

# Technikfolgenabschätzung in Energielandschaften

## Agentenbasierte Modellierung von Energiekonflikten

Jürgen Scheffran, Forschungsgruppe Klimawandel und Sicherheit (CLISEC), Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN),

Institut für Geographie, Universität Hamburg, Grindelberg 7, 20144 Hamburg (juergen.scheffran@uni-hamburg.de)

P. Michael Link, CLISEC/CEN, Institut für Geographie, Universität Hamburg (michael.link@uni-hamburg.de)

Mostafa Shaaban, CLISEC/CEN, Institut für Geographie, Universität Hamburg (mostafa.shaaban@uni-hamburg.de)

Diana Süsser, Institut für Geographie, Universität Hamburg (diana.suesser@posteo.de)

Jinxi Yang, National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation, Beijing, China (xixiaixixi@hotmail.com)

44

Verglichen mit den Risiken und Konflikten des fossil-nuklearen Zeitalters erscheinen die erneuerbaren Energien in einem überwiegend positiven Licht. Allerdings schafft die Transformation zu einer kohlenstoffarmen Energieversorgung neue Energielandschaften, die einen hohen Bedarf an Landflächen mit sich bringen – was ebenfalls Energiekonflikte provozieren kann. Um derartige Konflikte zu mindern und die Akzeptanz der Bevölkerung zu gewinnen, kann Technikfolgenabschätzung einen Beitrag leisten, wenn sie sich auf räumliche agentenbasierte Modelle stützt. Diese Modelle repräsentieren die Entscheidungen von Stakeholdern über Energiealternativen, deren dynamische Interaktionen sowie daraus resultierende Landnutzungsoptionen und Energiepfade. Als Fallstudie dient Norddeutschland, wo Landwirte und Gemeinden als lokale Akteure der Energiewende agieren.

### Technology Assessment in Energy Landscapes

#### Agent-Based Modeling of Energy Conflicts

*The risks and conflicts of the fossil-nuclear age are in contrast to the effects of renewable energies which appear in a largely positive light. However, the transformation towards a low-carbon energy supply creates new energy landscapes with a high demand for suitable land areas – which may also provoke energy conflicts. Technology assessment can contribute to reducing such energy conflicts and increasing public acceptance by using spatial agent-based models that represent dynamic decisions and interactions of stakeholders regarding energy alternatives and land-use options. Northern Germany serves as a case study region where farmers and communities are local actors of the energy transition.*

**KEYWORDS:** agent-based modelling, energy conflicts, energy landscapes, energy transition, renewable energy

This is an article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License CCBY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)  
<https://doi.org/10.14512/tatup.26.3.44>  
Submitted: 06.07.2017. Peer reviewed. Accepted: 23.10.2017

## Energiekonflikte und Energielandschaften

### Von Energiekonflikten zur Energiewende

Umweltauswirkungen, Sicherheitsrisiken und geopolitische Konfliktdimensionen der fossil-nuklearen Energieversorgung stehen vielfach im Fokus öffentlicher Debatten über den wachsenden Energiebedarf und den Ressourcenmangel, über Verteilungsprobleme und Nord-Süd-Spannungen, über die globale Erwärmung oder über neue und alte Sicherheitsrisiken, beispielsweise Reaktorunfälle, Endlagerung und militärische Nutzung der Kernenergie (IANUS 1996; Zoll 2002). Angesichts von Protesten gegen Kernenergie, Kohle und andere fossile Energieträger verstärkte die Reaktorkatastrophe im japanischen Fukushima 2011 die gesellschaftliche Kontroverse und brachte die Energiewende auf den Weg. Durch staatliche Subventionsprogramme und rechtliche Rahmenbedingungen (Deutscher Bundestag 2000; Deutscher Bundestag 2011; EU 2015) hat sich der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Deutschland zwischen 2000 und 2015 vervielfacht (Böhner et al. 2017).

Erneuerbare Energiequellen sind eine Voraussetzung für die Transformation des zentralisierten Energiesystems im industriellen Zeitalter zu einer dezentralen, nachhaltigen, gesundheitsverträglichen und kohlenstoffarmen Energieversorgung (IPCC 2011). Im Unterschied zu destruktiven Landschaftseingriffen der bisherigen Energiegewinnung – z. B. durch Abholzung von Wäldern, Kohle- und Uranminen, Verschmutzung von Luft, Boden und Wasser – besteht heute die Herausforderung, erneuerbare Energien in vorhandene ökologische und soziale Landschaftsstrukturen einzubetten. Lokale Akteure wie Landwirte und Bürgerinitiativen sind Pioniere der Energiewende und treiben sie voran, z. B. durch Bereitstellung landwirtschaftlicher Flächen, durch Bürgerwindparks oder Energiekommunen. Die dadurch ausgelöste Nachfrage nach Landflächen und Landinvestitionen verstärkt jedoch die Konkurrenz um die begrenzte „Schlüsselresource Raum“ und führt zu wachsenden Akzeptanzproblemen

und Konflikten. Beispiele sind die Auswirkungen großer Staudämme auf Flussläufe, die Veränderung des Landschaftsbildes durch Windkraftanlagen, die Konkurrenz zwischen dem Anbau von Nahrungsmitteln und Energiepflanzen, Widerstände gegen Stromtrassen oder die Folgen für den Umwelt- und Artenschutz.

Welchen Beitrag agentenbasierte Modelle zum Verständnis dieser Konflikte leisten und wie sie politische Entscheidungsfindungen unterstützen können, wird im Folgenden diskutiert.

### Energielandschaft Norddeutschland

Schleswig-Holstein verfügt über reichlich landwirtschaftliche Nutzflächen und setzt seit Jahrzehnten auf Windkraft und Bioenergie als wichtigste erneuerbare Energiequellen. Während der bundesweite Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch 2015 bei rund 15 % lag, war der Anteil in Schleswig-Holstein mit rund 31 % deutlich höher, davon 56,2 % aus Windkraft, 36,4 % aus Biomasse und 6 % aus Photovoltaik und Solarthermie. Beim Stromverbrauch lag der erneuerbare Anteil bundesweit bei etwa 32 %, während im Bundesland die erneuerbare Stromproduktion den Gesamtbedarf überstieg (MELULR-SH 2017).

Bioenergie ist vielseitig einsetzbar und umfasst die Gewinnung von Biodiesel aus Energiepflanzen wie Raps, Mais oder Weizen und die Stromerzeugung in Biogasanlagen (AEE 2013). In Deutschland stieg das Anbaugelände der Energiepflanzen von rund 0,7 Mio. Hektar im Jahr 1999 auf mehr als 2,3 Mio. Hektar im Jahr 2013; dies entspricht etwa 19,3 % des Ackerlandes. Die installierte Leistung aller Biogasanlagen in Schleswig-Holstein betrug 2015 knapp 400 MW. Bis 2020 soll der Anteil der Biomasse in Schleswig-Holstein weiter ausgebaut werden. Bis

Eine modellgestützte Fallstudie hat diese Konfliktpotenziale auf der Halbinsel Eiderstedt im südlichen Nordfriesland untersucht, einem wichtigen Brut- und Rastgebiet teilweise bedrohter Vogelarten. Mitte des letzten Jahrzehnts wurde der Plan gefasst, den Anteil des Ackerlands auf der Halbinsel von 35 % auf rund 65 % im Jahre 2025 zu erhöhen, um vermehrt Mais für Biogasanlagen anzubauen (Link und Schlepner 2007). Eine Szenarioanalyse ermittelte die Auswirkungen eines solchen Grünlandumbruchs auf die ökologische Tragfähigkeit von vier Wattvogelarten (Schlepner und Link 2008), deren Bestände auch durch den Qualitätsrückgang des Grünlands stark belastet würden. Eine andere Untersuchung beschäftigte sich mit Änderungen im Landschaftsbild Eiderstedts durch Maisfelder (Link und Schlepner 2011) und fand heraus, dass Urlauber diese Änderungen zwar bewusst wahrnahmen, diese aber keine gravierenden Auswirkungen auf ihre Urlaubsplanung hatten.

### Agentenbasierte Modellierung von Energielandschaften

Modelle können einen relevanten Beitrag zur Abschätzung der Folgen von Energiekonflikten leisten und damit Entscheidungsprozesse über zukünftige Energiepfade unterstützen. Es gibt vielfältige Energiemodelle, von der Projektion zukünftiger Energieversorgung bis zum Verständnis energieökonomischer Interaktionen (Bhattacharyya und Timilsina 2010). Top-down-Ansätze modellieren und optimieren von einer Makroperspektive der gesamten Wirtschaft die Entwicklung von Energiesystemen, Energieverbrauch oder Emissionen.

## *Geringe Energiedichte und hoher Landbedarf der Bioenergie provozieren eine Konkurrenz um die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen.*

2050 könnte die Biomasse 26 % des gesamten Energiebedarfs in Deutschland decken (FNR 2017). Die Entscheidung, ob Pflanzen für Lebensmittel oder Energie angebaut werden, hängt dabei von wirtschaftlichen und ökologischen Rahmenbedingungen ab.

Zu den Problemen der Bioenergie gehören die geringe Energiedichte und der hohe Landbedarf, was eine Konkurrenz um die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen, Konflikte mit dem Natur-, Umwelt- und Artenschutz, mit der Nahrungsmittelproduktion (*food versus fuel*) wie auch mit dem Tourismus provoziert. Zudem zieht die Umwandlung von Grünland in Ackerland einen hohen Wasserverbrauch und die Gefahr einer Überdüngung der Böden nach sich. Aufgrund endlicher Nutzflächen stößt der Ausbau von Bioenergie und Lebensmitteln somit an praktische Grenzen.

Demgegenüber spielen Bottom-up-Modelle eine zunehmende Rolle, die das komplexe Wechselspiel zwischen sozioökonomischen Dynamiken und geographischen Faktoren auf der Mikroebene untersuchen. Die agentenbasierte Modellierung (ABM) repräsentiert individuelle Agenten, die autonom, reaktiv, proaktiv, regelbasiert und lernfähig sind, ihr Handeln aufgrund bestimmter Verhaltensregeln und Ziele an konkrete Situationen anpassen und mit anderen Agenten interagieren (Arthur 1999). Mit computergestützten Simulationsverfahren lässt sich die Entstehung komplexer sozialer Strukturen (*artificial societies*) von der lokalen Mikroebene bis zur globalen Makroebene analysieren (Billari et al. 2006).

ABM eignet sich damit auch für die Analyse von Energiekonflikten im Kontext einer nachhaltigen Transformation räumlicher Energielandschaften, um die interdependenten Handlungen

gen einer Vielzahl von Akteuren und die daraus resultierenden Energiepfade darstellen und analysieren zu können (Matthews et al. 2007).

Als Rahmen für ABM dient hier das VCX-Modell, das die handlungsleitenden Motive der Akteure, ihre Fähigkeit zu regelbasiertem Verhalten sowie ihre dynamischen Interaktionen einbezieht (Scheffran und Hannon 2007, vgl. Abb. 1). Dabei verwenden die Akteure einen Teil ihrer verfügbaren Handlungsmittel (Fähigkeiten  $K$ ) als Investitionen ( $C$ ) gemäß ihrer Prioritäten ( $P$ ) in Handlungspfaden ( $A$ ) zur Beeinflussung ihrer Systemumgebung ( $X$ ) und beurteilen die Ergebnisse der Handlungen aller Akteure anhand eigener Werte und Ziele ( $V$ ), um aufgrund von zielgeleiteten Entscheidungsregeln (bezeichnet durch  $\Delta$ ) neue Handlungen abzuleiten. In Reaktion auf ihre Wertepreferenzen können Akteure die Prioritäten für Handlungspfade innerhalb gewisser Grenzen intensivieren oder abschwächen und durch Lern- und Anpassungsprozesse die Handlungsrichtung mit einer bestimmten Reaktionsstärke ändern.

Aufgrund der gewählten Handlungen und deren Wirkungen auf alle Akteure (auch der Eigenwirkungen) entsteht eine Interaktion. Akteure können in Konflikt geraten, wenn sie die Werte ( $V$ ) anderer Akteure durch ihre Handlungen ( $A$ ) schädigen und dies Gegenmaßnahmen provoziert, die eine Eskalationsspirale in Gang setzen. Umgekehrt können Akteure durch gegenseitige Anpassungen (Änderung von Investitionen  $\Delta C$ , Prioritäten  $\Delta P$  und Handlungen  $\Delta A$ ) Konflikte eindämmen und sich durch Kooperation gegenseitig Vorteile verschaffen, was eine Stabilisierung der sozialen Interaktion ermöglicht.

Im Rahmen dieses Modells können komplexe Dynamiken der Mensch-Umwelt-Interaktion simuliert und analysiert werden, z. B. die Bildung sozialer Netzwerke und Koalitionen durch Zusammenwirken von Investitionen, Handlungen und Werten ebenso wie Ressourcennutzungs- und Transformationsprozesse. Eine Darstellung des VCX-Modells und Anwendungen in den Bereichen Umwelt und Sicherheit findet sich in Scheffran und Hannon (2007) am Beispiel von Konflikt- und Rüstungsdynamiken bis hin zu Problemen von Energie, Klimawandel und nachhaltiger Ressourcennutzung. So wurden Investitionen in verschiedene Energiepfade analysiert, in Abhängigkeit von Nutzen, Kosten, Klimaschäden und Emissionsgrenzwerten (Scheffran 2008).

### Landnutzungsmodell Schleswig-Holstein

Etablierte Instrumente zur Analyse von Landnutzung sind bioökonomische Optimierungsmodelle, die mithilfe aggregierter Nutzenfunktionen optimale Verteilungen von Getreidesorten in der Fläche bestimmen. Sie wurden beispielsweise für den Bio-

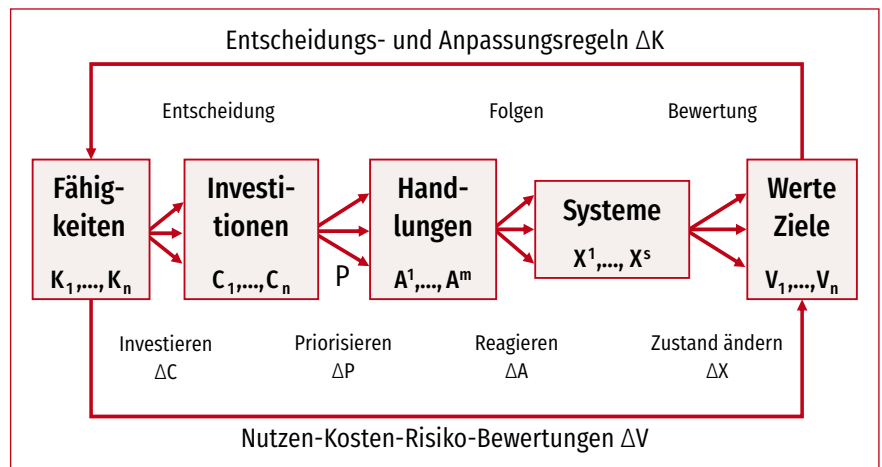


Abb. 1: Grundstruktur des VCX-Modells (Index n bezeichnet die Zahl der Akteure, m die Zahl der Handlungsoptionen, s die Zahl der Systemzustände und -variablen). Quelle: Eigene Darstellung

masseanbau und die Standortbestimmung von Bioraffinerien im US-Bundesstaat Illinois (Khanna et al. 2010) oder in der Jiangsu-Provinz in Ostchina (Shu et al. 2015) eingesetzt. Darauf aufbauend, haben wir die Potenziale der erneuerbaren Energieproduktion in Schleswig-Holstein, deren Nutzen auf Landkreisebene sowie regionale Nutzungsprobleme und -konflikte untersucht. Auf diese Weise wurden die Rahmenbedingungen ermittelt, unter denen sich die Erträge aus Windkraft und Bioenergie optimieren lassen, wenn zum Beispiel die technischen Grenzen der betreffenden Anlagen, planerische Limits (wie Mindestabstände zu Schutzgebieten) oder die begrenzte Verfügbarkeit von Kapital und Land berücksichtigt werden (Link und Scheffran 2017). Erste Modell-Simulationen auf Landesebene zeigen, dass erst bei sehr viel höheren Subventionen für Energiepflanzen als heute eine deutliche Verlagerung von Lebensmittel- zu Energiepflanzen stattfinden würde, da derzeit ausreichend landwirtschaftliche Nutzflächen vorhanden sind, um beiden Anbauzielen gerecht zu werden.

Komplementär zu Optimierungsmodellen für die zentrale Planung auf der Makroebene stehen räumliche agentenbasierte Modelle auf der Mikroebene, mit deren Hilfe sich Flächenkonkurrenzen zwischen Nahrungsmittel- und Energieproduktion vieler Akteure analysieren und im Kontext von Energiesicherheit, Klimawandel und Innovationen bei erneuerbaren Energien bewerten lassen. Dabei kommt eine räumliche Variante des agentenbasierten VCX-Modells für die Untersuchung von Energielandschaften zum Einsatz, das für die Modellierung von Landnutzungsänderungen im Kontext der Einführung von Energiepflanzen (Mais, Soja, mehrjährige Gräser) im US-Bundesstaat Illinois entwickelt wurde (Scheffran und BenDor 2009).

Die Grundannahme des Modells lautet: Individuelle Entscheidungen über die lokale Flächennutzung in geographischen Parzellen werden durch regelbasiertes Verhalten getroffen, das auf Basis individueller Prioritäten und Erwartungen eine Auswahl zwischen alternativen Anbaupfaden trifft. So entscheiden

beispielsweise Landwirte über den Anbau von Getreide und Energiepflanzen, um Gewinne in Abhängigkeit von Produktionsfaktoren, Kosten, Marktpreisen, Nachfrage und produzierten Erntemengen sowie politischen Maßnahmen wie Steuern und Subventionen zu erzielen.

Dieses Landnutzungsmodell wurde modifiziert, um zu untersuchen, wie der Bedarf an Bioenergie die Landnutzung in Schleswig-Holstein prägt und wie die Gemeinden bzw. die Energieproduzenten sich gegenseitig beeinflussen (Yang 2016). Konkret wurden 1117 Gemeinden als räumliche Entscheidungseinheiten genommen, in denen die Landwirte jährlich die Entscheidung treffen, wie sie ihre Flächen auf die vier Kulturpflanzen (Weizen, Mais, Zuckerrüben, Winterraps) für die Produktion von Nahrungsmitteln bzw. Biokraftstoffen verteilen, wobei auch die unterschiedliche Pflanzenproduktivität in den vier Landschaftstypen (Marsch, Vorgeest, Hohe Geest, Hügelland) eine Rolle spielt.

Zu den Datenquellen gehören geo-referenzierte Informationen über Schleswig-Holstein und historische Daten, die durch Geographische Informationssysteme (GIS) auf Karten dargestellt werden. Der Marktpreis für die vier Getreidesorten wird aufgrund lokal bestimmter Erntemengen und exogen vorgegebener Nachfragebedingungen bestimmt, woraus dann der potenzielle wirtschaftliche Gewinn der Landwirte, aufgeschlüsselt nach Gemeinden, abgeleitet wird. Diese Gewinnerwartungen bilden die Grundlage der Entscheidungen der Landwirte über Änderungen ihrer Flächennutzungsprioritäten, wobei die Anpassungsgeschwindigkeit durch Reaktionsstärken bestimmt wird. Daraus ergibt sich im folgenden Zeitschritt die jeweilige lokale Getreidemischung. Dieses Modell ist empirisch validiert und ermöglicht, die Landnutzungs konkurrenz für verschiedene Landschafts-, Pflanzen- und Nutzungstypen im Kontext politischer Entscheidungen zu analysieren.

## Simulation und Ergebnisse der Fallstudie

Das Modell wird mithilfe der frei zugänglichen Software Net-Logo (Wilensky 2015) simuliert, ausgehend von einer statistisch ermittelten Anfangssituation, um räumliche Verschiebungen der landwirtschaftlichen Anbaumuster im Zeitraum 2010 bis 2100 zu untersuchen (Yang 2016, vgl. Abb. 2). Gegenwärtig wird Weizen hauptsächlich in den westlichen Landesteilen und im östlichen Hügelland Schleswig-Holsteins angebaut, Mais mehr in den zentralen Geestregionen und Raps oder Zuckerrüben überwiegend im östlichen Hügelland sowie in den südwestlichen Kreisen.

Ausgehend von der Flächenverteilung des Jahres 2010 und vorgegebenen Nachfragefunktionen der Getreidesorten für Nah-

	2010	2050	2100
Weizen (Nahrung)	35,8	49,0	65,0
Mais (Nahrung)	18,9	6,1	6,6
Rüben (Nahrung)	0,4	0,1	0,1
Raps (Nahrung)	10,3	12,4	2,1
<b>Summe Nahrung</b>	<b>65,4</b>	<b>67,6</b>	<b>73,8</b>
Weizen (Energie)	9,0	12,4	16,3
Mais (Energie)	14,6	8,2	7,7
Rüben (Energie)	1,5	0,6	0,3
Raps (Energie)	9,5	11,2	1,9
<b>Summe Energie</b>	<b>34,6</b>	<b>32,4</b>	<b>26,2</b>

Tab. 1: Veränderung der Anbauflächen (in Prozent der Gesamtfläche).

Quelle: Eigene Darstellung

	absolut [in €]			prozentual [2010 = 100]	
	2010	2050	2100	2050	2100
<b>Weizen (Nahrung)</b>	134 €	190 €	120 €	41,8 %	-10,4 %
<b>Mais (Nahrung)</b>	157 €	745 €	830 €	374,5 %	428,7 %
<b>Rüben (Nahrung)</b>	366 €	1.091 €	1.164 €	198,1 %	218,0 %
<b>Raps (Nahrung)</b>	327 €	151 €	293 €	-53,8 %	-10,4 %
<b>Weizen (Energie)</b>	134 €	190 €	120 €	41,8 %	-10,4 %
<b>Mais (Energie)</b>	157 €	433 €	549 €	175,8 %	249,7 %
<b>Rüben (Energie)</b>	366 €	1.042 €	1.115 €	184,7 %	204,6 %
<b>Raps (Energie)</b>	327 €	151 €	293 €	-53,8 %	-10,4 %

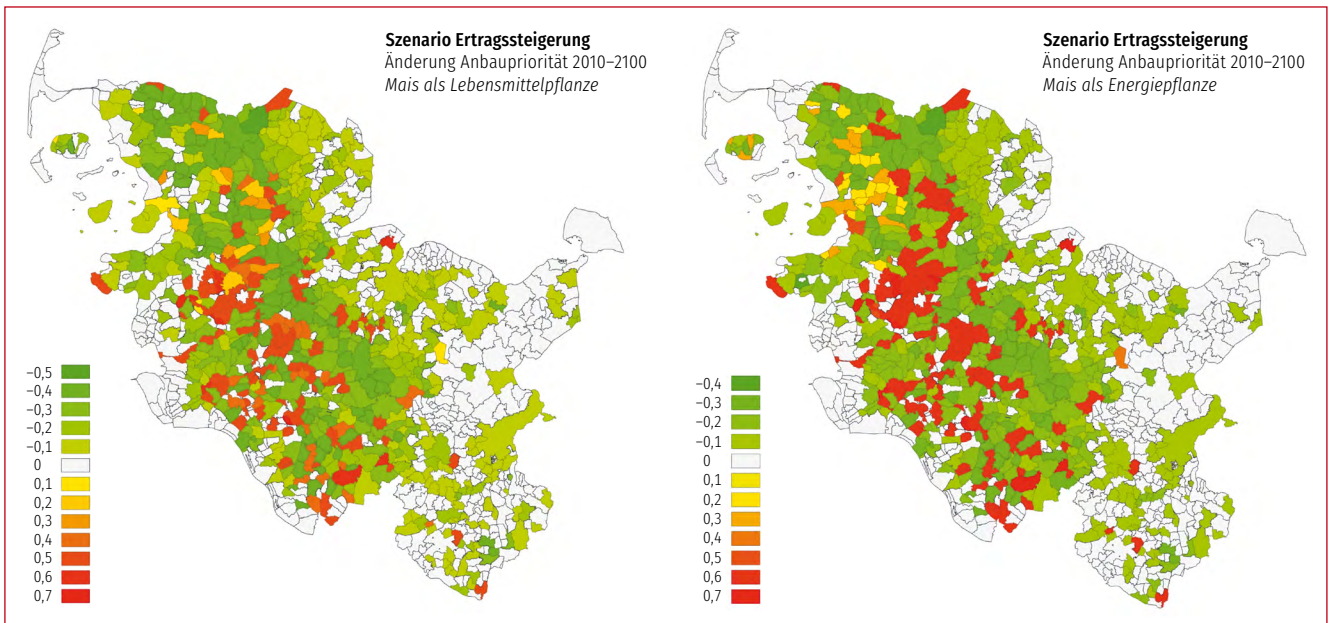
Tab. 2: Veränderung der Preise (absolut in €/t und in Prozent gegenüber 2010).

Quelle: Eigene Darstellung

und Energie, werden verschiedene Szenarien simuliert (Basiszenario; Änderung der Reaktionsstärke; Ertragssteigerung; Erweiterung von Ackerland; Subventionen), die signifikante Unterschiede zeigen. Eine beispielhafte Simulation eines Szenarios linear wachsender Erträge zeigt, welche Änderungen dies bei den Anbauflächen und den Getreidepreisen zur Folge hat. Die Fläche für Nahrungsproduktion steigt von etwa zwei Drittel bis 2100 um mehr als 8 %, und die für Energiepflanzen sinkt. Der Anteil von Weizen nimmt deutlich zu (vor allem für Nahrung), während der für Mais abnimmt. Raps nimmt leicht ab, Zuckerrüben sinken von einem niedrigen Anfangswert (vgl. Tab. 1).

Bei den Preisen zeigen sich deutliche Veränderungen von 2010 bis 2100, ausgehend von gleichen Anfangspreisen für Nahrung und Energie (Yang 2016, vgl. Tab. 2). Sie steigen deutlich für Mais und Zuckerrüben, sinken aber moderat für Weizen und Raps, nachdem Mitte des Jahrhunderts ein Maximum bzw. Minimum erreicht wird. Bei gleichen Produktionskosten erfolgt keine Differenzierung der Preise für Nahrung und Energie. In den verschiedenen Szenarien reagieren die Marktpreise und





**Abb.2:** Veränderungen der Flächenprioritäten (prozentuale Änderungen/100) für den Anbau von Mais für Nahrung (links) oder Energie (rechts) in den Gemeinden Schleswig-Holsteins zwischen 2010 und 2100 (Yang 2016). Quelle: Eigene Darstellung

Flächenanteile sensibel auf die Nachfrage und die verfügbare Ackerfläche, die Flächenerträge und Produktionskosten, auf die Reaktionsstärke von Landwirten und auf Subventionen, die zu Preissenkungen bei Energiepflanzen wie Zuckerrüben führen.

Blickt man auf die räumliche Verteilung der Flächennutzungsprioritäten (zwischen 0 für keine und 1 für volle Nutzung der Fläche pro Zelle für eine Getreidesorte), so zeigen sich am Beispiel von Mais gegenüber dem Ausgangszustand Zuwächse der Priorität von Mais für Nahrung und Energie um teilweise 50% (+0,5) in der Hohen Geest (Abb. 2), während in den meisten anderen Landesteilen Abnahmen der Priorität um bis zu 50% (–0,5) zu beobachten sind. Entsprechende Verschiebungen gibt es auch bei anderen Getreidesorten, wobei es eine deutliche Verschiebung zum Weizen gibt, dem Getreide mit den geringsten Preisen.

Dieses Szenario und andere Szenarien, die hier nicht dargestellt werden können, belegen, dass die steigende Nachfrage bei gleicher Fläche die Konkurrenz und damit das Verhältnis zwischen den Getreidesorten verschärft, die für bestimmte Anbaugebiete unterschiedlich gut geeignet sind. Nachfrage und Preise wie auch lokale Erträge und Produktionskosten beeinflussen die Gewinnerwartungen und damit die Prioritäten der Landwirte für die Getreidesorten. Weniger ausgeprägt ist die Flächenkonkurrenz zwischen der Nutzung für Nahrung und Energie, bedingt durch die anteilige Nachfrage für beide. Entsprechend steigt sogar der Anteil der Nahrungspflanzen, insbesondere bei Weizen, der überwiegend für Nahrung verwendet wird. Die anderen Pflanzen haben hingegen trotz zeitweiliger und lokaler Zunahmen insgesamt Rückgänge zu verzeichnen – bei Mais und Rüben verbundenen mit steigenden Preisen.

## Limitationen und Erweiterungen des Modells

Das vorgestellte Landnutzungsmodell für Schleswig-Holstein dient als Prototyp, um den Einfluss bestimmter Faktoren auf die Flächenverteilung und Konkurrenzen zwischen Landnutzungsoptionen zu simulieren, insbesondere den Konflikt zwischen dem Anbau von Nahrungs- und Energiepflanzen. Mit diesem Instrument ist es möglich, die Entscheidungen einer großen Zahl von Landwirten in ihren Gemeinden über die Änderung der Flächenanteile in Raum und Zeit aufgrund von lokalen Anbaubedingungen, externen Nachfragefunktionen, Marktpreisen und anderen Faktoren zu simulieren.

Für das gewählte Modelldesign sind moderate Konfliktpotenziale erkennbar. Aufgrund der steigenden Nachfrage bei begrenzter Fläche nimmt der Entscheidungsdruck zwischen den Akteuren und Alternativen zu, wobei die Flächenkonkurrenzen über den Marktpreis geregelt werden. Da nur Landwirte dargestellt werden, spielen Akzeptanzprobleme der Bevölkerung und andere Konfliktpotenziale zunächst keine Rolle. Dennoch sind lokale Brennpunkte erkennbar, bedingt durch Monokulturen einer dominierenden Getreidesorte, das Verschwinden weniger profitabler Pflanzen (und darauf spezialisierter Landwirte), die Ausbreitung von Energiepflanzen und die mögliche Verdrängung geschützter Landflächen durch steigende Nachfrage. Solche Probleme und damit verbundene Konflikte können durch politische Eingriffe, die unerwünschte Nutzungen einschränken, bewältigt werden.

Die vorgestellten Simulationen beruhen auf Vereinfachungen und Begrenzungen, die in Zukunft modifiziert werden können,

um das Modell realistischer zu machen. Statt bei jeder Getreidesorte für Nahrung und Energie gleiche Preise und bestimmte Anteile an der Gesamtnachfrage anzunehmen, können Nahrungs- und Energiemärkte separat beschrieben werden. Neben der Gewinnung von geographischen Daten mit höherer Auflösung und Genauigkeit (z. B. von Satelliten) wäre die Berücksichtigung von Klimaszenarien wichtig, die das Pflanzenwachstum (z. B. von Zuckerrüben), den Wasserhaushalt und die Wechselwirkung mit Böden (etwa von sandigen und Marschböden) oder das Verhältnis von Küstengebieten und dem Landesinneren beeinflussen.

Naheliegender ist auch die Einbeziehung weiterer erneuerbarer Energiequellen wie Windturbinen und Solarzellen oder anderer Flächennutzungen (Verkehr, Industrie, Wohngebiete, Naturschutz). Bedeutsam ist schließlich die Berücksichtigung unterschiedlicher Akteurstypen mit heterogenen Entscheidungsregeln, Reaktionsstärken und verschiedenen Wertedimensionen (z. B. Umweltrisiken und Nachhaltigkeit). Einige dieser Faktoren wurden in anderen Arbeiten bereits berücksichtigt, so in einer Studie zur agentenbasierten Modellierung von Mehrkriterien-Entscheidungen in der Stromversorgung Ägyptens (Shaaban 2017). In einer Feldstudie zur Windenergie in der Gemeinde Reußenköge an der Nordseeküste wurde empirisch ein agentenbasiertes Modell mit verschiedenen Akteurstypen entwickelt, um die Akzeptanz einer partizipativen Energiewende zu untersuchen (Süsser 2016; Süsser und Kannen 2017).

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Das vorgestellte agentenbasierte Modell ist ein Ansatz für die Untersuchung komplexer interdependenter Entscheidungsprozesse in räumlichen Kontexten. Es eignet sich für die Analyse wesentlicher Einflussfaktoren und Prozesse der Mensch-Umwelt-Interaktion in Energielandschaften, von Umwelt- und Klimabedingungen (wie Boden, Niederschläge, Wind- und Wasserverfügbarkeit) bis hin zu ökonomischen und demographischen Faktoren (Siedlungen, Produktionsanlagen, Transportsysteme). Für die Planung und politische Gestaltung von Transformationsprozessen bedeutsam ist, wie wertegesteuerte Handlungen von Akteuren die Landschaft verändern, wie diese Handlungen miteinander verbunden sind, wie sich diese Interaktion für verschiedene Szenarien verändert und wo Brennpunkte für Konflikte erneuerbarer Energien liegen. Diese unterscheiden sich von dem hohen Konfliktpotenzial fossiler und nuklearer Energieformen.

ABM ist damit als Instrument für eine Technikfolgenabschätzung im Energiesektor geeignet, die über technische, ökologische und ökonomische Aspekte der Nachhaltigkeit hinausgeht, indem sie die soziale Nachhaltigkeit von Interaktionen in den Blick nimmt und das Verständnis der Wirksamkeit politischer Einflussnahmen verbessert. Dies ist für den Erfolg der Energiewende wichtig, bei der es auch um die Akzeptanz der Bevölkerung und die Beteiligung von Akteuren geht. Solche Modelle zeigen, wie Werte und Ziele das Handeln beeinflussen (hier Gewinne von Landwirten) und welche Folgen der Wechsel zwischen Landnut-

zung und Energiepfaden hat (hier zwischen Getreidesorten und Nahrung/Energie). Damit kann ABM einen Beitrag leisten, Konflikte der Energiewende zu minimieren und kooperative Strukturen zu schaffen, die den geographischen und gesellschaftlichen Bedingungen in bestmöglicher Weise entsprechen. Ein Ziel für die Zukunft ist, daraus Anregungen für die politische Gestaltung und adaptive Governance-Konzepte zu gewinnen.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde teilweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) durch den Exzellenzcluster CliSAP gefördert.

## Literatur

- AEE – Agentur für erneuerbare Energien (2013): Potenzialatlas Bioenergie in den Bundesländern. Berlin: AEE e.V. 114 S. Online verfügbar unter <https://www.foederal-erneuerbar.de/potenzialatlas-bioenergie>, zuletzt geprüft am 1. 11. 2017.
- Arthur, W. Brian (1999): Complexity and the Economy. In: *Science* 284 (5411), S. 107–109.
- Bhattacharyya, Subhes C.; Timilsina, Govinda R. (2010): A Review of Energy System Models. In: *International Journal of Energy Sector Management* 4 (4), S. 494–518.
- Billari, Francesco; Fent, Thomas; Prskawetz, Alexia; Scheffran, Jürgen (Hg.) (2006): *Agent-Based Computational Modelling*. Heidelberg: Physica.
- Böhner, Jürgen; Dose, Astrid; Held, Hermann; Scheffran, Jürgen (Hg.) (2017): *Energielandschaften Norddeutschland*. Konferenz 2016. Energiewende im Raum. Hamburg: CEN – Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit und EEHH – Cluster Erneuerbare Energien Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.cen.uni-hamburg.de/research/documents/konferenzbroschuere-energielandschaften-2016.pdf>, zuletzt geprüft am 25. 10. 2017.
- Deutscher Bundestag (2000): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes. In: *Bundesgesetzblatt* Nr. 13, S. 305–309.
- Deutscher Bundestag (2011): *Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*. 16. Ausschuss. Berlin: Deutscher Bundestag. Online verfügbar unter <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/17/063/1706361.pdf>, zuletzt geprüft am 25. 10. 2017.
- EU – Europäische Kommission (2015): *The Paris Protocol: A Blueprint for Tackling Global Climate Change Beyond 2020*. Brüssel: Europäische Kommission. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/international/paris\\_protocol/docs/com\\_2015\\_81\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/international/paris_protocol/docs/com_2015_81_en.pdf), zuletzt geprüft am 25. 10. 2017.
- FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2017): *Bioenergy in Germany: Facts and Figures 2016*. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. Online verfügbar unter [http://www.biobasedeconomy.nl/wp-content/uploads/2017/03/Bioenergy\\_in\\_Germany\\_facts\\_and\\_figures\\_2016.pdf](http://www.biobasedeconomy.nl/wp-content/uploads/2017/03/Bioenergy_in_Germany_facts_and_figures_2016.pdf), zuletzt geprüft am 1. 11. 2017.
- IANUS – Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit (1996): *Energiekonflikte*. In: *Wissenschaft & Frieden* 22. Online verfügbar unter <http://www.wissenschaft-und-frieden.de/seite.php?dossierID=048>, zuletzt geprüft am 25. 10. 2017.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2011): Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Genf: Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

Khanna, Madhu; Scheffran, Jürgen; Zilberman, David (2010): Handbook of Bioenergy Economics and Policy. New York: Springer.

Link, P. Michael; Schlepner, Christine (2007): Agricultural Land Use Changes in Eiderstedt: Historic Developments and Future Plans. In: Coastline Reports 9, S. 197–206. Online verfügbar unter [http://databases.eucc-d.de/files/documents/00000296\\_Artikel18\\_Link\\_Schlepner.pdf](http://databases.eucc-d.de/files/documents/00000296_Artikel18_Link_Schlepner.pdf), zuletzt geprüft am 25.10.2017.

Link, P. Michael; Schlepner, Christine (2011): How Do Tourists Perceive and Accept Changes in Landscape Characteristics on the Eiderstedt Peninsula? In: Coastline Reports 17, S. 133–146. Online verfügbar unter <http://databases.eucc-d.de/plugins/documents/index.php?show=1100&listid=206056>, zuletzt geprüft am 25.10.2017.

Link, P. Michael; Scheffran, Jürgen (2017): Impacts of the German Energy Transition on Coastal Communities in Schleswig-Holstein, Germany. In: Regions Magazine 307 (1), S. 9–12.

Matthews, Robin; Gilbert, Nigel; Roach, Alan; Polhill, J. Gary; Gotts, Nick (2007): Agent-Based Land-Use Models: A Review of Applications. In: Landscape Ecology 22 (10), S. 1447–1459. DOI 10.1007/s10980-007-9135-1.

MELULR-SH – Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (Hg.) (2017): Erneuerbare Energien in Zahlen für Schleswig-Holstein. Kiel: Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein. Online verfügbar unter [http://www.schleswig-holstein.de/DE/Schwerpunkte/Energiewende/Daten/pdf/EE\\_Bilanz\\_2015.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](http://www.schleswig-holstein.de/DE/Schwerpunkte/Energiewende/Daten/pdf/EE_Bilanz_2015.pdf?__blob=publicationFile&v=6), zuletzt geprüft am 25.10.2017.

Scheffran, Jürgen; Hannon, Bruce (2007): From Complex Conflicts to Stable Cooperation: Cases in Environment and Security. In: Complexity 13 (2), S. 78–91.

Scheffran, Jürgen (2008): Adaptive Management of Energy Transitions in Long-Term Climate Change. In: Computational Management Science 5 (3), S. 259–286.

Scheffran, Jürgen; BenDor, Todd (2009): Bioenergy and Land Use: A Spatial-Agent Dynamic Model of Energy Crop Production in Illinois. In: International Journal of Environment & Pollution 39 (1–2), S. 4–27.

Schlepner, Christine; Link, P. Michael (2008): Potential Impacts on Important Bird Habitats in Eiderstedt (Schleswig-Holstein) Caused by Agricultural Land Use Changes. In: Applied Geography, 28 (4), S. 237–247.

Shaaban, Mostafa (2017): The Roadmap to Energy Security in Egypt. Dissertation an der Universität Hamburg. Online verfügbar unter <http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2017/8835>, zuletzt geprüft am 17.11.2017.

Shu, Kesheng; Schneider, Uwe; Scheffran, Jürgen (2015): Bioenergy and Food Supply: A Spatial-Agent Dynamic Model of Agricultural Land Use for Jiangsu Province in China. Energies 8 (11), S. 13 284–13 307. DOI: 10.3390/en8112369.

Süsser, Diana (2016): People-Powered Local Energy Transition: Mitigating Climate Change with Community-Based Renewable Energy in North Frisia. Dissertation, Universität Hamburg. Online verfügbar unter <http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2016/8034/pdf/Dissertation.pdf>, zuletzt geprüft am 25.10.2017.

Süsser, Diana; Kannen, Andreas (2017): „Renewables? Yes, please!“. Perceptions and Assessment of Community Transition Induced by Renewable-Energy Projects in North Frisia. In: Sustainability Science 12 (4), S. 563–578.

Wilensky, Uri (2015): NetLogo. Evanston: Northwestern University. Online verfügbar unter <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>, zuletzt geprüft am 25.10.2017.

Yang, Jinxi (2016): Agent-Based Modeling of Pathways of Energy Landscapes in Northern Germany. M. A. Thesis, School of Integrated Climate System Sciences, Universität Hamburg.

Zoll, Ralf (Hg.) (2002): Energiekonflikte: Problemübersicht und empirische Analysen zur Akzeptanz von Windkraftanlagen. Berlin: LIT-Verlag.



**PROF. DR. JÜRGEN SCHEFFRAN**

ist Professor für Geographie an der Universität Hamburg und Leiter der Forschungsgruppe Klimawandel und Sicherheit im CLISAP Exzellenzcluster und Zentrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN).



**DR. P. MICHAEL LINK**

ist Postdoc in der Forschungsgruppe Klimawandel und Sicherheit (CLISEC) an der Universität Hamburg. Als Geograph erforscht er potenzielle soziale Konflikte beim Ausbau erneuerbarer Energien in Norddeutschland, insbesondere in den Küstenregionen Schleswig-Holsteins.



**DR. MOSTAFA SHAABAN**

ist Mitglied der Forschungsgruppe Klimawandel und Sicherheit an der Universität Hamburg. Im Oktober 2017 promovierte er dort am Institut für Geographie über Wege zur Energiesicherheit Ägyptens.



**DR. DIANA SÜSSER**

ist assoziierte Wissenschaftlerin an der Universität Hamburg und arbeitet derzeit als Projektmanagerin für Sustainable Business beim WWF. Sie promovierte am Helmholtz-Zentrum Geesthacht über die lokale Energiewende.



**JINXI YANG**

studierte Meteorologie und Integrated Climate System Science in Beijing und Hamburg. Derzeit arbeitet sie am Chinese National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation.