Räumliche Differenzierung der Beiträge erneuerbarer Energien zur Einhaltung des Klimaabkommens von Paris mittels GIS

Spatial Differentiation of Renewable Energies for the Ratification of the Paris Agreement Using GIS

Stephan Bosch[1], Dominik Kienmoser[1]

[1]Universität Augsburg · stephan.bosch@geo.uni-augsburg.de

Zusammenfassung: Die potenziellen räumlich-zeitlichen Muster des Ausbaus erneuerbarer Energien, die den internationalen Klimaschutzzielen Rechnung tragen, wurden in ihrer landschaftlichen Komplexität weder analysiert noch visualisiert. Mittels GIS gilt es daher eine regionale Energielandschaft zu modellieren, die in Bezug auf die regionalen Treibhausgasemissionen den Zielsetzungen der UN-Klimakonferenz von Paris Rechnung trägt. Die Analysen offenbaren, dass eine stringente Orientierung der Energiewende an den Klimaschutzzielen die ländlichen Räume zum Teil stark technisieren und ökologisch sowie sozial erheblich transformieren würde.

Schlüsselwörter: Energielandschaften, Energiewende, Modellierung, Flächennutzungskonflikte

Abstract: *The potential spatio-temporal patterns of renewable energies, which take into account international climate protection strategies, were neither analysed nor exactly visualised in their landscape complexity. Based on a GIS, we therefore want to model a regional energy landscape that corresponds to the objectives of the UN Climate Conference of Paris in terms of its regional greenhouse gas balance in the electricity sector. The analyses reveal that a strict orientation of the energy transition towards climate protection goals would strongly mechanise rural areas and significantly transform them ecologically and socially.*

Keywords: *Energy landscapes, energy transition, modelling, land use conflicts*

1 Einleitung

Auf der Pariser Klimakonferenz einigten sich die Politiker darauf, die Erderwärmung unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau halten zu wollen (UN, 2015). Angesichts von 43 Gt CO_2-Emissionen pro Jahr weltweit sowie eines CO_2-Budgets von 1.083 Gt müssen entsprechende Maßnahmen rasch umgesetzt werden (MCC, 2020). Bezogen auf die Bevölkerungszahl stand Deutschland zu Beginn von 2019 ein CO_2-Budget von 7,3 Gt (1,75 °C Erwärmung) zur Verfügung, das bei einer linearen Emissionsreduktion von jährlich 6 % bis 2035 aufgebraucht wäre (Rahmstorf, 2019). Auf diesem Weg befindet sich Deutschland jedoch nicht: Obwohl der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung bereits 46,1 % beträgt (ISE, 2020), war das jährlich zur Verfügung stehende CO_2-Budget in den letzten Jahren stets Ende März aufgebraucht. Demnach muss der Anteil erneuerbarer Energien erheblich gesteigert werden. Die Regierung hat deshalb den Klimaschutzplan 2050 entwickelt, in dem eine Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 80-95 % anvisiert wird (BMU, 2017). Mit dem Klimaschutzprogramm 2030 wurde konkretisiert, auf welchen Maßnahmen Deutschlands Beitrag zum Klimaschutz beruhen wird (Bundesregierung, 2019).

AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik, 7-2021, S. 9-19. © Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach. ISBN 978-3-87907-707-6, ISSN 2364-9283, eISSN 2509-713X, doi:10.14627/537707002.
Dieser Beitrag ist ein Open-Access-Beitrag, der unter den Bedingungen und unter den Auflagen der Creative Commons Attribution Lizenz verbreitet wird (http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/).

Zentral ist dabei die Transformation der Energiewirtschaft, denn diese beinhaltet den kontinuierlichen Ausbau erneuerbarer Energien (Anteil am Stromverbrauch 2030 bei 65 %). Wie dies angesichts der begrenzten Landressourcen gelingen kann, ist jedoch ungewiss. Klar ist, dass aufgrund des großen Flächenbedarfs erneuerbarer Energien, der konkurrierenden Flächennutzungen, der wenigen restriktionsfreien Standorte, der geringen Akzeptanz und der Unwägbarkeiten bei räumlich-rechtlichen Rahmenbedingungen – vgl. Bosch (2020) – es als wenig zielführend erscheint, einen nationalen Klimabeitrag zu formulieren, ohne dabei zugleich entsprechende Flächenkulissen zu Energielandschaften zu erstellen, die die politischen Ziele in ihren potenziellen räumlichen Dimensionen abbilden. Daher plädiert van d. Horst (2017) für die Modellierung von Energielandschaften, die das Versprechen, die Erderwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen, einlösen können.

Wenn jedoch Szenarien zu den räumlichen Möglichkeiten eines klimaneutralen Energiesektors erstellt werden sollen, dann ist aus raumtheoretischer Perspektive zu bedenken, dass die hierbei zu modellierenden Energielandschaften nicht auf Basis neutraler gesetzlich-institutioneller Voraussetzungen entstehen. Zu sehr schon haben sich kapitalistische Prinzipien in die planerischen Grundlagen der Gestaltung von Landschaften eingeschnitten, als dass räumliche Modellierungen diese umgehen könnten (Bosch & Schmidt, 2020). Daraus folgt, dass die potenziellen klimaneutralen Energielandschaften als räumliches Ergebnis einer marktwirtschaftlich dominierten Welt zu verstehen sind. Zimmerer (2017, pp. 465 ff.) erklärt hierzu, dass Energiesysteme immer mit wirtschaftlicher und technologischer Macht verbunden sind und neoliberale Wirtschaftsweisen, die Landschaften auf einen Produktionsfaktor reduzieren, dominieren. Innerhalb dieser Logik sind Standorte, die bereits unter technologischen Eingriffen und ökologischer Degradierung gelitten haben, die Hauptstandorte für erneuerbare Energien (Cowell et al., 2012). Bickerstaff (2017, p. 439) bezeichnet dies als Peripherisierung. Bridge et al. (2018, p. 176) bestätigen, dass jede Energielandschaft Gewinner und Verlierer hervorbringt. Nach dem theoretischen Ansatz von Lefebvre (1991), 'Die Produktion des Raumes', findet die Domianz kapitalistischer Akteure ihren Ausdruck im 'konzipierten Raum'. Dieser wird von machtvollen Personen erdacht, konstruiert und durchgesetzt, indem erwünschte territorialen Strukturen über den Aufbau entsprechender Institutionen und Rechtsnormen (z. B. Landnutzungsrechte, Raumordnung, Erneuerbare-Energien-Gesetz) Legitimierung erfahren und so die 'gelebten Räume' der Anwohner erneuerbarer Energien, die mit wenig Macht ausgestattet sind, überformen.

Vor dem Hintergrund der gegenwärtigen räumlichen Planungsgrundlagen wollen wir daher analysieren, mit welchen sozialen Qualitäten und räumlichen Quantitäten an Energielandschaften zu rechnen wäre, wenn im Stromsektor ein regionaler Beitrag zur Begrenzung der Erderwärmung geleistet werden soll. Hierzu soll der Ausbau erneuerbarer Energien an das Klimaschutzabkommen von Paris geknüpft und jene potenziellen räumlichen Ausbreitungsmuster modelliert werden, die es ermöglichen, die Erderwärmung auf unter 2 °C einzudämmen. Unter Berücksichtigung der natürlichen Standortvoraussetzungen von Windenergie und Photovoltaik sowie in Abstimmung mit konkurrierenden Flächennutzungen soll der Stromsektor beispielhaft in der Planungsregion Augsburg spätestens dann klimaneutral sein, wenn das regionale CO_2-Budget noch nicht überschritten ist. Zudem gilt es zu analysieren, welche energielandschaftlichen Optionen sich ergeben, wenn die räumlichen Restriktionen in den Modellierungen variabel gehalten werden. So kann ergründet werden, inwieweit eine bestimmte Art der Landnutzung die Klimaschutzziele beeinträchtigt und inwiefern alternative Ausschlusskriterien sozial ausgewogenere Standortmuster hervorbringen.

2 Methodik

Das methodische Vorgehen wird in die vier Säulen „Erfassung“, „Modellierung“, „Analyse“ und „Präsentation“ gegliedert (Bill, 2016, pp. 36 ff.). Um die Modellierungen durchführen zu können, müssen folglich in einem ersten Schritt die benötigten Sach- und Geodaten akquiriert und aufbereitet werden. Im Fokus stehen die Kennzahlen des Energiesystems der zu untersuchenden Region, wie Stromverbrauch und Bevölkerungszahl, Anteile fossiler und regenerativer Energieträger am Energiemix, CO_2-Emissionen des Strom-, Wärme- und Kraftstoffsektors, technologiespezifische CO_2-Emissionen, Anlagentechnik sowie die Anlagenkataster erneuerbarer Energien aus dem Energieatlas Bayern (StMWi, 2020). Zudem werden Daten zu den natürlichen Standortfaktoren (Deutscher Wetterdienst), zur Energieinfrastruktur (Bundesnetzagentur und Netzbetreiber) und zur räumlichen Verteilung von Landnutzungsklassen benötigt. Letzteres basiert auf dem CORINE Land-Cover-Datensatz (Copernicus, 2018), der die Erdoberfläche in 44 Landnutzungsklassen unterteilt und die Möglichkeit gibt zu definieren, auf welchen Flächen erneuerbare Energien nicht zulässig sind. Diese Restriktionen sollen im Rahmen von Szenarien variabel gehalten werden, um ergründen zu können, inwiefern Änderungen in den räumlichen Vorgaben einen alternativen Ausbau eines CO_2-neutralen Stromsektors erlauben. Für die Modellierung der naturschutzrechtlichen Restriktionen werden die Vektordaten zu den Schutzgebietskategorien des Bundesamtes für Naturschutz herangezogen (BfN, 2020). Des Weiteren werden Daten zu Hangneigungen und Hangexpositionen auf Basis des Digitalen Geländemodells des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) der Bayerischen Vermessungsverwaltung (LDBV, 2018), mit einer Gitterweite von 50 m (DGM50), integriert. Hierdurch können Hangneigungen von mehr als 10 Grad für PV-Freiflächenanlagen ausgeschlossen werden, da die Rentabilität auf diesen Standorten wegen erhöhter Installationskosten zu gering wäre. Darüber hinaus werden bei Standorten mit Hangneigungen zwischen 5 und 10 Grad die südlich exponierten gegenüber den nördlich exponierten Hängen bevorzugt. Flachere Hänge werden als ebene Flächen modelliert. Schließlich ist zu beachten, dass bei PV-Anlagen jeweils eine ökologische Ausgleichsfläche in der Größe von 30 % der Modulfläche auszuweisen ist. Zudem ist nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz die Photovoltaik entlang von Autobahnen und Bahntrassen nur innerhalb eines 110 m-Korridors zulässig. Die entsprechenden Linienvektordaten zur Bestimmung der Verkehrs-Korridore stammen aus dem ATKIS der Bayerischen Vermessungsverwaltung (LDBV, 2018). In landwirtschaftlich benachteiligten Gebieten dürfen zudem pro Jahr nicht mehr als 70 PV-Anlagen installiert werden. Hierzu werden die gemarkungsscharfen Vektordaten zu den landwirtschaftlich benachteiligten Gebieten, die das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten zur Verfügung stellt, verwendet (StMELF, 2020). Für die Windenergie wurde die für Bayern relevante 10 H-Regelung berücksichtigt, die besagt, dass Windkraftanlagen den 10-fachen Anlagenabstand zu Siedlungen einzuhalten haben. Steilere Hänge als 10 Grad wurden auch bei Windprojektierungen aus Gründen überhöhter Installationskosten ausgeschlossen.

Nach der Datenaufbereitung wird die Untersuchungsregion in Rasterzellen mit einer Auflösung von 100 m unterteilt, wobei für jede Rasterzelle folgende Informationen vorliegen: Landnutzungsart, technologiespezifische Restriktionen, Erschließbarkeit und Stromertrag je EE-Anlage. Zu Letzterem ist zu bemerken, dass die Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe in m/s und die am Boden eintreffende Globalstrahlung in kWh/m^2 festgehalten werden. Diese Daten liegen grundsätzlich in einem 200-m-Raster vor und werden für die Analysen durch Interpolierung in ein 100-m-Raster konvertiert. Für die räumlichen Modellierungen zur

Windenergie wird das Anlagensystem Enercon E-138 EP3, mit einer installierten Leistung von 3,5 MW, eingesetzt. Bei der Photovoltaik handelt es sich um das von Hanwha Q.Cells entwickelte Anlagensystem (Q.Plus BFR-G4.1.), mit einer Kapazität von 285 Wp.

Den größten Teil der methodischen Vorgehensweise nehmen die Modellierungen und Analysen zu den Energielandschaften ein. Mittels eines GIS-gestützten Ansatzes sollen dabei jene räumlichen Muster identifiziert werden, die es entsprechend den Vereinbarungen von Paris (UN, 2015) ermöglichen, die globale Erwärmung auf weniger als 2 °C zu begrenzen. Unter Berücksichtigung der natürlichen Standortfaktoren von Windenergie und Photovoltaik sowie im Einklang mit konkurrierenden Landnutzungen soll der Stromsektor der Planungsregion Augsburg spätestens dann klimaneutral sein, wenn das regionale CO_2-Budget gerade noch nicht überschritten ist. Basierend auf einer linearen Modellierung von 2020 bis 2070 ist die räumliche Diffusion erneuerbarer Energien dabei an die Geschwindigkeit des Ausstiegs aus der fossilen Stromerzeugung gekoppelt. Zeitlich begrenzend wirkt das regionale CO_2-Budget. Daher wird das globale CO_2-Budget (1.083 Gt) in ein Pro-Kopf-Budget bezogen auf die Weltbevölkerung (129,5 t pro Kopf) umgerechnet. Ausgehend von der Bevölkerungszahl der Region Augsburg (903.487) wird so das regionale CO_2-Budget abgeleitet (= 126 Mt). Vom regionalen Gesamtbudget der noch zulässigen Emissionen werden dann die Emissionsanteile des Wärme- und Kraftstoffsektors abgezogen, sodass das CO_2-Budget des Stromsektors verbleibt (=39 Mt). Die Modellierung der räumlichen Diffusion erneuerbarer Energien läuft nun folgendermaßen ab: Wenn die Strommenge aus der fossilen Stromerzeugung durch den Rückbau reduziert wird, werden die restriktionsfreien Standorte so lange mit erneuerbaren Energien aufgefüllt, bis die Stromlücke geschlossen ist. Dieser Ausgleichsmechanismus findet in jährlichen Schritten statt. Für jede Rasterzelle setzt sich im Wettbewerb diejenige Energiequelle durch, die am jeweiligen Standort den höchsten Stromertrag liefert und für die es keine räumlichen Restriktionen (z. B. Naturschutz) gibt. In den Folgejahren wird dieser Prozess so lange wiederholt, bis der Stromsektor klimaneutral ist. Da die Region Augsburg bereits 50 % ihres Stroms aus regenerativen Quellen bezieht, von denen Photovoltaik, Biogas und Wasserkraft die wichtigsten sind, muss der Ausbau nur noch die Hälfte des regionalen Strombedarfs decken. Wir gehen jedoch davon aus, dass es aufgrund des Ausbaus der Elektromobilität zu einer Steigerung des Strombedarfs um 15 % kommen wird. Diese zusätzliche Menge wird daher zum gegenwärtigen Strombedarf addiert. Da das Potenzial der Wasserkraft bereits ausgeschöpft ist und der Energiepflanzenbau politisch nicht erwünscht ist, konzentriert sich die Studie auf Windenergie und Photovoltaik. Die Substitution fossil-nuklearer Kraftwerke erfolgt dabei zu gleichen Teilen durch Windenergie und Photovoltaik, denn im Falle eines offenen Wettbewerbs würde sich der Schwerpunkt des Ausbaus auf die Photovoltaik verlagern, da die Region hierfür bessere natürliche Voraussetzungen liefert. Im Hinblick auf Netzstabilität erscheint es jedoch sinnvoll, eine Abstimmung der wetterabhängigen Technologien anzustreben. Hierbei ist anzumerken, dass wir bei der Modellierung von Wind- und Solarpotenzialen aus Gründen der Komplexitätsreduktion von standortbezogenen Durchschnittswerten ausgehen. Die Volatilitäten von Wind und Sonne, die bei der Standortbewertung zweifelsohne eine große Rolle spielen, werden dadurch ausgeklammert. Mit Blick auf die Weiterentwicklung von Speichertechnologien, die den intermittierenden Charakter von erneuerbaren Energien ausgleichen können, wird dieser Aspekt jedoch mittelfristig an Bedeutung verlieren.

Die softwaretechnische Grundlage bei der Modellierung von Energielandschaften bildet die Programmiersprache Python, denn mittels der Python-Bibliothek *ArcGIS Python API* können sämtliche GIS-Werkzeuge von *ArcGIS Pro* problemlos mit der Programmiersprache Python

verknüpft und darauf basierend komplexe Geo-Visualisierungen sowie ein umfangreiches Geodaten-Management betrieben werden. *ArcGIS* gewährt damit die Möglichkeit, eigene Modelle und Programme mit den GIS-Tools zu kombinieren und sie dadurch zu modifizieren und weiter zu entwickeln. Python-Befehle und Python-Skripte können dabei sowohl direkt in *ArcGIS Pro* als auch in einer externen Entwicklungsumgebung ausgeführt werden (GI Geoinformatik, 2018, pp. 287 ff.).

3 Ergebnisse

Referenzszenario: In diesem Szenario wird untersucht, inwieweit klimaneutrale Energielandschaften realisierbar sind, wenn die derzeitigen gesellschaftlichen Rahmenbedingungen stabil gehalten werden. Dies betrifft Abstandsregelungen, planungsrechtliche Grundlagen, Anlagentechnik sowie räumliche Restriktionen. Ausschlussgebiete für erneuerbare Energien sind im Referenzszenario Nationalparke, Biosphärenreservate und Naturschutzgebiete. Hinzu kommen Vogelschutzgebiete als Restriktionsgebiete für die Windenergie. Die Analyse zeigt (Abb. 1), dass sich der Schwerpunkt der Windenergie im Norden der Region befindet, wobei es mehrere räumliche Cluster gibt. Der noch wesentlich konzentriertere Ausbau der Photovoltaik entfaltet sich v. a. im Süden von Augsburg. Insgesamt stehen 120.367 ha für den Ausbau zur Verfügung (Windenergie: 44.934 ha, PV: 75.433 ha). Benötigt werden 5.337 ha für die Windenergie und 4.235 ha für die Photovoltaik.

Szenario Naturschutz: In diesem Szenario wird in einem ersten Schritt analysiert, wie sich eine Anpassung des Natur- bzw. Landschaftsschutzes an die Erfordernisse des Klimaschutzes auf die räumliche Diffusion erneuerbarer Energien auswirkt. Im Vergleich zum Referenzszenario werden daher Vogelschutzgebiete, Naturschutzgebiete und Biosphärenreservate in die Energielandschaften miteinbezogen (*Szenario Naturschutz minus*). Nationalparke bleiben weiterhin ausgeschlossen. Gegenüber dem Referenzszenario erhöht sich die prinzipiell zur Verfügung stehende Fläche bei der Windenergie um 433 ha, bei der Photovoltaik um 9.480 ha. Insgesamt stehen 130.280 ha für den Ausbau zur Verfügung (Windenergie: 45.367 ha, PV: 84.913 ha). Benötigt werden 5.337 ha für die Windenergie und 4.235 ha für die Photovoltaik. Es zeigt sich, dass die Verringerung naturschutzbedingter Restriktionen zu keinen Veränderungen bei den tatsächlich benötigten Flächen gegenüber dem Referenzszenario führt, da die ertragreichsten Standorte kaum mit den schützenswerten Räumen überlappen. In Regionen mit einer größeren Dichte an Schutzgebieten könnten die Richtlinien zum Naturschutz jedoch durchaus den Aufbau eines klimaneutralen Stromsektors blockieren.

In einem zweiten Schritt wird modelliert, wie sich das räumliche Muster von Energielandschaften verändert, wenn der Natur- bzw. Landschaftsschutz ausgeweitet wird (*Szenario Naturschutz plus*). Dabei ist die Annahme, dass Naturparke und Landschaftsschutzgebiete nicht mehr für erneuerbare Energien zugänglich sind. Die räumlichen Veränderungen gegenüber dem Referenzszenario sind enorm (Abb. 2): So verändert sich nicht nur die Zusammensetzung der Windenergie-Cluster im Norden der Region, vielmehr entstehen im Süden, Osten und Westen der Region neue Ausbauschwerpunkte der Windenergie. Der Schwerpunkt der Photovoltaik verlagert sich vollständig in Richtung Osten. Insgesamt stehen 54.545 ha zur Verfügung (Windenergie: 22.801 ha, PV: 31.744 ha). Benötigt werden 5.767 ha für die Windenergie und 4.250 ha für die Photovoltaik.

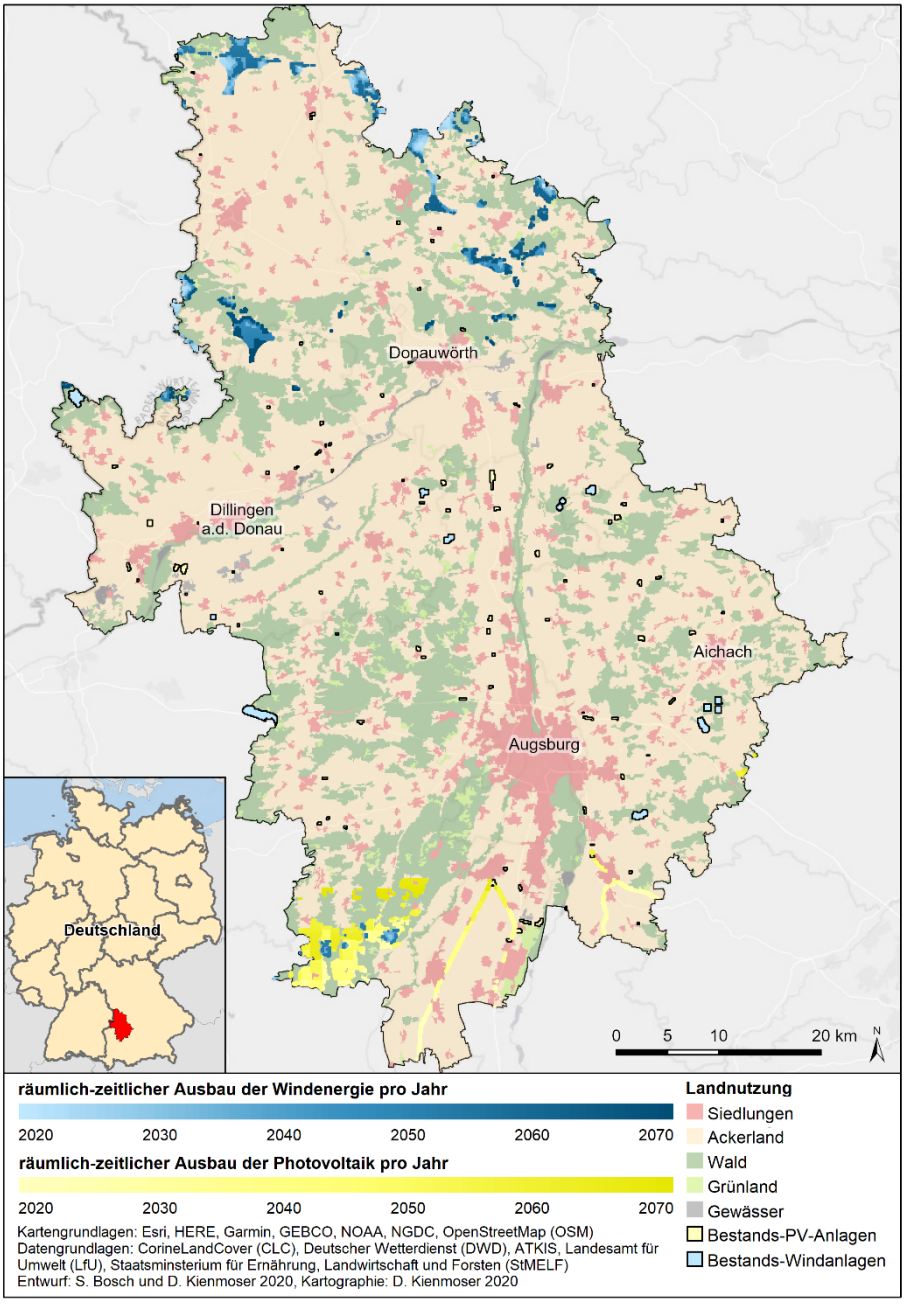

Abb. 1: Räumliche Diffusion von EE im Referenzszenario – starke räumlich-technologische Polarisierung mit Windenergie-Ausbau im Norden und PV-Ausbau im Süden der Region

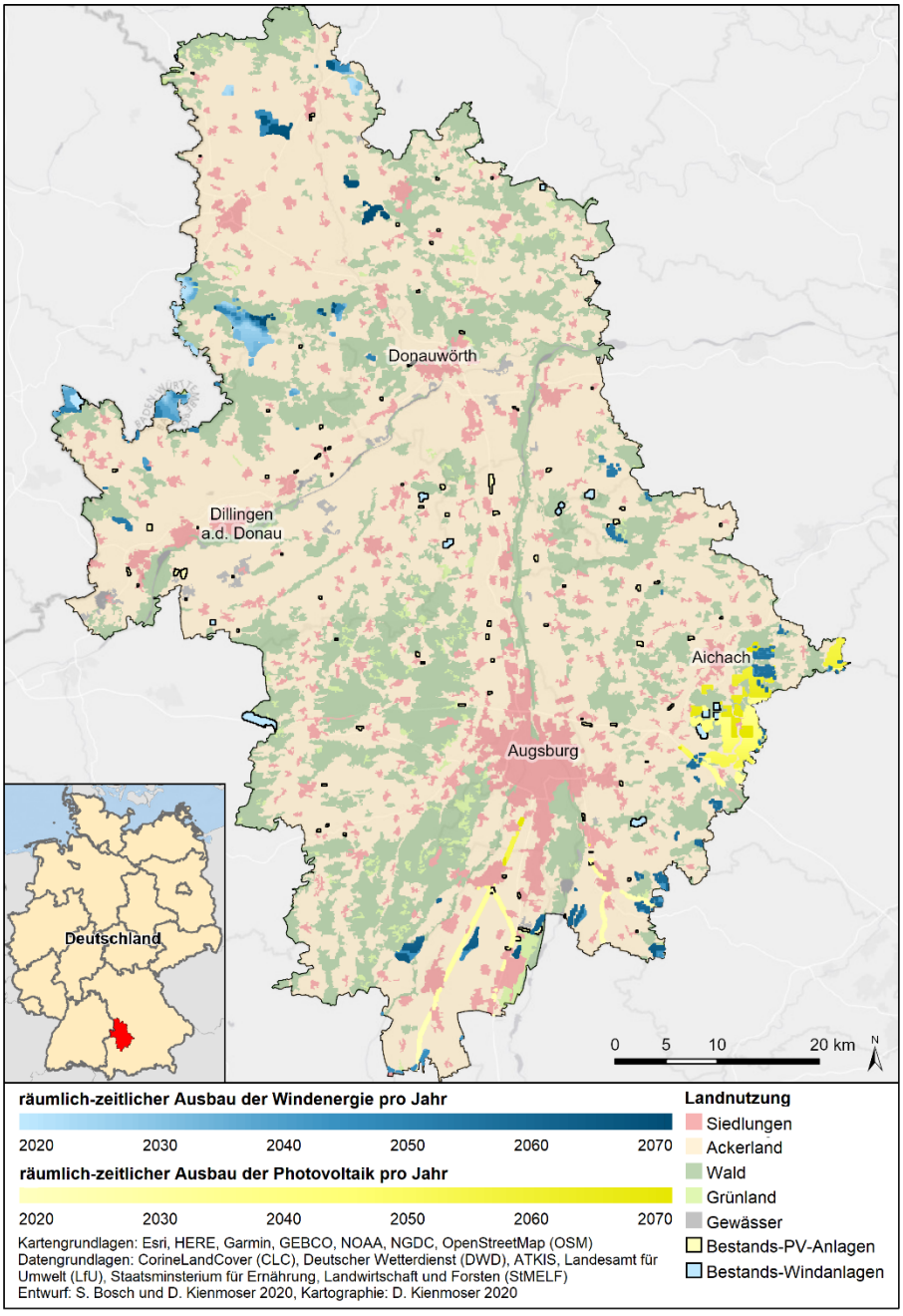

Abb. 2: Szenario Naturschutz plus – verstärkter Ausbau der Windenergie nun auch im Süden und Osten sowie Verschiebung des räumlichen Schwerpunktes der PV nach Osten

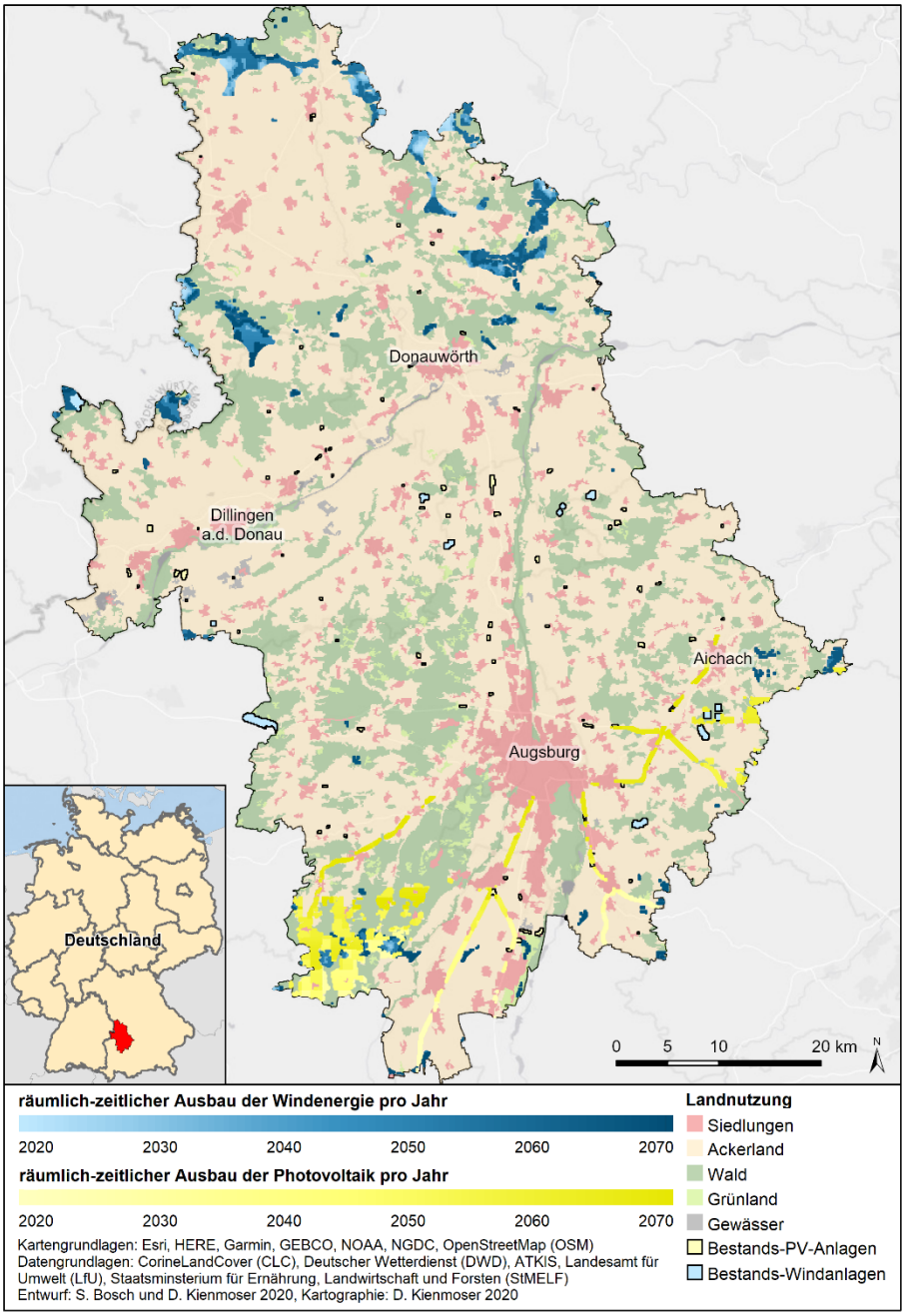

Abb. 3: Szenario Export – gegenüber Referenzszenario Ausweitung aller Ausbauschwerpunkte und verstärkter Ausbau von PV entlang von Schienenwegen im Süden bzw. Südosten

Szenario Export: Die Grundlage dieses Szenarios besteht darin, dass die Untersuchungsregion nicht nur sich selbst mit regenerativem Strom versorgt, sondern eine benachbarte Planungsregion teilweise mitversorgt. Derartige interregionale Allianzen sind denkbar, da beide Regionen davon profitieren würden. Die liefernde Region könnte ihr erneuerbares Energiepotenzial besser ausschöpfen und so regionale Wirtschaftskreisläufe ankurbeln. Die empfangende Region könnte ihren Strombedarf decken, ohne dabei die eigene Landschaft technisieren zu müssen. Um dies beispielhaft zu modellieren, haben wir angenommen, dass die Planungsregion Augsburg ein Drittel der Stromproduktion der Planungsregion München übernimmt. Dies würde einer zusätzlichen Stromproduktion von 52 % entsprechen. In diesem Szenario wird der Ausbau von Windenergie und Photovoltaik daher erheblich ausgeweitet. An der prinzipiellen räumlich-technologischen Zweiteilung ändert sich jedoch wenig (Abb. 3). Insgesamt stehen 120.367 ha zur Verfügung (Windenergie: 44.934 ha, PV: 75.433 ha). Benötigt werden 9.126 ha für Windenergie und 7.037 ha für Photovoltaik.

4 Diskussion und Fazit

Die Studie offenbart, dass der rechtzeitige Aufbau eines klimaneutralen Stromsektors räumlich auf vielfältige Weise darstellbar ist. Allen Szenarien ist gemein, dass es zu starken Konzentrationen von erneuerbaren Energien kommt. Dies liegt zum einen im methodischen Ansatz begründet, der aus Gründen der Flächeneffizienz die ertragreichsten restriktionsfreien Standorte zuallererst in das Ausbaukonzept miteinbezieht. Zum anderen geben Planungsrecht und Gesetzgebung einen schmalen räumlichen Korridor vor. Diese Vorgaben sind das Ergebnis machtvoller, kapitalistisch orientierter Entscheidungen. Der Ausbau erneuerbarer Energien wird so in Richtungen gedrängt, die aus marktwirtschaftlicher Sicht sinnvoll bzw. für die dominanten Akteure einer Gesellschaft akzeptabel sind. Selbst Schutzgebiete, die als Gegenwelt zu den ökologisch stark belasteten kapitalistischen Zentren aufgebaut und bislang vollkommen von der Energiewende verschont wurden, können dabei als stabiles soziales Konstrukt einer marktwirtschaftlichen Raumordnung betrachtet werden. Die Folge davon ist, dass manche Räume die landschaftliche Last der Energiewende zu tragen haben, während andere Gebiete kaum beeinträchtigt werden. Jene Menschen, in deren Heimat sich der Ausbau erneuerbarer Energien verstärkt entfaltet, könnten so marginalisiert werden. Dies stellt eine große Gefahr für die Akzeptanz der Energiewende dar. Die Ratifizierung des Pariser Klimaabkommens erscheint daher nur realistisch, wenn auch die Perspektiven jener gesellschaftlichen Gruppen miteinbezogen werden, die mit weniger Handlungsmacht ausgestattet, aber in erhöhtem Maße der Installation von Energieinfrastruktur ausgesetzt sind. Räumliche Konzentrationen von erneuerbaren Energien sind jedoch nicht per se auszuschließen, da sie für periphere Teilräume die Gelegenheit bieten, endogene Potenziale nutzen und regionale Wirtschaftskreisläufe ankurbeln zu können. Des Weiteren ist zu konstatieren, dass, wenn die naturschutzbedingten Einschränkungen abgeschwächt werden, keine wesentlichen Unterschiede zum Referenzszenario auftreten, da die ertragreichsten Standorte, die für die Ratifizierung des Klimaabkommens benötigt werden, außerhalb der in der Region bestehenden Schutzgebiete liegen. Abgesehen davon gibt es in der Region keine Biosphärenreservate. Der bestehende rechtliche Rahmen zum Naturschutz eröffnet der Energiewende damit genügend räumliche Optionen. In Regionen, in denen Biosphärenreservate oder andere Schutzgebietskategorien eine größere Rolle spielen, hätte eine Lockerung des Naturschutzes größere Auswirkungen auf die Umsetzbarkeit von Klimastrategien und würde womöglich zu konfliktträchtigen Aushandlungsprozessen zwischen lokalen Akteuren führen.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse dieser Studie, die als Grundlagenforschung zu verstehen ist, auch für Planer und Projektentwickler von großem Wert sind. So könnten die Mitglieder der Regionalen Planungsverbände auf Basis der Ergebnisse diskutieren, inwiefern die räumlichen Restriktionen gegenüber erneuerbaren Energien in Zeiten des Klimawandels noch angemessen sind und durch welche Anpassungen die regionalen Klimaziele sozial ausgewogener erreicht und Flächennutzungskonflikte minimiert werden können. Demgegenüber bilden die erstellten Modelle und Potenzialkarten eine hervorragende Planungsgrundlage für die Projektierung von Wind- und Solaranlagen. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass nicht nur die Klimaziele und Renditen im Fokus der Projektentwicklung stehen, sondern ergebnisoffene Kommunikationsprozesse mit potenziellen Anwohnern von Energieanlagen eingeleitet werden.

Literatur

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) (2020). *Benachteiligte Gebiete in Bayern*. Retrieved Mar 16, 2021, from https://www.stmelf.bayern.de/agrarpolitik/foerderung/211365/.

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi) (2020). *Energie-Atlas Bayern*. Retrieved Oct 12, 2020, from https://www.energieatlas.bayern.de/service/impressum.html.

Bickerstaff, K. (2017). Geographies of energy justice: concepts, challenges and an emerging agenda. In B. D. Solomon, & K. E. Calvert (Eds.), *Handbook on the Geographies of Energy*, (pp. 438–449). Cheltenham/Northhampton.

Bill, R. (2016). *Grundlagen der Geo-Informationssysteme* (6st Ed.). Berlin/Offenbach: Wichmann.

Bosch, S., & Schmidt, M. (2020). Wonderland of technology? How energy landscapes reveal inequalities and injustices of the German Energiewende. *Energy Research & Social Science*, *70*, 101733.

Bosch, S. (2020). Wohin mit dem Windrad? Die räumlichen Grenzen von Klimaschutz. *Geographische Rundschau*, *72*(5), 34–39.

Bridge, G., Barr, S., Bouzarovski, S., Bradshaw, M., Brown, M., Bulkeley, H., & Walker, G. (2018*). Energy and society. A critical perspective*. New York.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2020). *Kartendienst „Schutzgebiete in Deutschland“*. Retrieved Dec 11, 2020, from https://www.bfn.de/themen/biologische-vielfalt/nationale-strategie/projekt-des-monats/archiv/kartendienst-schutzgebiete-in-deutschland.html.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2017). *Der Klimaschutzplan – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie*. Retrieved Dec 10, 2020, from https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/.

Bundesregierung (2019). *Klimaschutzprogramm 2030*. Retrieved Dec 10, 2020, from https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578.

Copernicus (2018). *CORINE Land Cover*. Retrieved Dec 10, 2020, from https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover.

Cowell, R., Bristow, G., & Munday, M. (2012). *Wind energy and justice for disadvantaged communities*. York.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (2020). *Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland 2019: Mehr erneuerbare als fossile Energieerzeug*ung. Freiburg.

GI Geoiformatik (Ed.) (2018). *ArcGIS Pro. Das deutschsprachige Handbuch*. Berlin/Offenbach: Wichmann.

Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) (2018). *ATKIS – Amtliches Digitales Basis-Landschaftsmodell*. Retrieved Nov 15, 2020, from https://www.ldbv.bayern.de/produkte/atkis-basis-dlm.html.

Lefebvre, H. (1991). *The production of space*. Malden.

Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) (2020*). Verbleibendes CO_2-Budget*. Retrieved Sept 18, 2020, from https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html.

Rahmstorf, S. (2019). *Wie viel CO_2 kann Deutschland noch ausstoßen?* Retrieved Oct 22, 2020, from https://scilogs.spektrum.de/klimalounge/wie-viel-co2-kann-deutschland-noch-ausstossen/.

United Nations (UN) (2015). *Adoption of the Paris Agreement. Framework Convention on Climate Change*. Paris.

Van der Horst, D. (2017). Energy landscapes of less than two degrees global warming. In B. D. Solomon, & K. E. Calvert (Eds.), *Handbook on the Geographies of Energy*, (pp. 251–264). Cheltenham/Northhampton.

Zimmerer, K. S. (2017). The political and social ecologies of energy. In B. D. Solomon, & K. E. Calvert (Eds), *Handbook on the Geographies of Energy* (pp. 465–476). Cheltenham/Northhampton.