

Raumwirkungen innovativer Konzepte und Technologien

1. Einführung

Die mit der Energiewende beabsichtigte Systemtransformation von einer eher zentralen („energy for space“) zu einer überwiegend dezentralen Versorgungsstruktur („energy from space“) geht durch den vermehrten Einsatz erneuerbarer Energien (EE) mit einem signifikant steigenden Flächenbedarf und daraus resultierenden Landnutzungskonkurrenzen einher. Es entstehen neuartige „Energiewälder“ (► *Abbildung 1*). Auf diese Weise nimmt der „Raumdruck“ auf verfügbare Flächen mit fortschreitendem EE-Ausbau zu. Im „Raumwiderstand“ werden dabei die Alternativkosten der energetischen Landnutzung – insbesondere in Form nicht abgelteter sozialer und ökologischer Kosten einer dezentralen Energiebereitstellung durch Einbußen u. a. beim Wohnungsfeldschutz, Gewässer-, Natur- und Artenschutz sowie der Nutzung des Allmendeguts (Quasikollektivguts) „Landschaft“ sichtbar.

Davon unabhängig stellen sich vielfältige technische, ökonomische und systemische Optimierungsfragen eines räumlich aufgelösten Energiesystems und seiner

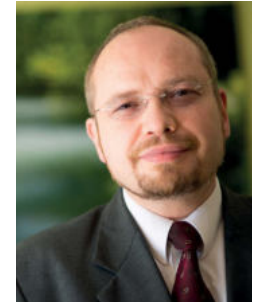
Komponenten – von der Netzallokation bis hin zu optimierten lokalen und regionalen Energiesystemen. Zur Gewinnung der dazu nötigen Daten werden wiederum neuartige Monitoring- und Bewertungsansätze einer räumlich aufgelösten Analyse benötigt.

Die Raumdimension der Energiewende ist daher ein wichtiger interdisziplinärer Forschungsgegenstand. Der Beitrag gibt einen aktuellen exemplarischen Überblick über raumbezogene Forschung zur Energiewende im FVEE:

2. Monitoring von Raumwirkungen

2.1 Der „EE-Monitor“: Naturschutzfachliches Monitoring

Das UFZ-Forschungsvorhaben „Naturschutzfachliches Monitoring des Ausbaus der erneuerbaren Energien im Strombereich und Entwicklung von Instrumenten zur Verminderung der Beeinträchtigung von Natur und Landschaft“ im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) beschäftigt sich mit der systematischen Erfassung der negativen Auswirkungen der



UFZ

Prof. Dr. Erik Gawel
erik.gawel@ufz.de

Dr. Marcus Eichhorn
marcus.eichhorn@ufz.de

Dr. Sinead O’Keeffe
sinead.o-keeffe@ufz.de

DBFZ

Martin Dotzauer
martin.dotzauer@dbfz.de

Dr. Volker Lenz
volker.lenz@dbfz.de

DLR

Dr. Jacob Estevam Schmiadt
jacob.estevamschmiadt@dlr.de

ISE

Gerhard Stryi-Hipp
gerhard.stryi-hipp@ise.fraunhofer.de

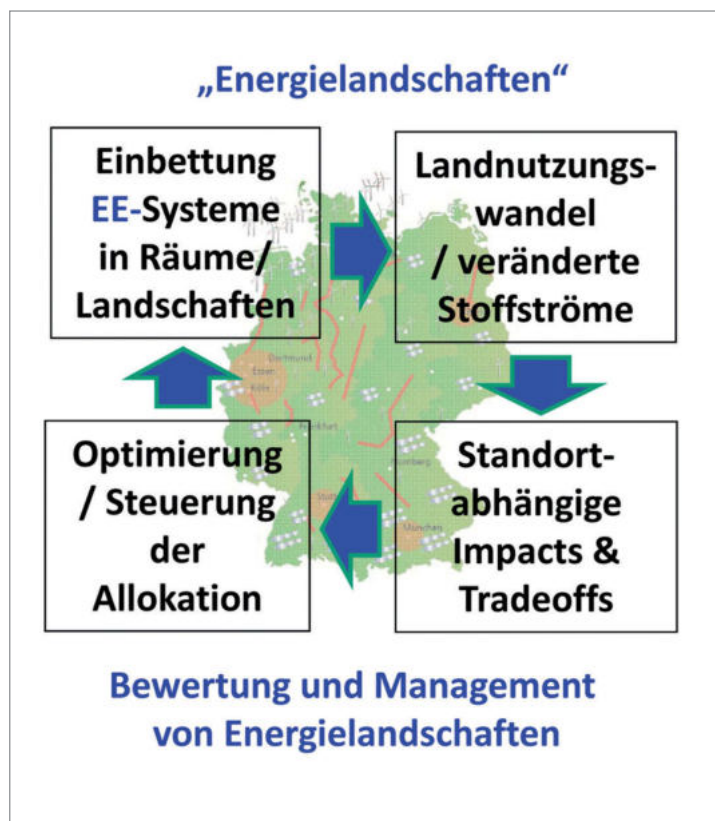
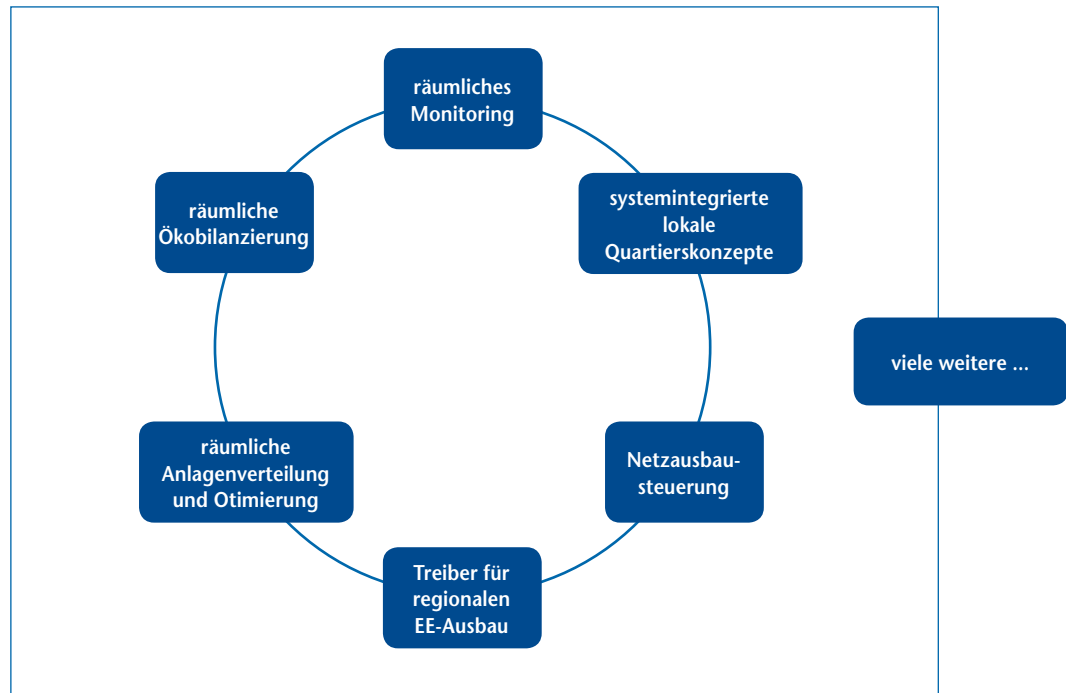


Abbildung 1

**Forschungsthema
„Energiewälder“**

Abbildung 2
**Aspekte von
 Raumwirkungen
 innovativer Konzepte
 und Technologien**



erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung auf Natur und Umwelt. Im Gegensatz zum Monitoring der technologischen Entwicklung der erneuerbaren Energien gibt es im naturschutzfachlichen Kontext derzeit noch kein konsistentes, deutschlandweites Monitoringsystem welches die negativen Auswirkungen wie Vogel- oder Fledermausschlag an Windenergieanlagen, direkter Lebensraumverlust oder Beeinträchtigung des Landschaftsbildes erfasst und dokumentiert. Dies ist aber notwendig, um den weiteren notwendigen Ausbau der erneuerbaren Energien möglichst nachhaltig und naturverträglich zu gestalten. Das Hauptziel des Forschungsvorhabens ist eine systematische Erfassung und Darstellung der Auswirkungen und Wirkmechanismen der erneuerbaren Energien (Windenergie, Photovoltaik, Bioenergie und Wasserkraft) und des Stromnetzes auf die biotische Umwelt bzw. die Schutzgüter im Sinne des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG). Diese Informationen bilden die Basis für die Entwicklung eines der Komplexität der Probleme angemessenen integrierten Systems zur laufenden Dokumentation der technologischen Entwicklung und des infrastrukturellen Ausbaus der erneuerbaren Energien und einer dazu komplementär stehenden, kontinuierlichen, raum-zeitlich kohärenten Erfassung und Beobachtung der resultierenden Folgen (Monitoring). Darauf aufbauend können Handlungsstrategien zur Konfliktminimierung entwickelt und möglichst naturverträgliche Lösungen für den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien abgeleitet werden.¹

2.2 Regionale und räumliche Ökobilanzierung der Bioenergie (RECLA)

Zu den Raumeffekten gehört auch die regionale Verteilung der mit Bioenergie-Systemen verbundenen Treibhausgase (THG). Dabei ist von Interesse, wie sensitiv mögliche THG-Minderungen regionaler Bioenergiesysteme auf unterschiedliche Umfeldbedingungen reagieren. Zu diesem Zweck wurde die Ökobilanzierungsmethode RELCA (Regional Life Cycle Inventory Assessment) entwickelt,² die es erlaubt, THG-Minderungen regionaler Bioenergiesysteme zu bewerten. Durch dieses Modell können räumlich aufgelöste Daten und Life-Cycle-Software für den Fallstudienort Mitteldeutschland (Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen) kombiniert werden. Dieser Ansatz ermöglicht in der Folge eine integrierte Bewertung von Bioenergie-Technologien und Landnutzung in der Energielandschaft. Auf diese Weise können die regionalen und räumlichen Trends der mit Bioenergie verbundenen Treibhausgasstrukturen identifiziert werden. Diese Ergebnisse werden dann mit den rechtlichen Standardwerten (z. B. gemäß Renewable Energy Directive = RED) verglichen, um so die Leistung der regionalen Bioenergie-Produktion besser einschätzen zu können.³ Dieser Bewertungsansatz kann somit innovativ zur aktiven Politikberatung beitragen sowie im Rahmen von Tests verschiedener Zukunftsszenarien genutzt werden.

3. Lokale und regionale Systembeiträge von Biomasse

3.1 Stromnetzstabilisierende lokale erneuerbare Wärme (SmartBiomassHeat)

Überschlägige Abschätzungen national nachhaltiger Biomassepotenziale sowie Ausbauoptionen von Solarthermie und tiefer Geothermie zeigen, dass die Nutzung der Umgebungswärme zukünftig mindestens rund 50% des Wärmebedarfs decken muss: Das heißt, hier wird ein erheblicher zusätzlicher Strombedarf – vor allem im Winter – generiert.

Da sowohl der Gebäudewärmebedarf als auch der industrielle Wärmebedarf in erster Linie in den urbanen Räumen anfallen, in denen Windkraft kaum lokale Strombeiträge liefern kann, und gebäudeintegrierte PV im Winter nur geringe Erträge beisteuert, ist entweder ein massiver Stromimport in die urbanen Räume oder ein nennenswerter Beitrag chemischer Energiespeicher nötig. Hier können sowohl Biomasse als auch andere synthetische Energieträger (Power to Fuels = PtF) zum Tragen kommen.

PtF-Anwendungen stecken noch in der Entwicklung. Sie weisen hohe Energieverluste auf, können aber sehr breit eingesetzt werden (z. B. auch in der Mobilität). Hingegen ist die thermische Nutzung fester Biomasse bereits etabliert und kann zukünftig in allen Leistungsgrößen zu einer gekoppelten Wärme- und Strombereitstellung weiterentwickelt werden.

Im konkreten Fall elektrisch angetriebener Luft-Wasser-Wärmepumpen sinkt die Effizienz mit sinkenden Außentemperaturen. Dies sind aber gerade die Zeiten, in denen viel Heizwärme benötigt wird, d. h., der Strombedarf steigt mit sinkender Temperatur überproportional. Niedrige Temperaturen treten vor allem im Winter auf, wenn auch PV lokal nur wenig Strom bereitstellen kann, d. h., es entsteht in Summe und zeitlich befristet (Morgenstunden mit maximalem Heizbedarf und tiefsten Temperaturen) eine Diskrepanz an lokalem erneuerbarem Strom und der Nachfrage der Wärmepumpen.

Wärme aus Biomasse kann hier gezielt zum Einsatz kommen – zunächst mittels Bereitstellung von Wärme, so dass die Wärmepumpe an ungünstigen Tagen nicht oder nur sehr wenig im Einsatz sein muss. Für diesen schon heute möglichen Anwendungsfall wurde am DBFZ für ein Einzelgebäude der Einsatz eines Scheitholzkaminofens mit Wassertasche durchgerechnet. Bei einer regelmäßigen Nutzung und einem günstigen Scheitholzbezugspreis (Selbstwerber) ergibt sich eine Wirtschaftlichkeit für das Kombisystem aus Wärmepumpe und Kaminofen mit Heizungsnetzintegration, wobei der Nutzen für das Stromsystem durch die Vermeidung der Spitzenlaststromnachfrage der Wärmepumpe nicht vollständig

monetarisiert wurde.⁴ Für die nächste Zukunft kann mittels einer Biomasse-Wärme-Kraft-Kopplung (entweder über Biomethan aus dem Gasnetz oder vorrangig aus aufbereiteten, lokal gewonnenen Festbiomassebrennstoffen mittels Vor-Ort-Vergasung mit einer Leistung von 0,5–250 kW_{el} und anschließender motorischer Nutzung oder Nutzung in einer Brennstoffzelle) Strom und Wärme gleichzeitig gewonnen werden. Da die Wärme leicht für 24 Stunden gespeichert werden kann, erfolgt die Steuerung der Dauer des Betriebs über die prognostizierte Wärmenachfrage (Wärme soll möglichst vollständig genutzt werden) und der genaue Betriebszeitpunkt nach den Spitzenlaststrombedarfen im Netz. Die notwendigen Biomasse-WKK-Anlagen sind im Labor in allen Leistungsbereichen vorhanden und werden für den Einsatz in diesem Anwendungsfall weiterentwickelt. Insgesamt soll mit wenig Biomasseinsatz ein maximaler Nutzen für die Systemstabilität ohne große räumliche Verlagerung von Energiebereitstellung und -verbrauch erreicht werden.

3.2 Beitrag flexibler Biogasanlagen zur regionalen Entlastung der Verteilnetze

Im Zuge der Energiewende werden im Stromsystem zunehmend fluktuierende Erzeugungsanlagen wie Wind- und PV-Anlagen den Großteil der erneuerbaren Energie bereitstellen. Diese Anlagen erfordern entsprechende Flexibilitätsoptionen, wie zum Beispiel den Ausbau der Übertragungsnetze, den Einsatz von Speichertechnologien, das Demand-Side-Management und steuerbare Erzeugungsanlagen. Zu den heute bereits verfügbaren erneuerbaren, steuerbaren Erzeugungsarten zählen flexible Biogasanlagen, die in gewissen Grenzen ihre Produktion am Bedarf ausrichten können. Bei dieser Betrachtung, die vor allem die Übertragungsnetzebene adressiert, fehlt allerdings die Perspektive der Verteilnetze, die im Zuge der Energiewende einen Paradigmenwechsel durchlaufen. Waren die Verteilnetze bisher vor allem dafür konzipiert, Strom aus dem Übertragungsnetz zu den Letztverbrauchern zu verteilen, übernehmen sie schrittweise auch immer mehr die Aufgabe, erneuerbaren Strom aus dezentralen Anlagen zu übertragen. Hieraus resultiert ein Ausbaubedarf im Verteilnetz, der ökonomisch ähnlich hohe Aufwendungen nach sich zieht wie der Ausbau des Übertragungsnetzes.⁵

Flexible Biogasanlagen können die Lastschwankungen im Übertragungsnetz ausgleichen, sind aber durch die Flexibilisierung ebenfalls als Treiberfaktor für den Verteilnetzausbau anzusehen, da die Anlagen überwiegend in der Mittelspannungsebene abgeschlossen sind. Da die räumliche Verteilung von Biogasanlagen und auch die der fluktuierenden erneuerbaren Energien räumlich sehr heterogen ist, wirkt sich die skizzierte Problematik vor allem in

bestimmten Schwerpunktregionen auf den Verteilnetzausbau aus. Der Netzausbaubedarf kann in diesen Schwerpunktregionen (hoher Anteil flexibler Bioenergieanlagen bei gleichzeitig hoher Leistungsdichte volatiler Anschlussleistung in der Mittelspannung) durch ein intelligentes Einspeisemanagement vermindert werden, indem die Gleichzeitigkeitsfaktoren der Einspeisung verringert und so vorhandene Übertragungskapazitäten effizienter genutzt werden. Dabei ist eine trilaterale Abstimmung zwischen den Anlagenbetreibern flexibler Biogasanlagen, dem Verteilnetzbetreiber und dem zuständigen Direktvermarkter erforderlich, die die gleichzeitige Einspeisung der Biogasanlagen zu Zeiten geringer Nachfrage und hoher volatiler Einspeisung vermeiden. Im Projekt RegioBalance⁶ konnte gezeigt werden, dass in ausgewählten Schwerpunktregionen, ein intelligentes Einspeisemanagement den Netzausbaubedarf im Verteilnetz reduzieren kann und die erzielbaren Einsparungen die dem gegenüberstehenden Aufwendungen für Geschäftsprozesse und mögliche Opportunitätskosten durch suboptimale Einsatzplanung deutlich überwiegen.

4. Treiber der Raumallokation

Zu den Raumaspekten der Energiewende gehören auch regionalspezifische Ausbau-Treiber. Insbesondere der Ausbau der Windenergie schreitet in Deutschland und Europa mit hohem Tempo voran. Auf regionaler Ebene werden jedoch große Unterschiede beim Ausbautempo deutlich. Das liegt zum einen an unterschiedlichen naturräumlichen Gegebenheiten, etwa der Windhöflichkeit und der Verfügbarkeit geeigneter Flächen.

Eine neue ökonomische Zwei-Länder-Studie des UFZ weist nun erstmals statistisch anhand von Länderdaten aus Deutschland und Schweden nach, dass auch die Flächenpolitik von Ländern und Gemeinden – etwa Raumplanung und Genehmigungspraxis – maßgeblich die Ausbaugeschwindigkeit bei der Windenergie beeinflusst.⁷ Wie viele Windenergieanlagen in einer Region stehen, hängt unter anderem ab von der politischen Orientierung der jeweiligen Landesregierung und den (erhofften) regionalen Kosten und Nutzen des Windenergieausbaus. Der Fortschritt der Energiewende wird also nicht nur durch die Förderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes bestimmt, sondern auch durch regionalpolitische Rahmensetzungen und Landnutzungspolitiken. In der UFZ-Studie werden dabei die komparativen Effekte zwischen den institutionellen Gegebenheiten zweier EU-Länder miteinander verglichen.

5. Gebäudetomograph – quartiersweite Gebäudebestandserfassung mit Fernerkundung

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Projekts „Gebäudetomograph“ werden neben berührungslosen Verfahren zur Untersuchung einzelner Gebäude insbesondere Verfahren zur Erfassung und Modellierung des Gebäudebestands ganzer Quartiere weiterentwickelt. Anhand von Luftbildern von UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*) und Kleinflugzeugen können detaillierte 3D-Gebäudemodelle für Quartiere erstellt werden.⁸ Diese werden automatisiert mit semantischen Informationen angereichert, sodass z. B. Fensterflächenanteile für energetische Bilanzierungen extrahiert werden können. Darüber hinaus können mit UAVs oder Kleinflugzeugen die Wärmestrahlung und die Oberflächenmaterialien detektiert werden. Ausgehend von diesen Daten können Sanierungsempfehlungen für einzelne Gebäude und auch für den Quartierskontext abgestimmte Sanierungspläne entwickelt werden. Außerdem können Solarpotenziale ermittelt und Informationen über den Einfluss der Gebäude auf das lokale Mikroklima gewonnen werden.

6. Optimierte räumliche Anlagenverteilung für lokale Energiesysteme mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien

Die Smart Cities-Gruppe des Fraunhofer ISE erforscht, wie Städte und Kommunen sich mit hohen Anteilen erneuerbaren Energien versorgen können. Mit dem Computermodell KomMod wird das Energiesystem berechnet, das zu günstigsten Kosten das Ziel erreicht unter Berücksichtigung der Sektorkopplung und der zunehmenden zeitliche Dynamik des Energiesystems.⁹ Hierzu werden Bedarfsprognosen berechnet und die erneuerbaren Energien-Potenziale in der Kommune und der umliegenden Region detailliert ermittelt.

Die Erfahrungen zeigen, dass die meisten Kommunen auf ihrer Gemarkung über ein gutes Solarpotenzial verfügen, dass andere Potenziale meist jedoch nur sehr begrenzt vorhanden sind. Windenergie- und Biomassepotenziale finden sich dagegen oft in den ländlichen Regionen um die Kommunen herum. Geothermie- und Wasserkraftpotenziale sind generell räumlich ungleichmäßig verteilt.

Kommunen, die hohe Anteile erneuerbarer Energien anstreben, benötigen vor allem einen Energiemix aus Sonne und Wind, unterstützt durch Biomasse. Aufgrund der räumlichen Verteilung dieser Potenziale ist künftig die Zusammenarbeit der Kommunen mit den

umliegenden Regionen in Energiefragen erforderlich. Um hierfür fundierte Konzepte bereitzustellen, sollen künftig nicht nur die erforderlichen Anlagenleistungen berechnet, sondern auch die Standorte der Solar- und Windkraftanlagen sowie die genutzten Räume zur Biomassegewinnung optimiert werden.

7. Allokation von Netz- und Erzeugungs-Infrastrukturen als Raumproblem

Die konkrete Allokation von Stromerzeugungsinfrastrukturen im Raum hat unmittelbar auch Auswirkungen auf die notwendige Netzinfrastruktur für den Transport der erzeugten Elektrizität. Gleichwohl erhalten Stromerzeuger derzeit kaum Anreize, diese Auswirkungen bei ihren Standortentscheidungen zu berücksichtigen.

Dieser Umstand macht einen ineffizient hohen Netzausbau erforderlich und wirft die Frage auf, wie ein geeigneter Mechanismus zur räumlichen Koordination von Stromerzeugung und -netz aussehen kann, der Wohlfahrtsverbesserungen verspricht, mit der Energiewende kompatibel ist sowie politisch durchsetzbar und robust erscheint.

Im Ergebnis bietet sich eine Aufteilung der einheitlichen Gebotszone im deutschen Stromhandel (sog. *Market Splitting*) entlang struktureller Netzengpässe an. Damit könnten effektive, wohlfahrtssteigernde Standortsignale für Erzeuger gesendet, deren dezentrales Kostenwissen genutzt und Probleme von Marktkonzentration begrenzt werden.¹⁰

8. Fazit

Regional- und Raumanalysen stellen eine wichtige Ergänzung der traditionellen Energie(system) forschung im EE-Zeitalter dar. Wie die vorgenannten aktuellen Forschungsbeispiele aufzeigen, tragen sie insbesondere dazu bei,

- die vielfältigen Treiber eines regionalspezifischen Ausbaus der Erneuerbaren zu verstehen,
- regionale und lokale Muster und Impacts, etwa im Umweltbereich, zu erkennen,
- Methoden des räumlichen Monitorings weiterzuentwickeln,
- vielfältige räumliche Optimierungen vorzunehmen und darauf gestütztes Konfliktmanagement zu betreiben sowie
- innovative, räumlich explizite Steuerungskonzepte zu entwickeln.

Quellen

- 1 Thrän, D.; Peters, W.; Kinast, P.; Klenke, R.; Eichhorn, M.; Oehmichen, G.; Erdmann, G. (2018): Wenn die Infrastrukturen für den Klimaschutz Natur und Landschaft durchdringen: Ansätze für ein naturschutzfachliches Monitoring der Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien. *GAI*A, erscheint demnächst.
- 2 O’Keeffe, S.; Wochele-Marx, S.; Thrän, D. (2016): RELCA: a REgional Life Cycle inventory for Assessing bioenergy systems within a region. *Energy, Sustainability and Society* 6 (1), 1-19.
- 3 O’Keeffe, S., Majer, S., Drache, C., Franko, U., Thrän, D. 2017. Modelling biodiesel production within a regional context – A comparison with RED Benchmark. *Renewable Energy* 108, 355-370.
- 4 Lenz, V.; Büchner, D.; Wurdinger, K. (2017): Evaluation of combining an air-to-water heat pump with a wood stove with water jacket for residential heating in Conference Proceedings 12th IEA Heat Pump Conference 2017, Rotterdam.
- 5 Verteilernetzstudie: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/verteilernetzstudie.html
- 6 Abschlussbericht: www.energetische-biomasse-nutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB087_RBALANCE_Endbericht_final_f%C3%BCr_TIB_05.12.2016.pdf
- 7 Lauf, T.; Ek, K.; Gawel, E.; Lehmann, P.; Söderholm, P. (2018): The Regional Heterogeneity of Wind Power Development: An Empirical Investigation of Land-use Policy in Germany and Sweden, erscheint demnächst.
- 8 Frommholz, D.; Linkiewicz, M.; Meißner, H.; Dahlke, D. (2017): Reconstructing Buildings with Discontinuities and Roof Overhangs from Oblique Aerial Imagery, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives, XLII-1 (W1)*, Hannover.
- 9 Siehe Stryi-Hipp, G.; Eggers, J.-B.; Steingrube, A. (2015): Berechnung zeitlich hochaufgelöster Energieszenarien für eine 100% erneuerbare Energieversorgung der Stadt Frankfurt am Main (KomMod4FFM), Freiburg.
- 10 Vgl. Korte, K.; Gawel, E. (2018): Räumliche Koordination im liberalisierten Strommarkt: angemessene Anreize für die Einspeisung. *Wirtschaftsdienst* 98 (1), 60-67.