*, edited by: Solomon, B. D. and Calvert, K. E., Edward Elgar, Cheltenham, Northhampton, 251–264, ISBN 978 1 78536 561 4, 2017.
- Van Veelen, B. and Haggett, C.: Uncommon ground: the role of different place attachments in explaining community renewable energy projects, *Sociologia Ruralis*, 57, 533–554, 2016.
- Van Veelen, B. and Van der Horst, D.: What is energy democracy? Connecting social science energy research and political theory, *Energ. Res. Social Sci.*, 46, 19–28, 2018.
- Weber, F. und Kühne, O.: Essentialistische Landschafts- und positivistische Raumforschung, in: *Handbuch Landschaft*, Herausgeber: Kühne, O., Weber, F., Berr, K., und Jenal, C., Springer VS, Wiesbaden, 57–68, ISBN 978-3-658-25746-0, 2019.
- Xiao, N. and Murray, A. T.: Spatial optimization for land acquisition problems: A review of models, solution methods, and GIS support, *Trans. GIS* 23, 645–671, 2019.
- Zaspel-Heisters, B.: Welcher Raum bleibt für den Ausbau der Windenergie? Analyse des bundesweiten Flächenpotenzials in Deutschland, in: *Informationen zur Raumentwicklung* 6, Herausgeber: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bonn, 543–569, <https://d-nb.info/1155024982/34#page=37> (letzter Zugriff: 29. November 2022), 2015.