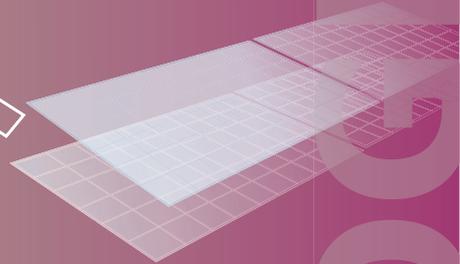
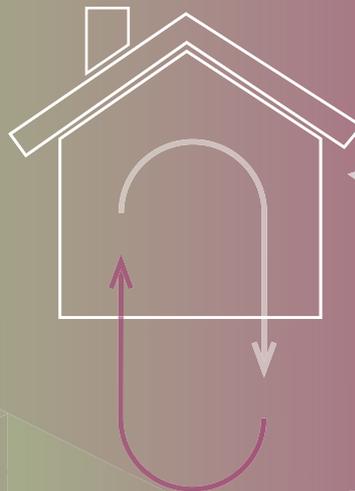
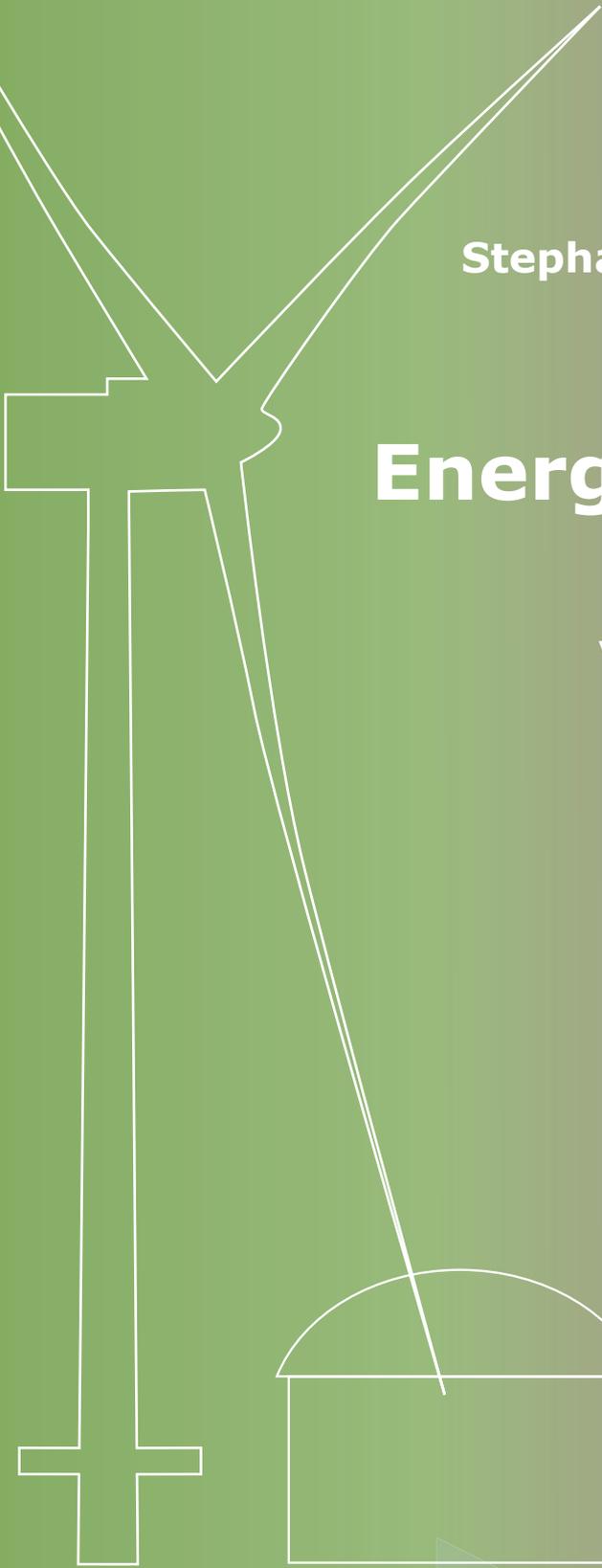


GEOGRAPHICA AUGUSTANA

Stephan Bosch, Lucas Schwarz,
Matthias Schmidt

Energiegeographie von **A** bis **Z**



UNA

Universität Augsburg
Institut für Geographie

Band 28

GEOGRAPHICA AUGUSTANA

**Energiegeographie
von A bis Z**

Augsburg 2019

ISSN 1862-8680

ISBN 3-948283-01-8

Copyright © 2019 Institut für Geographie, Universität Augsburg
Alle Rechte vorbehalten

Universität Augsburg
Institut für Geographie
Lehrstuhl für Humangeographie
Alter Postweg 118
86159 Augsburg

Gefördert durch

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Umschlaggestaltung, Layout: Simone Hufeld
Textverarbeitung: Stephan Bosch, Lucas Schwarz, Simone Hufeld

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3	Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo)	46
Abkürzungsverzeichnis	4	Naturstromspeicher	47
A kteure	5	Nennleistung	48
A kzeptanz	5	Netto-Stromerzeugung	48
A mortisation	7	Netzausbau	48
A nlagenbetreiber	8	Netzbetreiber	49
A utarkie	9	Netzebenen	50
B auleitplanung	10	Netzparität	52
B lockheizkraftwerk (BHKW)	10	NIMBY	52
B ioenergie	12	O nline-GIS	53
B ruttostromerzeugung	13	Pariser Klimaabkommen	54
B ruttostromverbrauch	13	Peak-Oil	54
B ürgerenergie	13	Prognosen	55
C O ₂ -Emissionen	14	Photovoltaik	56
C radle-to-Cradle	15	Postfossilismus	58
D esertec	16	Potenzial	58
D igitalisierung	17	Power-to-Gas	60
E EG	18	Prosumenten	62
E EX	18	CO ₂ -Se Q uestrierung	63
E lektromobilität	19	Räumlich-zeitliche Kompression	64
E nergiedeterminismus	20	Regionalplanung	66
E ndenergie	20	Repowering	67
E nergieimporte	20	Sektorenkopplung	68
E nergie	22	SMART	68
E nergiespeicherung	23	Smart Grid / Smart Meter	68
E ntropie	23	Solarthermie	69
E ntwicklungsländertechnologien	26	Stromeinspeisegesetz (StromEinspG)	70
E rneuerbare Energien	26	Stromerzeugung und -verbrauch	70
E xterne Kosten	28	Strompreis	71
E nergieverbrauch	28	SuedLink	71
F lächerertrag	30	T hermodynamik	72
F ossilismus	30	Umspannwerke	73
G eothermie	31	Volllaststunden	73
G estehungskosten	31	Wasserkraft	74
G rüner Kapitalismus	33	Windenergie – Onshore	74
I nstallierte Leistung	34	Windenergie – Offshore (Deutschland)	78
I nvestitionen	36	Windenergie – Projektentwicklung	80
K enngrößen	37	Windparklayout	82
K ombikraftwerk	37	WindPRO	85
K onversionsflächen	38	Power-to- X	85
K raft-Wärme-Kopplung	39	Zentralität vs. Dezentralität	86
L andschaftsästhetik	40	Ziele	87
L astgang im Stromnetz	41	Aktuelle Forschung am Lehrstuhl	88
L iberalisierter Strommarkt	42	Weiterführende Literatur	91
M eresenergie	43	Quellenverzeichnis	92
M erit-Order-Effekt	45		

Vorwort

Der anthropogen verursachte Klimawandel stellt die gegenwärtigen und künftigen Gesellschaften weltweit vor große Herausforderungen. Während vor allem die Bewohner des Globalen Nordens durch einen nahezu seit über zwei Jahrhunderten stetig steigenden Energieverbrauch maßgeblich zur Verursachung des Klimawandels beigetragen haben und beitragen, sind es insbesondere die Bevölkerungen im Globalen Süden, die von den negativen Folgen wie einer signifikanten Zunahme von Naturkatastrophen, verstärkten Dürreperioden oder dem Anstieg des Meeresspiegels betroffen sind. Tagtäglich trägt unser ressourcenintensiver und klimabelastender Lebensstil ungebrochen zum Klimawandel und zur Degradation der Umwelt bei. Die Folgen scheinen für uns noch nicht offensichtlich, gefährden jedoch die Lebensunterhaltssicherung von Millionen Menschen im Globalen Süden schon heute in dramatischer und immer öfters auch in existentieller Weise.

Neben dem Klimawandel bedingt die Erschöpfung fossiler Ressourcen die Notwendigkeit zur Änderung der Energiepolitik und -nutzung. Die Herausforderungen sind immens. Dies bedeutet, dass sich etwas bewegen muss, wobei hier neben der Politik und Wirtschaft auch die Gesellschaft und das heißt auch jedes Individuum als Konsument angesprochen ist.

Auf die Herausforderung von Klimawandel und Ressourcenknappheit reagierten die verschiedenen Bundesregierungen mit der sogenannten Energiewende, die einen Umstieg der Energieversorgung auf regenerative Energien vorsieht. Weltweit beachtet und beobachtet sonnte sich die Bundesrepublik zunächst als vermeintlicher Pionier und Energiemusterland im Glanze dieser angekündigten Energiewende, scheitert bei der Erfüllung der selbst gesteckten Ziele jedoch kläglich.

Der Wissenschaft kommt die Aufgabe zu, Kenntnisse über die Zusammenhänge von Ressourcennutzung, Energieerzeugung und -verbrauch mit den ökologischen und sozioökono-

mischen Folgen zu generieren. Zudem kann und soll sie dazu beitragen, Lösungen zu entwickeln, wie eine echte nachhaltige Energiewende aussehen und wie somit die Externalisierung unseres Lebensstils auf Kosten der Umwelt und oftmals auch auf Kosten marginalisierter Gesellschaften reduziert werden könnte.

Die rechtlichen und institutionellen Rahmenbedingungen muss jedoch die Politik vorgeben. In Anbetracht der gewaltigen Risiken und Herausforderungen hat sie hierzu in den vergangenen Jahren zu wenig Mut bewiesen. Akteure der Wirtschaft können nach Maßgabe wissenschaftlicher Erkenntnisse und im Rahmen institutioneller Vorgaben neue Technologien entwickeln und die notwendigen Maßnahmen umsetzen, die zu einer echten Energiewende führen und mittelfristig zu einer klimaneutralen Lebens- und Wirtschaftsweise beitragen.

In diesem Sinne kann man nur hoffen, dass die von der Wissenschaft erarbeiteten Erkenntnisse nicht aufgrund profitorientierter Interessen oder mangelndem Änderungswillen ignoriert oder diskreditiert werden, dass die Wirtschaft diese Herausforderung annimmt und ihre Chancen in diesem vielversprechenden Feld erkennt und dass die Politik den notwendigen Mut an den Tag legt, die notwendigen Reformen und Maßnahmen umzusetzen.

Das vorliegende Heft wurde vom Team der Geographischen Energieforschung am Lehrstuhl für Humangeographie und Transformationsforschung der Universität Augsburg erstellt und liefert einen Überblick über zentrale Begriffe, Ansätze, Technologien und Politiken zum Thema Erneuerbare Energien. In diesem Sinne soll dieses Heft als Nachschlagewerk nicht nur Anregungen geben, sondern möglichst auch einen kleinen Beitrag zu einer unsere Lebensgrundlagen schonenden Energieerzeugung und -nutzung liefern.

Matthias Schmidt

im Juli 2019

Abkürzungsverzeichnis

AEE

Agentur für Erneuerbare Energien

AWZ

Ausschließliche Wirtschaftszone

BauGB

Baugesetzbuch

BHKW

Blockheizkraftwerk

BImSchG

Bundesimmissionsschutzgesetz

BMWi

Bundesministerium für Wirtschaft
und Energie

BNatSchG

Bundesnaturschutzgesetz

BWE

Bundesverband Windenergie

CCS

Carbon Capture and Storage

CPV

Concentrated Photovoltaics

CSP

Concentrated Solar Power

ct/kWh

Cent pro Kilowattstunde

dena

Deutsche-Energie-Agentur

DFG

Deutsche Forschungsgemeinschaft

DII

Desertec Industrial Initiative

EE

Erneuerbare Energie(n)

EEG

Erneuerbare-Energien-Gesetz

EEX

European Energy Exchange

EG

Energiegenossenschaft

EVU

Energieversorgungsunternehmen

FFH

Flora-Fauna-Habitat

GIS

Geographisches Informationssystem

GWh

Gigawattstunde

ha

Hektar

HGÜ

Hochspannungsgleichstromübertragung

J

Joule

kV

Kilovolt

kW

Kilowatt

kWh

Kilowattstunde

KWK

Kraft-Wärme-Kopplung

LEP

Landesentwicklungsprogramm

MW

Megawatt

MW_{el}

Megawatt, elektrische Leistung

MW_{th}

Megawatt, thermische Leistung

NaWaRo

Nachwachsende Rohstoffe

Nm

Normvolumen

PJ

Petajoule

PV

Photovoltaik

RÖE

Rohöleinheiten

StromEinspG

Stromeinspeisegesetz

TWh

Terawattstunde

UBA

Umweltbundesamt

WEA

Windenergieanlage(n)

Akteure

Eine Vielzahl an Akteuren ist bei der Umsetzung der Energiewende involviert. Diese Akteure unterscheiden sich aufgrund ihrer Funktionen, Interessen und Positionen. Fligstein und McAdam (2012) haben dazu die *Theory of Fields* aufgestellt, um Akteure besser beschreiben zu können. Diese werden hierbei in drei Arten unterteilt: Amtierende Akteure (*Incumbents*), herausfordernde Akteure (*Challengers*) und Governanceakteure (*Internal Governance Units*). Die amtierenden Akteure haben einen starken Einfluss auf das Energiesystem und deren Meinung wirkt stark auf die Entscheidungen der Governanceakteure ein. Diese überwachen das Akteursfeld. Die herausfordernden Akteure haben weniger Einfluss im System und stellen keine lineare Weiterentwicklung des bestehenden Systems dar. Im Akteurssystem agieren alle Akteure untereinander und deren Beziehungen sind stark abhängig von aktuellen politischen sowie wirtschaftlichen Entwicklungen.

In Deutschland ist die Stromerzeugung momentan durch eine Oligopolstruktur gekennzeichnet. Die vier großen Energieversorgungsunternehmen, die durch Vereinigungsprozesse im Rahmen der Liberalisierung des Strommarktes entstanden sind (RWE, E.ON, Vattenfall und EnBW), vereinen circa 46,9% der installierten Kraftwerksleistung auf sich und lassen sich somit in die Kategorie der amtierenden Akteure einordnen. Auch die Industrie (v.a. energieintensive Industrie) stellt einen wichtigen Akteur im Rahmen der Energiewende dar, da diese in Zusammenarbeit mit starken Lobbyverbänden einen erheblichen Einfluss auf die Entscheidungen der Regierungen ausüben kann. Zu den herausfordernden Akteuren zählen neu entstandene Akteure, wie Bürgerinitiativen, Bürgergenossenschaften, Regionalversorger und Stadtwerke. Die Governanceakteure sind v.a. im Bereich der Politik zu finden. Diese treffen wichtige Entscheidungen und verabschieden Gesetze, die alle Akteure beeinflussen, wie zum Beispiel die Gesetzesinitiative zum EEG oder die Entscheidung zum Ausstieg aus der Atomenergie.

Quellen: Fligstein, McAdam 2012; Geels 2011

Akzeptanz

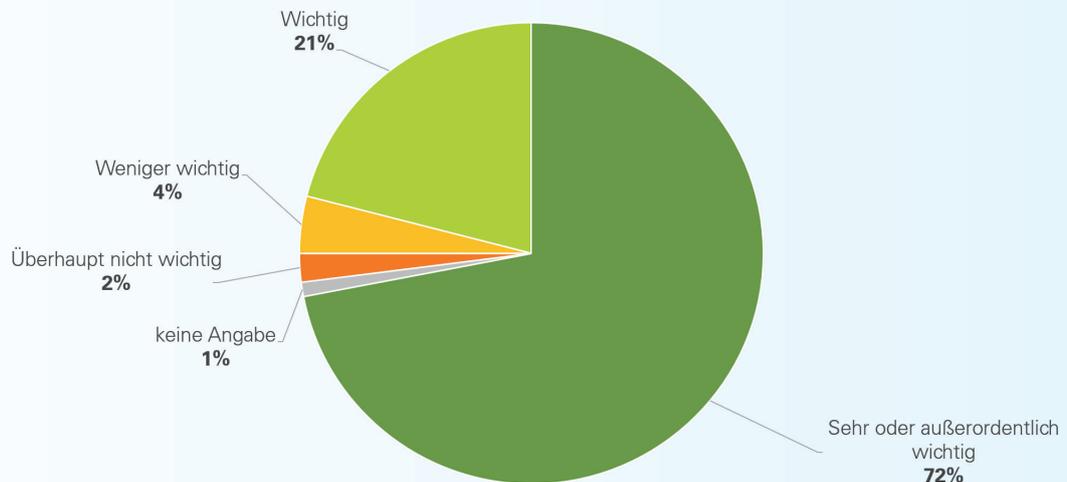
Akzeptanz wird definiert als die Bereitschaft in der Gesellschaft, etwas zu Befürworten. Im Zuge des Ausbaus der erneuerbaren Energien spielt Akzeptanz eine essenzielle Rolle, stellt sie doch einen zentralen Faktor im Hinblick auf die Realisierungswahrscheinlichkeit von Energieprojekten dar. Dies liegt daran, dass erneuerbare Energien im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken in ungleich größerer Anzahl errichtet werden und dabei, aufgrund ihrer dezentralen Anordnung, stärker in die Alltagswelten und Aktionsräume der in ländlichen Regionen lebenden Menschen eindringen. Akzeptanzmindernde Effekte resultieren dabei aus der starken Überformung des Landschaftsbildes, der Technisierung von Natur, aus den Geruchs- und Lärmemissionen sowie einer unzureichenden Einbindung von Anwohnern in die Planungsprozesse, aus dem erhöhten Transportaufkommen und aus einer prinzipiellen Ablehnung gegen den Ausbau erneuerbarer Energien. Die wichtigste akzeptanzfördernde Maßnahme stellt die demokratische Einbindung der Bürger in die Planungsprozesse dar (Partizipation), die ihren Ausdruck in Form von Informationsveranstaltungen, Mitsprache bei Planungen und finanzieller Teilhabe (persönlich oder Kommune) findet.

Die Bedeutung von Akzeptanz geht aus zahlreichen wissenschaftlichen Studien hervor (z.B. Devine-Wright 2005; Van d. Horst 2007; Aitken 2010). Musall und Kuik (2011) führten eine der wichtigsten Studien zur Akzeptanz durch und konstatieren, dass vor allem finanzielle Partizipation positive Auswirkungen auf die Zustimmung zu EE-Projekten hat. Aitken (2010) relativiert und betont, dass Akzeptanz nicht erkaufte werden darf, sondern seitens der Projektentwickler ein echtes Interesse an den Belangen der Anwohner bestehen muss.

Regelmäßig werden Erhebungen zur allgemeinen Einstellung der Bevölkerung Deutschlands zum Thema erneuerbare Energien durchgeführt. Dabei wird erhoben, wie wichtig der Ausbau der Erneuerbaren von der Bevölkerung empfunden wird (siehe Abbildung) und wie hoch die Zustimmung zu EE-Anlagen in der eigenen Umgebung ist.



Stärkere Nutzung und Ausbau Erneuerbarer Energien sind...



Einstellung der Bevölkerung gegenüber einer verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien

Quelle: nach AEE 2018a

Prinzipiell sieht der Großteil der Befragten den Ausbau von erneuerbaren Energien als sehr wichtig an (72%). Auch die Zustimmung zu Anlagen in der Umgebung des Wohnortes ist hoch: Allgemein finden 63% der Befragten erneuerbare Stromerzeugung in der Nachbarschaft eher gut bzw. sehr gut. Die Photovoltaik hat dabei die höchsten Zustimmungswerte von 77%, die Windenergie die zweithöchsten mit 55% und die Bioenergie die niedrigsten mit circa 40%.

Akzeptanz stellt vor allem in der Planungsphase einer Energieanlage eine wichtige Größe dar, wo-

bei verschiedene Formen der Partizipation (Mitsprache, Information, Teilhabe) möglich sind, um die Akzeptanz zu fördern. Autoren wie Ried et al. (2017: 211) argumentieren jedoch, dass die „Partizipation im Bereich der Transformation der Energiesysteme [...] sich dann am ehesten bewähren [wird], wenn die Kontroversen nicht durch die (imaginierte) Akzeptanz einer Mehrheit überdeckt, sondern offen ausgetragen werden können.“

Quelle: AEE 2018a; Musall und Kuik 2011; Ried et al. 2017

Amortisation

Energetisch

Die energetische Amortisationszeit beschreibt die Betriebszeit, die benötigt wird, um den Energieverbrauch, der während Produktion, Transport und Aufbau der Anlage sowie am Ende des Lebenszyklus (Abbau und Entsorgung) entsteht, auszugleichen. Die von den Herstellern angegebene Lebenszeit liegt bei allen EE-Anlagen i.d.R. bei 20 Jahren. Die Amortisationszeit der unterschiedlichen Anlagen differiert jedoch stark. Die Angabe der energetischen Amortisation ist bei fossilen bzw. konventionellen Kraftwerken im Gegensatz zu den regenerativen Kraftwerken nicht möglich. Grund dafür ist die kontinuierliche Zufuhr von energetischen Rohstoffen, um den Kraftwerksbetrieb bewerkstelligen zu können. Die Laufzeit von konventionellen Kraftwerken wird durchschnittlich mit 40 Jahren angegeben.

Finanziell

Damit sich eine Anlage finanziell amortisiert, müssen die Gewinne aus der Betriebszeit die Investitionskosten und laufenden Betriebskosten decken. Dazu gehören vor allem die entstandenen Kosten aus der Beschaffung, Installation und Finanzierung, aber auch die Versicherung der Anlage sowie Reparaturkosten. Ab dem Zeitpunkt der finanziellen Amortisation kann eine Energieanlage Gewinne und somit Rendite erzielen. Sobald die Anlageneinnahmen die Investitions- und Fixkosten übersteigen, hat sich eine Energieanlage finanziell amortisiert.

Die finanzielle Amortisation ist abhängig von der Höhe der Investitionskosten, aber auch von der Höhe der Vergütung pro Kilowattstunde, der installierten Leistung, der Effizienz, der Betriebsstunden und der tatsächlichen Stromproduktion.

Quelle: Peyke et al. 2013; Quaschnig 2018a

Energieträger	Energetische Amortisationszeit	finanzielle Amortisationszeit
Geothermie	7 – 10 Monate	10 – 20 Jahre
Photovoltaik	15 - >100 Monate	8 – 10 Jahre
Solarthermie	5 – 32 Monate	20 Jahre
Wasserkraft	9 – 13 Monate	20 – 25 Jahre
Windenergie	3 – 23 Monate	10 Jahre

Amortisation erneuerbarer Energien

Quelle: Peyke et al. 2013

Anlagenbetreiber

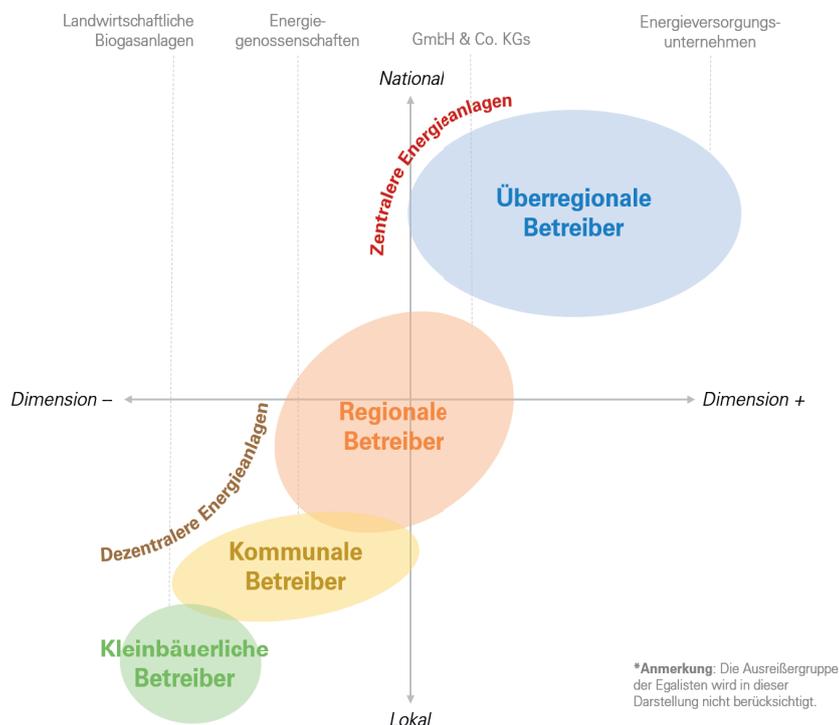
Staatliche Institutionen wie Städte und Kommunen, aber auch Unternehmen, Landwirte und Privatpersonen können durch Investitionen in erneuerbare Energieanlagen Anlagenbetreiber sein. Dabei trägt der Anlagenbetreiber die gesamte Verantwortung für den sicheren Betrieb der elektrischen Anlage und gibt zudem die Regeln und Randbedingungen der Organisation vor. Der Anlagenbetreiber kann der Eigentümer, Besitzer, Unternehmer oder eine benannte Person sein, die die Unternehmerpflichten wahrnimmt (ROE 2019).

Im Rahmen des DFG-Projektes „Raumverträglicher Ausbau von erneuerbaren Energien“ wurde eine umfassende Befragung von Anlagenbetreibern in der Planungsregion Augsburg (Bayern) und Lausitz-Spreewald (Brandenburg) zu deren Verhalten und Entscheidungsgrundlagen beim Ausbau von erneuerbaren Energien durchgeführt (Bosch 2018). Dabei wurde eine Clusteranalyse erstellt, um die Anlagenbetreiber in verschiedene Gruppen einzuteilen und die damit in

Zusammenhang stehenden räumlichen Implikationen sowie die spezifischen Verhaltensweisen besser verstehen zu können.

Insgesamt konnten vier Betreibergruppen voneinander abgegrenzt werden: Überregionale Betreiber, Regionale Betreiber, Kommunale Betreiber sowie Kleinbäuerliche Betreiber. Diese Betreibergruppen unterscheiden sich hauptsächlich hinsichtlich des Parameters „Dimension“ (Anlagengröße, Eingriff in das Landschaftsbild, Volumen der Betreibergesellschaft) sowie im Hinblick auf die Bedeutung des lokalen räumlichen Planungskontextes.

Durch die Klassifizierung der Anlagenbetreiber ist es gelungen, betreiberspezifische Verhaltensweisen sowie damit in Zusammenhang stehende räumliche Implikationen besser verstehen und entsprechende Handlungsempfehlungen für den weiteren Ausbau von Energieanlagen auf den Weg bringen zu können.



Spektrum von Anlagenbetreibern erneuerbarer Energien

Quelle: Eigene Darstellung

Autarkie

Autarkie leitet sich vom altgriechischen αὐτάρκεια (autárkeia) ab und bedeutet Selbstständigkeit bzw. Selbstgenügsamkeit. Autark sein beschreibt daher den Zustand der völligen Selbstversorgung, ohne die Zuhilfenahme von Ressourcen oder Dienstleistungen aus externen Quellen. Im energetischen Sinne bedeutet Autarkie, dass eine Region sich selbstständig mit Energie versorgen kann, ohne Energie (bspw. über Stromnetze oder in Form von Rohstoffen) importieren zu müssen.

Hierbei lassen sich unterschiedliche Grade der Energieautarkie feststellen: Die **tendenzielle** Energieautarkie beschreibt den Zustand, in dem eine Region die Tendenz zu einer dezentralen Energieversorgung aufweist, Energieautarkie jedoch nicht als explizites Ziel formuliert hat. Bei der **bilanziellen** Energieautarkie, auch **weiche** Autarkie genannt, ist eine Region über einen einjährigen Zeitraum autark, nutzt jedoch die überregionale Netzinfrastruktur, um Schwankungen zwischen Angebot und Nachfrage ausgleichen zu können. Die stärkste Form der Autarkie ist die **komplette** Energieautarkie. Dabei ist eine Region bei der Energieversorgung von ihrem Umfeld abgetrennt und deckt die Energienachfrage allein aus eigenen Quellen. Beim Anstreben, Autarkie tatsächlich anzustreben, werden jedoch schnell die Systemgrenzen deutlich. Diese hängen mit der Einwohner- und Gebäudeanzahl sowie der zu versorgenden Fläche zusammen. Ein Beispiel für Autarkie im Wärme- und Stromsektor auf Basis erneuerbarer Energien ist Island. Der Primärenergieverbrauch von 250,6 PJ konnte im Jahre 2017 durch Geothermie (152,2 PJ), Wasserkraft (50,6 PJ) sowie zu kleinen Anteilen aus Öl (42,2 PJ), Kohle (4,8 PJ) und Wind (0,00004 PJ) gedeckt werden (Orkustofnun 2018). Aufgrund des Erdölimports besteht in Island eine weiche Autarkie.

Quelle: McKenna et al. 2015; Orkustofnun 2018

B

Bauleitplanung

Im Mehrebenensystem der deutschen Raumplanung stellt die Bauleitplanung die konkrete Planungseinheit auf kommunaler Ebene dar. Somit umfasst die Bauleitplanung die Gesamtheit aller Planungsmöglichkeiten, die eine Kommune innehat und die für den gesamten Gemeindebereich gelten. Die Hauptaufgabe besteht darin, die Nutzung der Gemeindegrundstücke vorzubereiten und zu leiten. Da auch erneuerbare Energieanlagen eine bauliche Maßnahme auf Grundstücken im Gemeindebesitz darstellen, werden diese durch die Bauleitplanung geregelt. Die Bauleitplanung unterliegt den übergeordneten Planungsebenen, wie der Regionalplanung, und hat sich deren Zielen anzupassen (Anpassungszwang). Jedoch besitzt sie eine kommunale Planungshoheit in der konkreten Ausgestaltung. Instrumente der Bauleitplanung sind der Flächennutzungsplan, der Bebauungsplan sowie Städtebauliche Verträge.

Privilegierung im Außenbereich

In §35 Abs. 1 BauGB werden bestimmte Vorhaben im Außenbereich von Gemeinden als privilegierte Vorhaben definiert, wozu Wind- und Wasserkraftanlagen, Solaranlagen auf Dach- und Außenwandflächen (Anlage muss dem Gebäude baulich untergeordnet sein) sowie Anlagen zur energetischen Biomassennutzung (Vorhaben muss in einem räumlich-funktionalen Zusammenhang mit dem landwirtschaftlichen Betrieb stehen) zählen. Die Privilegierung sieht dabei vor, dass diese Vorhaben immer zulässig sind, solange keine öffentlichen Belange entgegenstehen und die Erschließung der benötigten Flächen ausreichend gesichert ist. Zu den öffentlichen Belangen zählen beispielsweise Naturschutz, Landschaftspflege, Bodenschutz, Denkmalschutz, Hochwasserschutz, Immissionsschutz, die natürliche Eigenart der Landschaft und ihr Erholungswert sowie das Orts- und Landschaftsbild.

Flächennutzungsplan

Der Flächennutzungsplan stellt die vorbereitende Bauleitplanung dar. In diesem werden sämtliche Flächennutzungen für das Gemeindegebiet, wie zum Beispiel Wohn-, Gewerbegebiete oder Infrastrukturflächen, festgelegt. Die Aufstellung

eines Flächennutzungsplans ist jedoch keine Pflicht und hat somit gegenüber den Bürgern keine unmittelbare Rechtswirkung.

Bebauungsplan

Im Gegensatz zum Flächennutzungsplan stellt der Bebauungsplan die verbindliche Bauleitplanung dar. Alle Festlegungen, die im Bauleitplan getroffen werden, sind unmittelbar rechtsverbindlich. Der Bebauungsplan konkretisiert die Festlegungen, die bereits im Flächennutzungsplan getroffen wurden, kann jedoch auch aufgestellt werden, wenn kein Flächennutzungsplan vorhanden ist. Der Bebauungsplan entfaltet im Kontext der erneuerbaren Energien eine entscheidende Steuerungswirkung, da in ihm bspw. die maximale Höhe von Windkraftanlagen oder eine Pflicht zur Nutzung von erneuerbaren Energien beim Gebäudebau festgelegt werden kann.

Städtebauliche Verträge

Für erneuerbare Energien ist die Nutzung von Städtebaulichen Verträgen bedeutsam, wenn es um Festlegungen im Bereich der Erzeugung, Verteilung, Nutzung oder Speicherung von Strom, Wärme bzw. Kälte im Städtebau geht. So können Städte festlegen, dass Neubauten mit Photovoltaikanlagen auszustatten sind oder ausschließlich Bürgerwindkraftanlagen errichtet werden dürfen.

Quelle: Schneider und Boenigk 2012

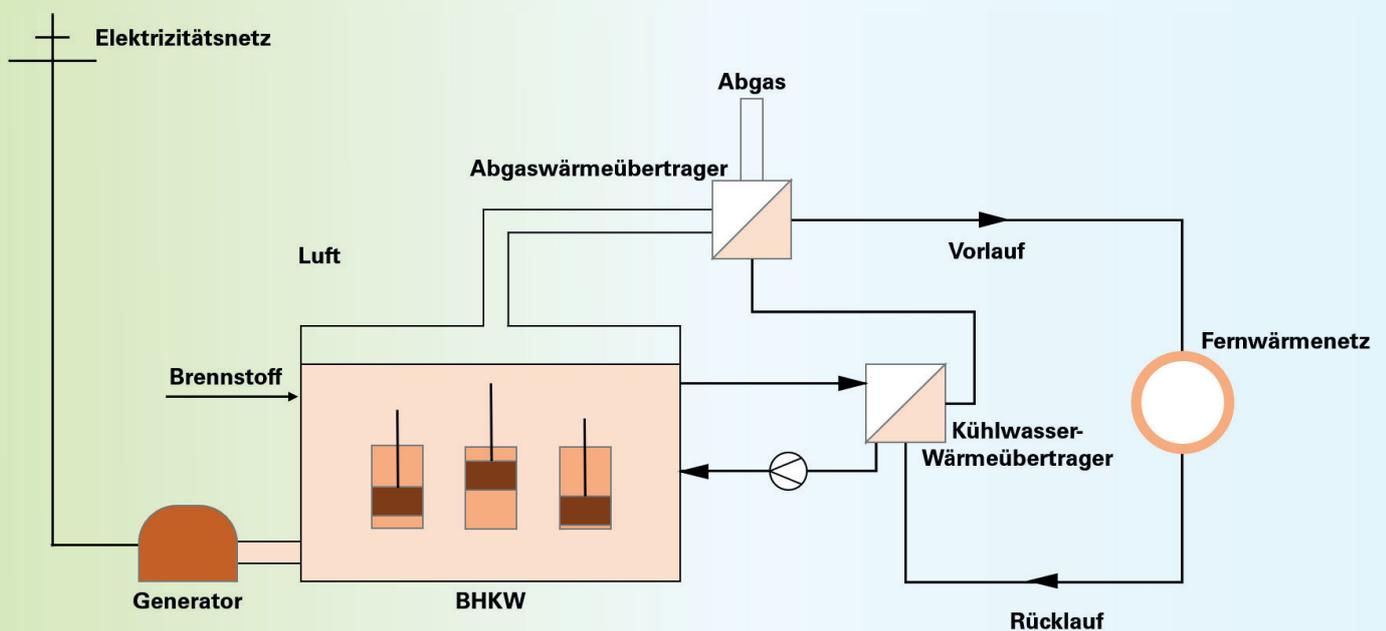
Blockheizkraftwerk (BHKW)

BHKWs stellen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zur Strom- und Wärmeproduktion dar, die im Leistungsbereich unter 10 MWel. liegen. Dabei wird der Kraftwerksprozess durch einen Verbrennungsmotor (Otto-, Diesel- oder Stirlingmotor) betrieben. Um Wärme mit einem BHKW produzieren zu können, wird ein Wärmetauscher genutzt, der die Abwärme aus dem Stromproduktionsprozess nutzbar macht. Die dabei gewonnene Wärme kann zum Heizen oder zur Warmwasseraufbereitung genutzt werden.

Es existieren unterschiedliche Leistungsklassen, wobei der generelle Aufbau stets gleich ist:

- Mikro-BHKW $\leq 2 \text{ kW}_{\text{el}}$ – Einsatz v.a. in Einfamilienhäusern
- Mini-BHKW $\leq 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ – Einsatz v.a. in Mehrfamilienhäusern
- Klein-BHKW $\leq 2 \text{ MW}_{\text{el}}$ – Einsatz in Wohnblöcken
- BHKW $\leq 10 \text{ MW}_{\text{el}}$ – Einsatz als Großkraftwerk

Nahezu alle gängigen Brennstoffe, wie Diesel, Biodiesel, Heizöl, Erdgas, Biogas oder Holzpellets, können durch ein BHKW verwertet werden. Der Vorteil eines BHKWs liegt dabei in der verbrauchsnahen Umwandlung von Primärenergie in Nutzenergie. Somit können Verluste vermieden werden, die sich aus der räumlichen Übertragung ergeben. Der Betrieb eines BHKWs ist wirtschaftlich, sobald ein entsprechender Wert an Volllaststunden pro Jahr erreicht wird. Im Allgemeinen liegt eine typische Volllastbetriebszeit für ein BHKW bei ca. 4.000 Volllaststunden.



Schematische Darstellung eines BHKW

Quelle: nach Wesselak et al. 2017

Um einen optimalen Betrieb zu ermöglichen, bedarf ein wärmegeführtes BHKW einer hohen thermischen Grundlast bei einem gleichzeitig hohen Strombedarf. Dies ist beispielsweise in einem Hallenbad oder Gewerbebetrieb der Fall. Hierbei kann ein Überschuss an Strom bestehen, der dann in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird. Bei einem stromgeführten BHKW stellt die Stromlast die Führungsgröße dar. Somit gibt es keinen Überschuss, der ins Netz eingespeist werden kann, und es wird lediglich für den Eigenbedarf produziert. Um die Energieeffizienz zu steigern, bestehen beim BHKW un-

terschiedliche Möglichkeiten. Eine davon stellen finanzielle Investitionen in neue Wärmeerzeuger oder in die Wanddämmung dar. Die Einsparungen zeigen sich jedoch nicht unmittelbar, sondern über die gesamte Lebensdauer der Nutzung (ca. 10-20 Jahre).

Der Wirkungsgrad von BHKWs richtet sich nach dem Brennstoff, der genutzt wird. Bei einem Erdgas-BHKW kann ein elektrischer Wirkungsgrad von 38% und ein thermischer Wirkungsgrad von 49% erreicht werden.

Quelle: WBZU 2019; Wesselak et al. 2017; Zahoransky 2015

B

Bioenergie

Die Bioenergie umfasst die Energieerzeugung auf Basis von Biomasse, wobei zwischen Anbau-biomasse (Energiepflanzenbau) und Biomasse aus Reststoffen (z.B. Küchenabfälle, Erntereste, Schachtrückstände, Trester) unterschieden wird. Agrarpflanzen, die dabei häufig zur Energiegewinnung genutzt werden, sind Mais, Weizen, Roggen, Zuckerrüben, Raps, Sonnenblumen und Ölpalmen. Diese sog. nachwachsenden Rohstoffe (Energie- + Industriepflanzen) stammen zu meist aus der Forstwirtschaft oder der Landwirtschaft und werden eigens auf Flächen angebaut oder fallen als Nebenprodukt an. Neben einjährigen Energiepflanzen gibt es mehrjährige Energiepflanzen, die auf sog. Kurzumtriebsplantagen angebaut und erst nach 3-10 Jahren geerntet werden (z.B. Zitterpappel, Balsampappel), um danach wieder von selbst am Stock auszutreiben (DRL 2006).

Ein großer Vorteil der Bioenergie besteht in der Möglichkeit, die Grund- und Spitzenlast decken zu können. Dies ist aufgrund ihrer Speicherbarkeit, bspw. in Form von Biotreibstoff, Silage oder Holzpellets, möglich. Zudem kann mittels Bioenergie sowohl der Strommarkt als auch der Wärme- und Kraftstoffmarkt bedient werden. Die Bioenergie stellt damit eine flexibel einsetzbare regenerative Energieform dar.

Um Bioenergie nutzen zu können, gibt es drei Möglichkeiten der Umwandlung: Bei der **thermo-chemischen Umwandlung** ist der Konversionspfad abhängig vom gewünschten Endprodukt (fester, flüssiger oder gasförmiger Sekundärenergieträger). Feste Biomasse lässt sich mittels Verkohlung in feste Brennstoffe umwandeln, mittels Vergasung in gasförmige Brennstoffe und mittels Pyrolyse in flüssige Brennstoffe.

Bei der Verarbeitung von Ölsaaten und Ölpflanzen wird häufig die **physikalisch-chemische Umwandlung** betrieben. Dabei wird Pflanzenöl durch das Auspressen von Ölsaaten gewonnen, wobei die Heißpressung in zentralen Ölmöhlen oder die Kaltpressung in dezentralen Ölmöhlen zum Einsatz kommt. Diese zentralen Ölmöhlen können dabei am Tag bis zu 4.000 t Ölsaaten pressen und somit raffiniertes Pflanzenöl herstellen.

In vielen dezentralen Biogasanlagen kommt die **bio-chemische Umwandlung** zum Einsatz. Dabei zersetzen Bakterien die Biomasse, um aus dem zucker- oder stärkehaltigen Material Bioethanol bzw. Biogas zu erzeugen. Das Biogas entsteht mittels anaerober (Abwesenheit von Sauerstoff) Zersetzung von Energiepflanzen in einem sog. Fermenter.

Quellen: BEE 2018; DCTI 2010; DRL 2006; Umweltbundesamt 2018

Erzeugte Strommenge	51,4 Mrd. kWh
Anteil am Stromverbrauch	8,5 %
Erzeugte Wärmemenge	140,6 Mrd. kWh
Anteil am Wärmeverbrauch	11,3 %
Biokraftstoffproduktion	30,35 Mrd. kWh
Anteil am Kraftstoffverbrauch	4,6 %
CO ₂ -Vermeidung	64,3 Mio. t
Arbeitsplätze	105.600
Branchenumsatz	12,1 Mrd. €

Branchenzahlen Bioenergie 2017

Quelle: nach BEE 2018

Bruttostromerzeugung

Als Bruttostromerzeugung wird jene Menge elektrischer Arbeit bezeichnet, die in einem Kraftwerk an den Generator клемmen erzeugt wird. Regional betrachtet beinhaltet die Bruttostromerzeugung die elektrische Arbeit, die in sämtlichen Kraftwerken erzeugt wird, inklusive Eigenverbrauch, Speicher- und Netzverlusten. Der Begriff ist abzugrenzen von der Nettostromerzeugung, die die Differenz zwischen der insgesamt erzeugten elektrischen Energie (Bruttostromerzeugung) eines oder mehrerer Kraftwerke und dem Eigenbedarf dieser Kraftwerke darstellt.

Quelle: ChemgaPedia 2018

Bruttostromverbrauch

Der Bruttostromverbrauch bezeichnet die gesamte Strommenge, die in einer Region verbraucht wird. Darin sind Transportverluste, der Kraftwerksbedarf und sonstige Verbräuche enthalten.

Quelle: BMWi 2018a

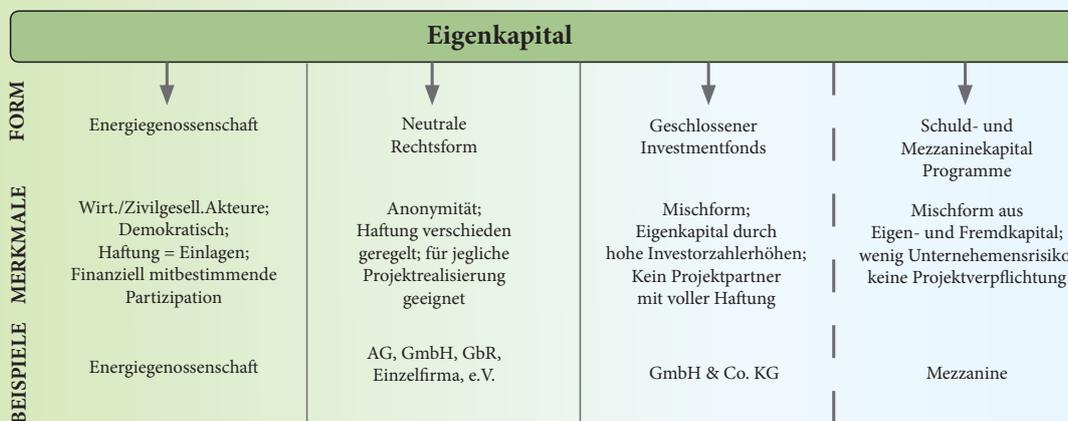
Bürgerenergie

Der Begriff Bürgerenergie (engl. Community Energy) ist ein Sammelbegriff für eine Vielzahl an Möglichkeiten für Bürgerinnen und Bürger, Energieprojekte im Bereich regenerativer Energieerzeugung zu realisieren. Nach Holstenkamp (2018) sind hierbei jene BürgerInnen gemeint, die sich direkt finanziell an Anlagen beteiligen (i.d.R. mit Eigenkapital) und zudem in geographischer Nähe zum Anlagenstandort wohnen. In Deutschland gibt es eine Vielzahl an Finanzierungsmodellen für Bürgerenergieanlagen. Hier kommen für Bürgerenergieanlagen unterschiedliche Rechtsformen in Frage. Dabei wird je nach Zielen und Umfang entschieden, wie die Anlagen organisiert sein sollen. Eine Besonderheit stellen dabei die Energiegenossenschaften

(EG) dar. Im Zeitraum von 2000 bis 2013 wurden in Deutschland 800 EGs gegründet, die 200.000 BürgerInnen und ein Investitionsvolumen von 800 Millionen Euro umfassten. Beispiele für die Bürgerenergie stellen die Bürgerwind Berg GmbH & Co. KG, die Bürger-Energie-Genossenschaft Neuburg-Schrobenhausen-Aichach-Eichstätt eG oder der Bürgerwindpark Wildpoldsried dar. Bei den erneuerbaren Energien macht die Bürgerenergie einen großen Anteil der installierten Leistung aus. 31,5% der installierten Leistung befanden sich 2016 im Besitz von Privatpersonen.

Quelle: AEE 2018b; Becker et al. 2012; Holstenkamp 2018;

Ohlhorst 2016; Walk 2014; Yildiz 2014

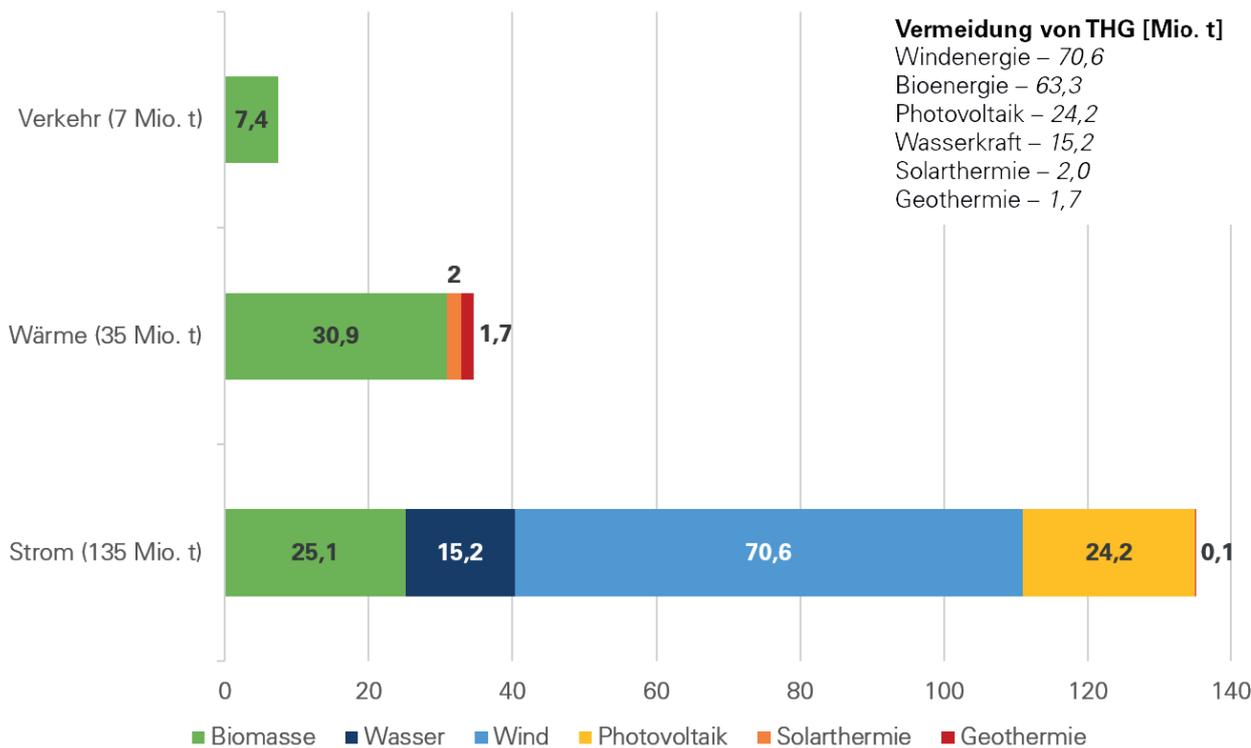




CO₂-Emissionen

Bei der Verbrennung von energetischen Rohstoffen wird das klimawirksame Gas CO₂ freigesetzt. Die Bundesregierung hat sich daher das Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2020 um 40%, bis 2030 um 55%, bis 2040 um 70% und bis 2050 um 80-95% zu reduzieren (im Vergleich zum Referenzjahr 1990). Momentan besteht eine Minderung um ca. 27% (Stand 2016). Nach einer Nahzeitprognose des Umweltbundesamtes konnten die Treibhausgasemissionen 2017 im Vergleich zum Vorjahr um 0,5% gesenkt werden. Durch die verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energieträgern konnten 2017 ca. 177 Mio. t CO₂-Äquivalente vermieden werden.

Quelle: Bundesregierung 2018; Umweltbundesamt 2018b, c



Vermeidung von CO₂-Emissionen 2017 durch EE-Anlagen je Energiesektor

Quelle: nach Umweltbundesamt 2018c

Cradle-to-Cradle

Kallis (2011:874) bestreitet die Möglichkeit des Wunders einer entmaterialisierten Wirtschaft, da die Effizienzgewinne durch den steigenden Konsum überkompensiert werden. Wenngleich die Entmaterialisierung einem Wunder gleichkommen würde, so arbeiten Forscher dennoch daran, die materialisierte Wirtschaft ökologisch auszurichten. Dabei geht es darum, Umweltschutz völlig neu zu definieren, denn Umweltschutz wird heutzutage auf den Versuch verengt, Prozesse und Produkte weniger schädlich zu gestalten (Mulhall, Braungart 2010). Umweltschutz verstanden als weniger zerstören, weniger Müll produzieren, weniger Energie verbrauchen und weniger Auto fahren macht es angesichts von Wachstum dennoch erforderlich, das Konsumverhalten einzuschränken. Dass hierbei ein grenzenloses Wachstum selbst unter erheblichen Steigerungen der Effizienz unmöglich erscheint, ist unbestreitbar. Nach McDonough und Braungart (2013) wird das Falsche optimiert. Prozesse und Produkte weniger giftig oder weniger verschwenderisch zu gestalten, beseitigt nicht die ökologischen Probleme Gift und Verschwendung. Diese Verbesserung falscher Systeme birgt aufgrund der potenziellen Entstehung eines neuen Massenmarktes für umweltfreundlichere und effizientere Produkte die Gefahr, dass sich die ungewollten Wirkungen im Zuge eines Rebound-Effektes sogar noch verstärken. Ein Massenmarkt an umweltverträglicheren Produkten würde dann wieder zu einem massenhaften Gift- und Abfallaufkommen führen, wobei die entsorgten Rohstoffe zudem kaum wiederverwertet würden. Das entscheidende Problem besteht folglich darin, dass Produkte wie Schuhsohlen, Waschmittel, Autoreifen, Fernsehgeräte, Waschmaschinen etc. ausschließlich für die Technosphäre hergestellt werden. Jenseits der Technosphäre, nach Beendigung der Nutzung dieser Produkte, ist keine Nützlichkeit mehr gegeben. So ist Kupfer in technologischen Systemen nahezu beliebig einsetzbar und hilfreich, in biologischen Systemen kann der Rohstoff jedoch sehr giftig sein. Ziel muss es daher sein, Produkte so zu gestalten, dass sie auch in der Biosphäre und damit im Anschluss an die technische Nutzung einsetzbar sind. Hierzu bedarf es des Aufbaus eines verbindenden Nährstoffmanagements für

die Techno- und Biosphäre. Der Blick ist daher auf jene Innovationen zu richten, die das gegenwärtige Paradigma von Umweltschutz aufbrechen, indem sie Produkte und Prozesse realisieren, die eine nützliche stoffliche Verbindung zwischen Techno- und Biosphäre schaffen. Beispielhaft hierfür steht das österreichische Unternehmen Gugler, das die weltweit erste Druckerei darstellt, die Druckerzeugnisse ohne schädliche Inhaltsstoffe und ausschließlich mit Substanzen herstellt, die wieder in den biologischen Kreislauf rückgeführt werden können (Gugler GmbH 2018). So werden die anfallenden Schlämme wieder der Biosphäre zugeführt, auch die Asche von verbrannten Druckprodukten kann bedenkenlos als Düngemittel wiederverwertet werden. Cradle-to-Cradle-Systeme eröffnen folglich die Möglichkeit, wirtschaftliche Aktivitäten mit einem hohen Durchsatz an Ressourcen wesentlich ökologischer zu gestalten und das menschliche Wirtschaften wieder näher an die Biosphäre heranzuführen.

Quelle: Kallis 2011; Gugler GmbH 2018; McDonough und Braungart 2013; Mulhall und Braungart 2010



Quelle: pixabay.com

D

Desertec

Um den globalen Herausforderungen Energiesicherheit und Klimaschutz begegnen zu können, wurde im Jahr 2009 – unter Mitwirkung der Zivilgesellschaft sowie großer Unternehmen wie Munich RE, Deutsche Bank, Siemens, E.ON und RWE – die Desertec Industrial Initiative (DII) ins Leben gerufen.

Die Vision der Initiative ist simpel: Der Westen und viele Schwellenländer der Erde benötigen zuverlässige und saubere Energie. Für die Länder des globalen Südens ist eine konstante Energieversorgung essenziell, um Wohlstand aufbauen und die Nahrungsmittel- und Trinkwasserproduktion sicherstellen zu können. In den westlichen Industrienationen geht es hingegen eher um den raschen Aufbau eines postfossilen Energiesystems sowie um die Diversifizierung der Energieversorgung. Desertec sollte hierzu einen wichtigen Beitrag leisten, indem Solarstrom aus den Wüstengebieten der Erde über ein interkontinentales Stromnetz weltweit verteilt wird. Denn die Wüsten der Erde empfangen innerhalb von 6 Stunden so viel Sonnenenergie, wie die Mensch-

heit innerhalb eines Jahres verbraucht. Die Technologien, die bei der Erschließung dieses Potenzials eine entscheidende Rolle spielen sollten, gehören zur Familie der sog. Konzentrierten Solarenergie (CSP), wie Parabolrinnenkollektoren, Fresnelkollektoren, Dish-Stirling-Kollektoren und Solartürme. Darüber hinaus war es aber auch das Ziel, entsprechend den jeweils nationalen natürlichen Potenzialen Windenergie, Wasserkraft, Bioenergie und Geothermie in den Stromverbund miteinzubeziehen. Der Transport der gewonnenen Energie sollte mittels Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung erfolgen, um den Strom möglichst verlustarm über weite Strecken transportieren zu können. Dadurch hätten auch die weit entfernten Verbrauchszentren, wie die energiehungrigen europäischen Agglomerationsräume, wirtschaftlich mit Wüstenstrom versorgt werden können.

Desertec stellt zweifelsohne eine großtechnische Vision dar, die eine starke Faszination ausübt, bietet sie doch scheinbar eine attraktive Lösungsstrategie für die grundlegenden Probleme der Menschheit an. Dennoch sehen Kritiker in dem Projekt auch eine Form des Neokolonialismus und lehnen die Vereinnahmung der Wüstengebiete zur Stillung des Energiehungers wirtschaftsstarker Länder strikt ab. Zehn Jahre nach Gründung der DII ist ohnehin nur noch wenig übrig von der ursprünglichen Vision eines globalen Stromverbundes und die Länder im Norden Afrikas verfolgen inzwischen eher eigene Interessen in Bezug auf die Nutzung ihres Solarpotenzials oder haben mit politischer Instabilität zu kämpfen. Das große Potenzial bleibt jedoch bestehen und wird mittelfristig möglicherweise zu einer Wiederbelebung der großtechnischen Vision Desertec führen.

Quelle: DESERTEC Foundation 2018; Schmitt 2012



Quelle: pixabay.com

Digitalisierung

Durch die Verabschiedung des Gesetzes zur Digitalisierung der Energiewende wurde der Startschuss für die flächenhafte Implementierung von Smart Grid, Smart Meter und Smart Home in Deutschland gegeben. Dabei soll eine neue digitale Infrastruktur eine Verbindung zwischen 1,5 Mio. Stromerzeugern und Stromverbrauchern schaffen. Intelligente Messsysteme dienen dabei als Kommunikationsplattform, um das Stromversorgungssystem an die Voraussetzungen der Energiewende angleichen zu können. Ein zentraler Kritikpunkt dabei ist jedoch der Datenschutz, v.a. die Sicherheit vor Hackern.

Smart Grid

Smart Grid stellt den Oberbegriff für eine optimale Verknüpfung von Stromproduktion, Stromtransport und Lastmanagement im Kontext der Energiewende dar. Durch eine automatisierte Netzbetriebsführung soll dabei die Integration von erneuerbaren Energien, die nicht selten einen intermittierenden Charakter aufweisen, ins Netz optimiert werden. Ein wichtiger Bestandteil ist dabei das Smart Meter.

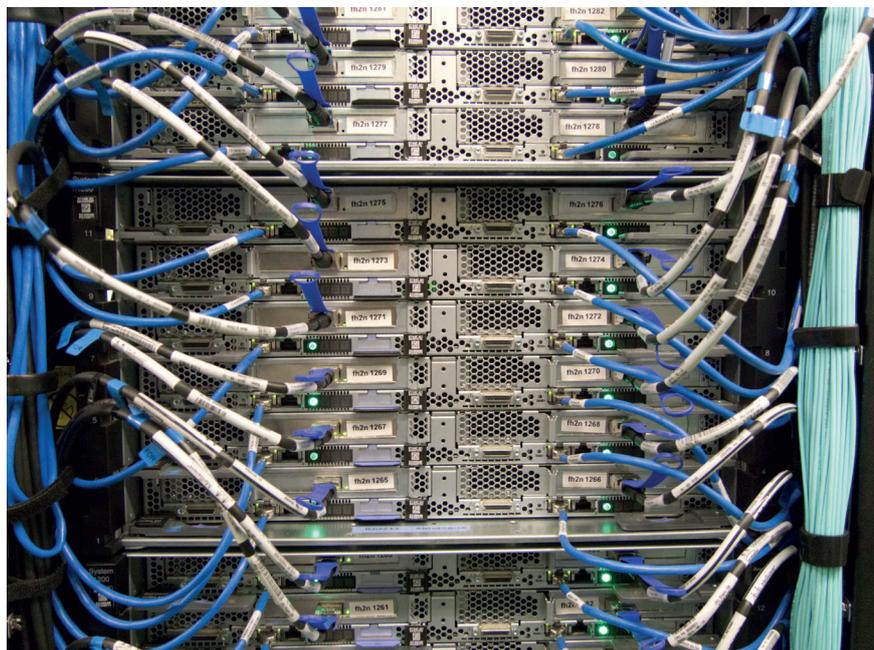
Smart Meter

Seit 2010 ist im Energiewirtschaftsgesetz geregelt, dass Neubauten und Gebäude, die grundsanitiert werden, mit einem digitalen Stromzähler ausgestattet werden müssen. Im Vergleich zu herkömmlichen Stromzählern können digitale Stromzähler nicht nur die Menge des Verbrauchs, sondern auch den genauen Zeitpunkt des Verbrauchs erfassen. Es besteht hierbei die Möglichkeit, die erhobenen Daten direkt an den Stromversorger zu übermitteln. Somit können zeitnah Verbrauchs- und Kostenprognosen erstellt werden, mit dem Ziel, Kosteneinsparungen für den Endverbraucher zu ermöglichen. Diese Funktionen und Prozesse werden als Smart Metering bezeichnet. In Zukunft sollen dadurch Effizienzpotenziale erschlossen werden.

Smart Home

Der Begriff *Smart Home* bezeichnet die Integration neuester Technologie in Wohnhäusern, um diese energieeffizient zu gestalten. Dazu gehört die Nutzung von *Smart Metern*, die Integration in ein *Smart Grid* und die Nutzung von vernetzten Elektronikgeräten (z.B. Wasch- oder Spülmaschinen). In einem *Smart Home* ist die Energienutzung dahingehend optimiert, dass die Energie genutzt wird, wenn deren Produktion am günstigsten ist. Dies ist der Fall, wenn ein großer Anteil von erneuerbaren Energien gedeckt wird, wenn gerade viel Strom produziert wird (Sturmtief, sonnige Hochdruckphase) und/oder wenn die Last sehr gering ist (v.a. nachts).

Quelle: AEE 2012, 2018c; BMWi 2018b; Harper 2003



Quelle: pixabay.com

E

EEG

Das Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (kurz: EEG) ist der Nachfolger des Stromerzeugungsgesetzes (1990) und trat am 01. April 2000 in Kraft. Die wichtigsten Inhalte des EEG sind folgende:

- Das Ziel des EEG ist es, den Klima- und Umweltschutz durch die Nutzung einer nachhaltigen Energieversorgung zu stärken. Dabei sollen v.a. fossile Energieressourcen geschont und erneuerbare Energieträger genutzt werden.
- Der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch soll bis 2025 auf 40-50%, bis 2035 auf 55-60% und bis 2050 auf mindestens 80% ansteigen. Diese Ziele dienen dazu, den Anteil der EE am Bruttostromverbrauch bis 2020 auf 18% zu erhöhen.
- Strom aus regenerativen Energiequellen wird vorrangig in das Verteilsystem eingespeist (Abnahmegarantie).
- Das EEG regelt die Vergütungshöhe für Strom aus EE. Diese wird seit 2017 in wettbewerbsorientierteren Ausschreibungsverfahren ermittelt.

Das EEG 2000 stellt die rechtliche Grundlage für die zunehmende Nutzung von erneuerbaren Energien in Deutschland dar. In ihm wurde auch die Abnahmepflicht von regenerativ erzeugter Energie festgeschrieben. Diese erfolgte zunächst ohne Deckelung. Die Einführung der EEG-Umlage stellt einen wichtigen Bestandteil des EEG 2000 dar. Diese beschreibt die Differenz aus Fördersumme und Börsenerlös und wird mit dem Strompreis verrechnet. Dadurch konnte eine konstante Vergütung für Anlagenbetreiber erneuerbarer Energien sichergestellt und eine hohe Planungssicherheit für 20 Jahre gewährleistet werden. Bereits vier Jahre später erfolgte die erste Novellierung des EEG (2004). Hierbei wurden quantitative Ziele für die Nutzung der Erneuerbaren festgelegt und Anreize zur Nutzung bestimmter Energiearten gesetzt (z.B. Nawa-Bonus).

Im Jahr 2010 wurde aufgrund der dynamischen Entwicklung der Solar-Branche die Förderung für die Photovoltaik verringert, um eine Über-

förderung zu verhindern. Zusätzlich wurde die Vergütung für gebäudeintegrierte PV-Anlagen gesenkt und ein Ausbauziel von 3000 MW pro Jahr festgelegt. Ziel der Novelle von 2010 war es, die Vergütungssysteme den aktuellen Marktbedingungen anzupassen.

Bereits 2012 wurde, ausgelöst durch das Atomunglück in Fukushima ein Jahr zuvor, das EEG mittels neuer Zielsetzungen novelliert, die bis heute noch aktuell sind. Zusätzlich wurde die Direktvermarktung an der Strombörse EEX in Leipzig für die Erneuerbaren eingeführt. Um wiederum eine Marktverzerrung zu verhindern, wurde 2014 erneut eine Reduzierung der Förderung beschlossen. Außerdem wurden jährliche Ausbaukorridore für einzelne Technologien festgelegt, um den weiteren Ausbau geregelt fortführen zu können.

Die aktuelle Novelle des EEG (2017) stellt eine grundlegende Neuerung im Vergleich zu den bisherigen Novellierungen dar. Bestanden bisher immer festgelegte Vergütungshöhen sowie Abnahmegarantie, wurde 2017 ein Ausschreibungsmodell für erneuerbare Energien eingeführt. Dabei wird zu einem bekannten Termin ein fixes Volumen (z.B. 20 MW) ausgeschrieben, worauf sich jegliche Projektierer mit einem Preis pro Kilowattstunde bewerben können. Der Bieter mit dem niedrigsten Preis erhält jeweils den Zuschlag und kann die Anlage im Anschluss realisieren. Der ursprünglich planwirtschaftliche Charakter des EEG weicht damit zunehmend einem marktorientierten Modell.

Quelle: BMVJ 2017; BMWi 2016; Döring 2015; Illing 2016; Ohlhorst 2016

EEX

Die European Energy Exchange Börse stellt die größte europäische Energiebörse dar. Sie unterliegt dabei dem deutschen Börsengesetz und stellt ein Regelwerk dar, das für alle Teilnehmer verbindlich ist. Dazu gehören die Börsenordnung, die Handelsbedingungen, die Kontraktpezifikationen, die Zulassungsordnung

und der Code of Conduct. Im täglichen Geschäft wird unterschieden zwischen *Terminmarkt* und *Spotmarkt*.

Der **Terminmarkt** zeichnet sich durch langfristige Strukturen aus. Dabei können Jahres-, Quartals oder Monatskontrakte erworben und gehandelt werden. Der Terminmarkt ist somit für die längere Planung geeignet. Der **Spotmarkt** (Spotmarkt, Day-Ahead Markt und Intraday-Markt) zeichnet sich hingegen durch seine Kurzfristigkeit aus. Dabei werden Kontrakte für den kommenden Tag oder für denselben Tag gehandelt. Somit können Lieferengpässe oder Überschüsse ausgeglichen werden. 2017 wurden an den Strommärkten der EEX-Group insgesamt 3.760,7 TWh Strom gehandelt. Der Anteil des Spotmarktes lag bei 543,3 TWh (~7%).

Quelle: EEX 2018a, b

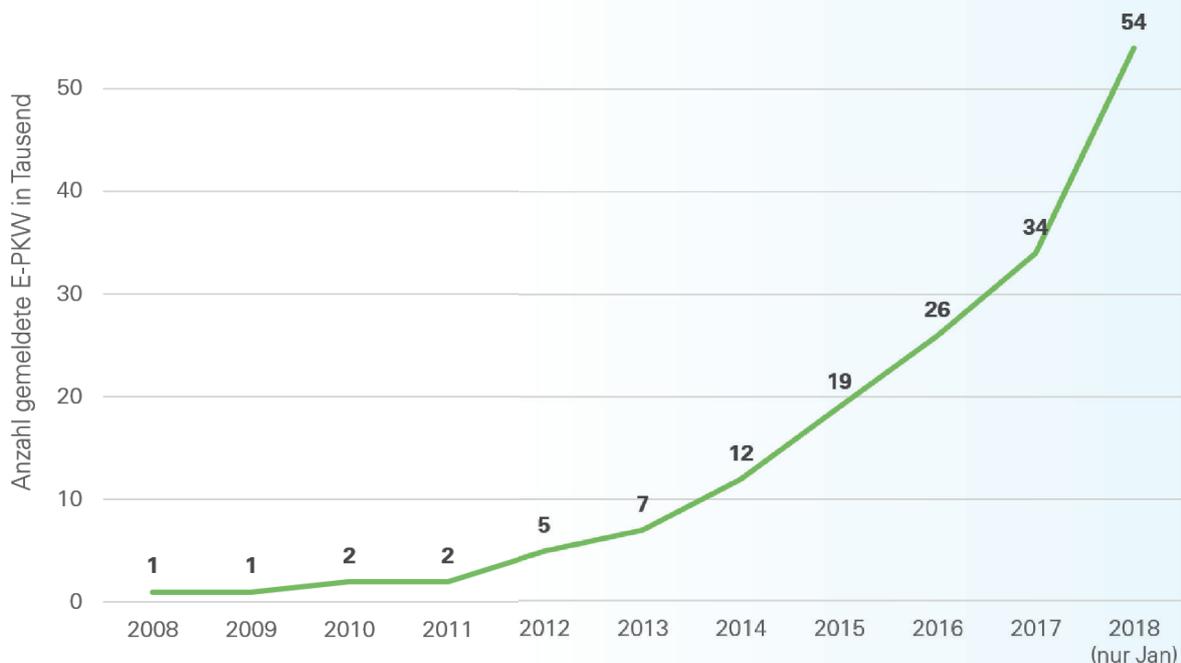
Elektromobilität

Ein bedeutender Markt der Energiewende ist neben dem Strom- und Wärmesektor der Bereich Verkehr. Bereits 2009 formulierte die Bundesregierung das Ziel, dass 2020 eine Millionen Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen fahren

sollen. Momentan sind 29 verschiedene Elektroautomodelle von deutschen Autoherstellern auf dem Markt. Ein entscheidender Vorteil der Elektromobilität ist der fast emissionsfreie Verkehr. Hinzu kommen ein geringer Verbrauch und eine niedrige Geräuschkulisse. Darüber hinaus können Elektroautos mithilfe des eingebauten Akkus Schwankungen im Stromnetz, bedingt durch die volatilen Energieträger, ausgleichen. Hier besteht jedoch weiterer Forschungs- und Investitionsbedarf, um belastbare und haltbare Batterien zu schaffen. Nachteile gegenüber den konventionellen Antriebstechnologien sind eine geringere Reichweite und ein hoher Anschaffungspreis. Letzterer wird sich im Zuge der Entstehung eines Massenmarktes zumindest mittelfristig sukzessive verringern.

Zum Stichtag am 01.01.2018 waren in Deutschland insgesamt 53.861 Elektroautos, 44.419 Plug-In Hybridautos und 236.710 Hybridfahrzeuge gemeldet. Um dennoch das ehrgeizige Ziel von einer Millionen Elektrofahrzeugen bis 2020 in Deutschland zu erreichen, hat die Bundesregierung 2017 insgesamt 210 Millionen Euro in die Weiterentwicklung der Elektromobilität investiert und 22 Leuchtturmprojekte ausgezeichnet. Zusätzlich wurde eine Kaufprämie für Elektroautos, der sogenannte Umweltbonus, festgelegt und weitere Maßnahmenpakete für den benötigten Ausbau der Ladeinfrastruktur geschnürt.

Quelle: BMWi 2018c; electrive 2018; Karle 2015; KBA 2018



Elektroautos in Deutschland

Quelle: nach KBA 2018:144

Energiedeterminismus

Die gesellschaftlichen Auswirkungen der Energienutzung bilden keineswegs ein Forschungsfeld, das sich erst im Zuge der Umweltbewegung der 1970er Jahre herausgebildet hat. Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts unternahm Wilhelm Ostwald (1909:3) den Versuch, die menschliche Kultur, ihr Befinden und ihren Fortschritt allein auf Basis des Energiebegriffes zu beschreiben. Hierzu übertrug er die Hauptsätze der Thermodynamik auf gesellschaftliche Verhältnisse. Ostwald kam dabei zu der Auffassung, dass ein Kulturumschwung stets durch das Auftreten neuer energetischer Verhältnisse eingeleitet werde. Dies rühre daher, dass jegliche Kulturarbeit immer eine Vermehrung der Rohenergien sowie eine Verbesserung der Energieeffizienz anstreben würde. Max Weber (1922:387) widersprach und betonte, dass die Verwendung neuer Energieträger selbst dann ökonomisch sinnvoll sein könne, wenn die Effizienz der Energiewandlung sich verschlechtern würde. Obwohl es gegenwärtig gelingt, die Photovoltaik in immer mehr Ländern an die Netzparität heranzuführen (Karakaya 2015:1090), liegen ihre Wirkungsgrade erheblich unterhalb derer konventioneller Kraftwerke (Quaschnig 2014:190ff.), womit sich Webers Annahmen bestätigen. Im Übrigen ist die Vorstellung, dass neue Energiesysteme wesentliche Treiber eines Kulturumschwunges sind, überholt. Die gesellschaftlichen Voraussetzungen für einen derartigen Umschwung sind komplex und lassen sich nicht auf einen Energiedeterminismus reduzieren, wenngleich Energiesysteme stets im Zusammenhang mit der kulturellen Identität einer Gesellschaft zu sehen sind.

Quelle: Karakaya 2015; Ostwald 1909; Quaschnig 2014; Weber 1922

Endenergie

Die Endenergie bezeichnet den Teil des Energieverbrauchs, der dem Verbraucher nach Transport- und Umwandlungsverlusten in Form von Strom, Wärme oder Kraftstoff zur konkreten Nutzung zur Verfügung steht (z.B. Energiegehalt von Holzpellets im häuslichen Lagerraum, bevor sie verheizt werden) (AEE 2018d). Bei den erneuerbaren Energien stellt die Biomasse mit ca. 54%, den wichtigsten Energieträger dar. Besonders im Wärme- und Verkehrssektor kann die Biomasse einen Anteil von knapp 88% des Endenergieverbrauchs decken. In der Stromerzeugung ist die Rolle der Wind-, Wasserkraft und Sonnenenergie mit einem kumulativen Anteil von 77% bedeutender.

Quelle: AEE 2018d; Umweltbundesamt 2018d

Energieimporte

Deutschland ist hochgradig von Energieimporten abhängig. In den nächsten Jahren werden sich die Importanteile von Steinkohle und Erdgas weiter erhöhen, sodass Deutschland im fossilen Bereich – abgesehen von Braunkohle – vollständig an den Rohstoffimport gebunden sein wird. Um dieser Energieabhängigkeit entgegenzuwirken gilt es, regenerative Energien stärker auszubauen. Zwar ist Deutschland der größte Braunkohleproduzent der Welt, jedoch wird dieser Energiezweig aufgrund der starken Treibhausgasemissionen mittelfristig durch saubere Energieträger substituiert werden.

Quelle: Eurostat 2018; Umweltbundesamt 2018e



Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch

Quelle: nach Umweltbundesamt 2018d

Energieträger	Importquote	Statische Reichweite weltweit (in Jahren)
Braunkohle	-1,9%	200
Steinkohle	94,1%	125
Uran	100 %	25-166
Mineralöl	100 %	60
Erdgas	91,2 %	41

Importquoten verschiedener fossiler Energie

Quelle: nach Umweltbundesamt 2018e

E

Energie

Physikalisch gesehen stellt Energie Arbeit dar, die in einem physikalischen System verrichtet werden kann. Gemäß den Hauptsätzen der Thermodynamik kann Energie weder erzeugt noch verbraucht bzw. vernichtet werden (Energieerhaltungssatz) und stellt damit, bezogen auf das gesamte Universum, eine Invariante dar. Energie kann in verschiedene Formen umgewandelt werden, bspw. in kinetische, potenzielle oder thermische Energie, die Richtung der Energieumwandlung ist jedoch nicht beliebig und führt zu einer stetigen Erhöhung der Unordnung (Entropie). Die physikalische Einheit von Energie ist Joule (J).

Ein weiterer Begriff, der eng mit dem Thema Energie verbunden ist, ist der Begriff Energieträ-

ger. Dieser beschreibt eine physikalische Entität, die Arbeit verrichten kann. Ein Primärenergieträger kommt direkt in der Natur vor (z.B. Braunkohle) und wurde noch keiner technischen Umwandlung unterzogen. Sekundärenergieträger müssen zunächst umgewandelt oder veredelt werden, ehe diese energetisch genutzt werden können (z.B. Strom). Diese Umwandlungsprozesse sind mit starken Verlusten verbunden, so dass beim Verbraucher nur mehr ein Bruchteil des Energiegehalts der ursprünglichen Rohstoffe zur Verfügung steht.

Quelle: Eurostat 2018; Umweltbundesamt 2018e

	kJ	kWh	Kg RÖE
1 Kilojoule (kJ)	1	0,000278	0,000024
1 Kilowattstunde (kWh)	3600	1	0,086
1 kg Rohöleinheiten (RÖE)	41868	11,63	1

10 ³	Kilo (k)	Tausend
10 ⁶	Mega (M)	Million
10 ⁹	Giga (G)	Milliarde
10 ¹²	Tera (T)	Billion
10 ¹⁵	Peta (P)	Billiarde
10 ¹⁸	Exa (E)	Trillion

Quelle: UBA AT 2018

Energiespeicherung

Um die Stabilität des Stromnetzes zu garantieren, muss die Netzspannung zu jedem Zeitpunkt nahezu 50 Hertz betragen. Diese Spannung wird durch das Gleichgewicht zwischen Strom-Einspeisung und Strom-Abnahme gehalten. Durch die Volatilität der erneuerbaren Energien und deren, im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken, schwankende Einspeiseleistung und -menge, wird das Stromnetz vor neue Herausforderungen gestellt. Neben dem Stromexport in andere Regionen sowie neben der Anlagenabschaltung können Energiespeichertechnologien dazu dienen, potenzielle Ungleichgewichte zwischen Einspeisung und Last zu überbrücken. Bei Energiespeichern kann zwischen Kurzzeitspeichern (z.B. Batterien) und Langzeitspeichern (z.B. Pumpspeicherkraftwerke) unterschieden werden. Momentan besteht eine Vielzahl an unterschiedlichen Speichertechnologien. Diese funktionieren auf unterschiedliche Art und Weise, haben jedoch alle zum Ziel, die Energie zu speichern, um Zeiten mit Engpässen oder Überschüssen überbrücken zu können.

Elektrische Energiespeicher stellen Kondensatoren und Spulen dar, wobei Energie durch die Aufrechterhaltung eines elektrischen Feldes gespeichert wird. Diese Art der Energiespeicherung ist sehr effizient, jedoch bezogen auf das Speicherpotenzial stark begrenzt und kostenintensiv. Die elektrochemische Energiespeicherung ist kostengünstiger und bietet ein größeres Potenzial, besitzt jedoch einen deutlich geringeren Wirkungsgrad. Beispiele hierfür sind Batterien und Akkumulatoren. Im Fall von Akkumulatoren ist die Speicherung über lange Zeiträume zumeist mit starken Verlusten verbunden. Um dem vorzubeugen, kann Energie rein chemisch gespeichert werden. Trotz hoher Verluste beim Einspeicherungsprozess stellen chemische Energiespeicher in Deutschland momentan die einzige Option zur Langzeitspeicherung erneuerbarer Energien dar. Gängige Verfahren sind bspw. Power-to-Gas und Power-to-Liquid. Mechanische Energiespeicher speichern Energie in kinetischer und potenzieller Form. Dieses Prinzip nutzen Pumpspeicher- und Druckluftspeicherkraftwerke. Eine weitere Möglichkeit stellt die thermische Energiespeicherung dar. Diese ist vor allem für den Wärmesektor relevant. Der

Terminus thermisch umfasst Wärme- wie auch Kältespeicher. Ein Beispiel hierfür ist der sensible Wärmespeicher, der dem Pufferspeicher in Heizungsanlagen, dem Latentwärmespeicher und dem thermochemischen Speicher gleichkommt.

Quelle: Sterner, Stadler 2014

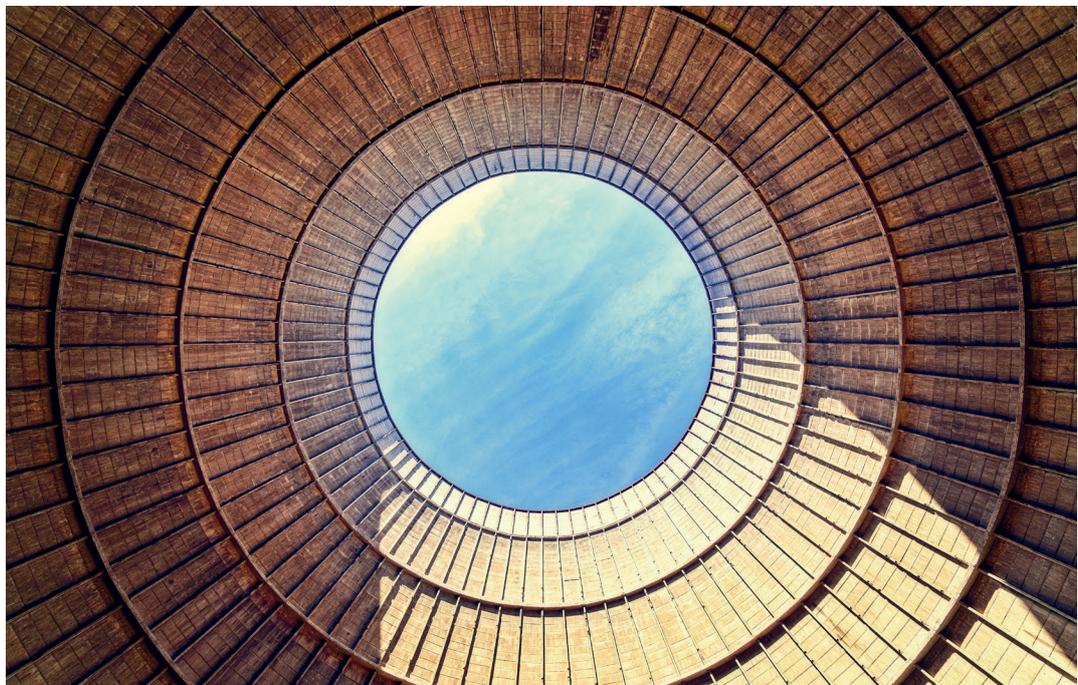
Entropie

Georgescu-Roegen (1986:16) betont, dass die herausziehende technologische Krise bzw. Energiekrise nicht verstanden werden kann, wenn nicht die Thermodynamik ins Zentrum der Betrachtung gerückt wird. Im Wesentlichen geht es bei diesem Transfer um die Frage des „*Energy Return On Investment*“ (EROI) bzw. um das Verhältnis zwischen Energieaufwand und -ertrag (Bardi 2009:323). Entsprechend den grundlegenden Ausführungen zur Gewinnung von Arbeit aus Wärme seitens Clausius (1850:368ff.) wird der EROI im historischen Verlauf schlechter. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Erschließung und Nutzung begrenzter Vorräte energetisch immer ineffizienter wird und der kapitalistischen Produktion unweigerlich eine Grenze setzt (Murphy und Hall 2011). Dies lässt sich dadurch erklären, dass dem ökonomischen System auf der Inputseite zwar wertvolle Energie, mit einer sehr geringen Entropie, zuströmt (z. B. Rohöl aus einer Ölquelle). Auf der Outputseite gibt es jedoch relativ wertlose Energie, mit einer hohen Entropie, wieder an das Ökosystem ab (z. B. Abwärme von Kraftwerken). Entsprechend des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik, der besagt, dass die Energie im Universum konstant bleibt, geht beim Durchgang der Energie durch den ökonomischen Prozess zwar nichts verloren. Doch da gleichzeitig die Entropie gegen ein Maximum strebt (2. Hauptsatz) und die transformierte Energie, bspw. in Form von hochentropischen Verbrennungsrückständen, nicht mehr verwertbar ist, erwächst dennoch ein rohstoffliches Limit (Georgescu-Roegen 1971:3ff.). Dieses von

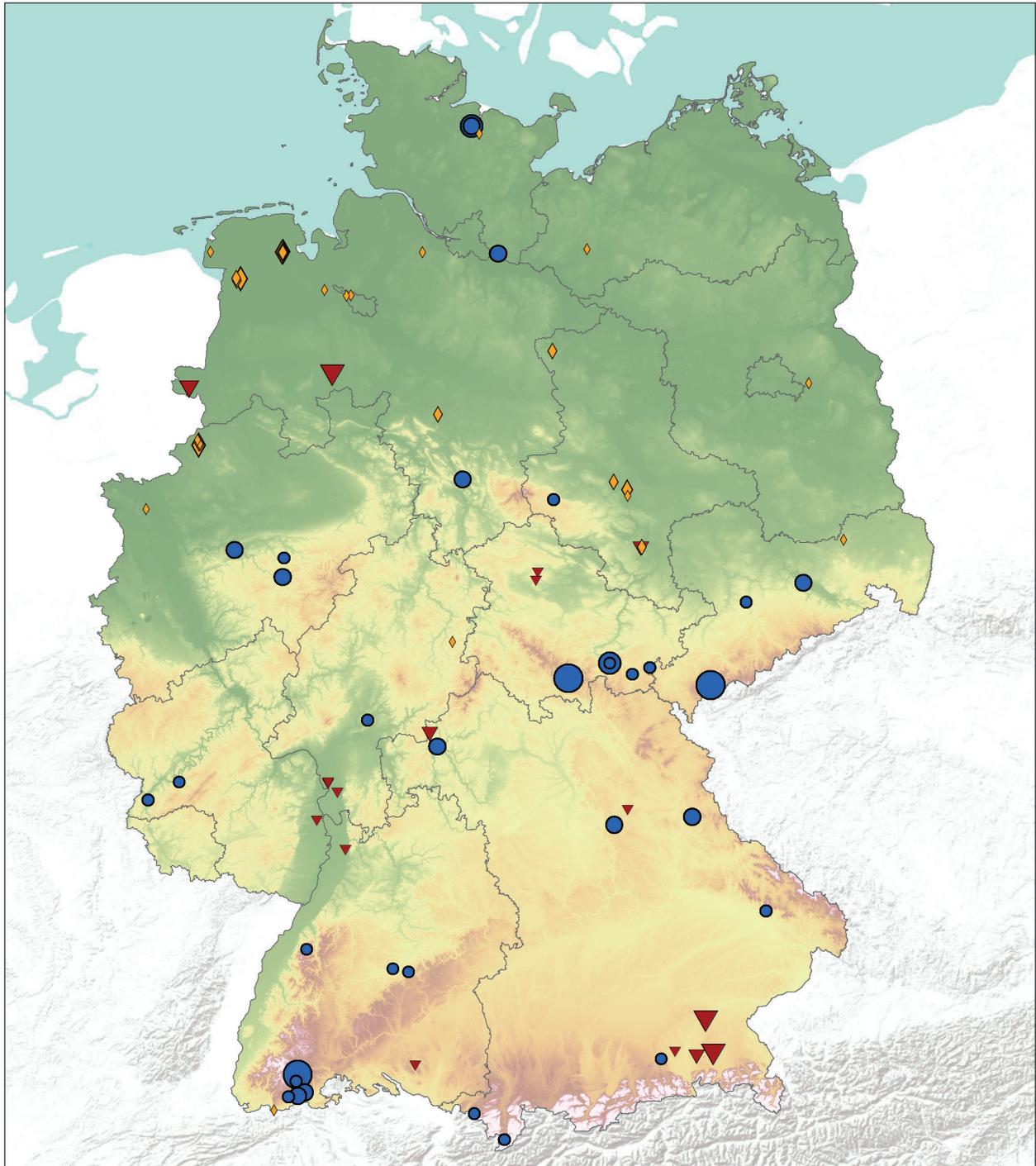
den Ökologischen Ökonomen (Martinez-Alier 2012) hervorgehobene Limit von Stoffströmen innerhalb einer 'vollen Welt' (Daly 2005) und die darauf basierende Forderung nach einem „*Steady State*“ (Daly 1991) sind jedoch selbst nach marxistischer Auffassung überbewertet. Denn wichtiger als die materiellen Konsequenzen eines geringer werdenden EROI sind für Marxisten die politischen und sozialen Folgen des Ressourcenverbrauchs. So sollte Energie nicht rein als Gegenstand oder materielle Ressource betrachtet werden, sondern als ein Konzept sozialer Beziehungen, geprägt von Macht und sozialökologischem Wandel (Huber 2009:106ff.). Darüber hinaus übersehe die einseitige Fokussierung auf das eher abstrakte, übergeordnete Konzept der Entropie den spezifischeren sozialen Kontext fossiler Energieträger. Des Weiteren weist Schwartzman (2008:43ff.) darauf hin, dass die zunehmenden Einschränkungen in der Ressourcennutzung, die sich aus der Logik der Entropie ergeben, nur insofern bestehen, wie verbrauchte bzw. noch nicht erschlossene Ressourcen vornehmlich auf Basis von nicht-regenerativer Energie (wieder-)gewonnen werden. So zeigen Kaberger und Mansson (2001:176) auf, dass es durchaus möglich und wirtschaftlich sein kann, einmal verbrauchte Ressourcen durch Recycling wiederzugewinnen. Derarti-

ge geschlossene Rohstoffkreisläufe seien dann möglich, wenn sie auf der Nutzung der nicht erschöpfbaren solaren Strahlungsenergie basieren würden. Durch den Einsatz von Solarenergie kann Entropie lokal sogar verringert werden, so wie das bei der Nutzung der Abwärme solarthermischer Kraftwerke zur Meerwasserentsalzung der Fall ist (DLR 2007). Dabei wird ein Zustand der Unordnung (hohe Entropie), der in Salzwasser gegeben ist, in einen Zustand der Ordnung (geringe Entropie) überführt, indem unter Einsatz extraterrestrischer Energie im Rahmen der Umkehrosmose Salzwasser in seine Bestandteile Süßwasser und Salz zerlegt wird. Daraus folgt, dass, obgleich die Entropie im gesamten Universum ständig zunimmt, diese dennoch lokal, in wohl definierten Systemen, verringert werden kann (Ebeling et al. 1998:42 f.; Harriss-White und Harriss 2007:76; Kranert und Cord-Landwehr 2010:77). So könnten die industriellen Produktionsabläufe fortwährend erhalten bleiben, ohne dabei die Ressourcenbasis der kommenden Generationen zu beeinträchtigen (Kaberger und Mansson 2001:165).

Quelle: Bardi 2009; Clausius 1850; Daly 1991, 2005; DLR 2007; Ebeling et al. 1998; Georgescu-Roegen 1986; Harriss-White und Harriss 2007; Huber 2009; Kaberger und Mansson 2001; Kranert und Cord-Landwehr 2010; Martinez-Alier 2012; Murphy und Hall 2011; Schwartzman 2008



Quelle: pixabay.com



Pumpspeicherkraftwerke

Leistung in MW

- <100
- 100 - <250
- 250 - 500
- >500

Kavernenspeicher (Erdgas)

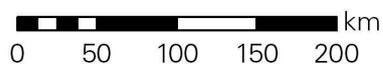
Volumen in Mio. Nm³

- ◆ <500
- ◆ 500 - <1000
- ◆ 1000 - 1500
- ◆ >1500

Porenspeicher (Erdgas)

Volumen in Mio. Nm³

- ▼ <500
- ▼ 500 - <1500
- ▼ 1500 - 3000
- ▼ >3000



Datengrundlage: EID GmbH 2018, Wikipedia 2018
Kartengrundlage: BKG 2018
Kartographie/Entwurf: Lucas Schwarz
Stand: Dezember 2018

Entwicklungsländer- technologien

Der Zugang zu Energie stellt eine wichtige Grundlage für die wirtschaftliche und gesellschaftliche Weiterentwicklung eines Landes dar. Im Jahr 2017 hatten weltweit ca. 1,1 Milliarden Menschen keinen Zugang zu elektrischer Energie und 2,1 Milliarden Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Darüber hinaus ba-

siert die Energieversorgung in vielen Ländern Afrikas auf eher primitiven Technologien und Energieträgern (v.a. Holz). Aus diesen Gründen wurden vom Solarinstitut Jülich verschiedene dezentrale und kostengünstige regenerative Entwicklungsländertechnologien entwickelt, die an die Bedingungen der Länder der Dritten Welt besser angepasst sind und dabei gleichzeitig zu einer Verbesserung der Energieversorgung führen. Darüber hinaus sind die Klimabilanzen dieser Technologien bei Weitem besser als die der konventionellen Methoden.

Eine Technologie, die hierbei zum Einsatz kommt, ist bspw. der sog. Solarkocher. Dieser kann stationär in Gebäude eingebaut werden, die sich in Gebieten mit einem großen Solarpotenzial befinden. Ein Kollektorfeld mit Spiegel außerhalb des Gebäudes sorgt dabei für den Transport der Solarenergie ins Innere der Küche. Dadurch kann der konventionelle Brennstoff Holz durch eine saubere Energiequelle substituiert werden. Eine Spezialform des Solarkochers stellt der konzentrierende Solarkocher in Stirlingform dar. Dieser hat den Vorteil, dass er mobil ist und leicht gereinigt werden kann. In trockenen, staubigen Gegenden ist dies von großem Vorteil.



Mobile Solarkocher der FH Jülich

Quelle: Eigene Aufnahme

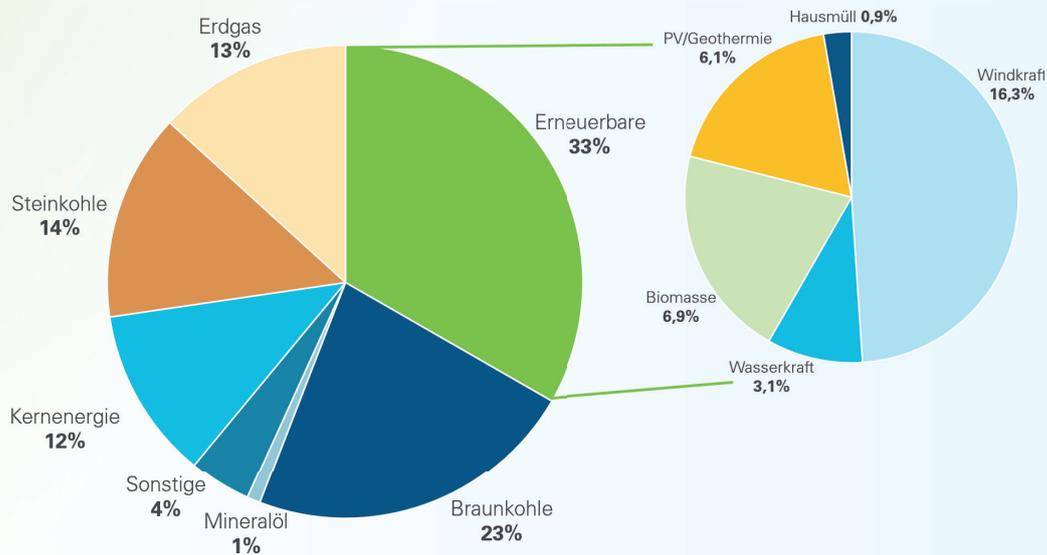
Quelle: Schwarzer et al. 2016; Solarify 2018; UNICEF 2017

Erneuerbare Energien

Das fossil-nukleare Energiesystem befindet sich in einem Krisenzustand. Die Gründe liegen in der Endlichkeit fossiler Ressourcen, dem hohen Gefahrenpotential der Nukleartechnologien, manifestiert etwa durch die Reaktorkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima, sowie dem durch die Verbrennung fossiler Energien verursachten globalen Klimawandel. Um die Abhängigkeit von den endlichen konventionellen und fossilen Energieträgern zu reduzieren, spielen erneuerbare Energien eine wichtige Rol-

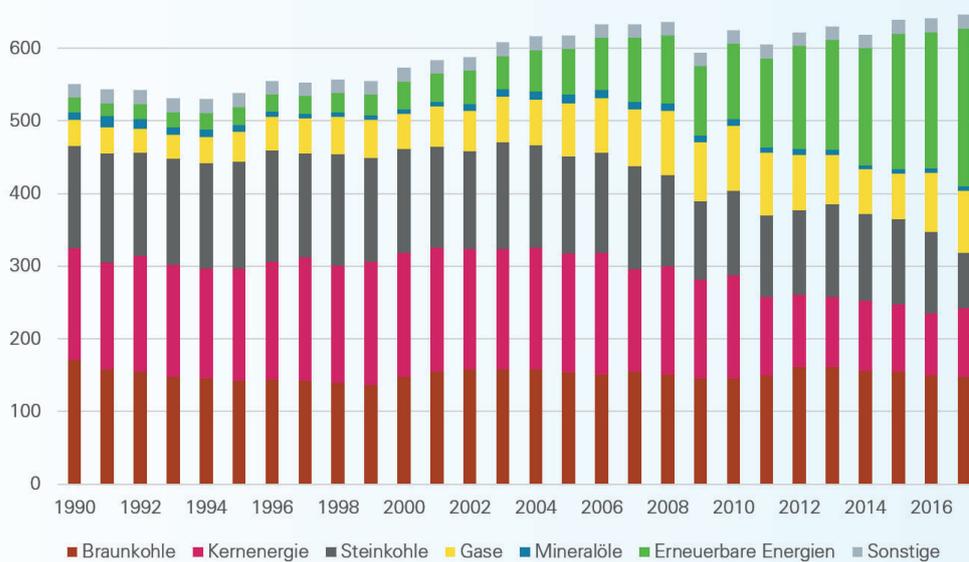
le. Dabei handelt es sich um natürliche Energiequellen, die in menschlichen Zeitdimensionen unendlich sind und/oder sich über einen überschaubaren Zeitraum wieder regenerieren. Dazu zählen die Energieträger Wind, Wasser, Sonne, Biomasse, Erdwärme (Geothermie) und Umgebungswärme. Häufige Energieerzeugungsanlagen sind dabei Windkraftanlagen, Photovoltaik-Freiflächen- sowie Photovoltaik-Dachanlagen oder Biomasseanlagen.

Quelle: BMWi 2019b; UBA 2018d; UBA 2019a; Wesselak et al. 2017



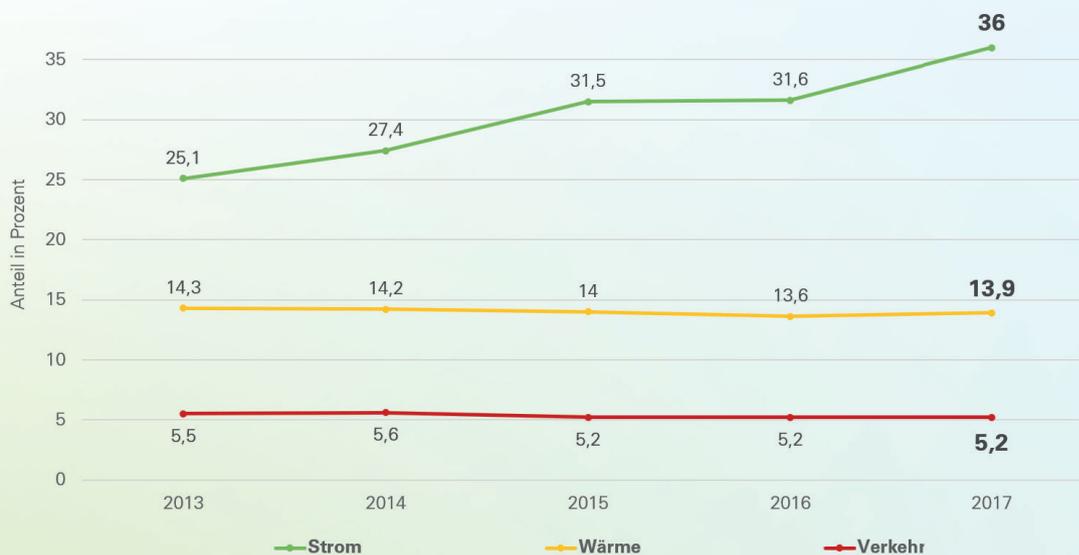
Anteil von Energieträgern an der Bruttostromerzeugung in Deutschland 2017

Quelle: nach BMWi 2019b



Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern

Quelle: nach UBA 2019a



Anteil erneuerbarer Energien in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr

Quelle: nach UBA 2018d

E

Energieverbrauch

Der Energieverbrauch ist die umgangssprachliche Beschreibung des Einsatzes der Endenergieträger, wie Kraftstoff, Wärme und Strom. Dieser wird dabei durch verschiedene, auch standortabhängige Faktoren beeinflusst. Dazu gehören unter anderem globale Einflüsse wie das Energieangebot, die Verfügbarkeit von energetischen Rohstoffen, die politischen Rahmenbedingungen in den Förder- und Abbauländern aber auch

die Preisentwicklungen auf den Weltmärkten und an den Strombörsen sowie die verfügbare Infrastruktur und deren technische Gegebenheiten (z.B. Transportverlust bei Strominfrastruktur). Weitere Einflussfaktoren stellen die klimatischen Bedingungen, die Witterung, Konjunktur, Lagerbestände, demographische Bevölkerungsentwicklung, Haushaltsgröße, gesellschaftliche Rahmenbedingungen (institutionell, rechtlich, politisch) sowie der generelle Strukturwandel dar.

Quelle: Peyke et al. 2013

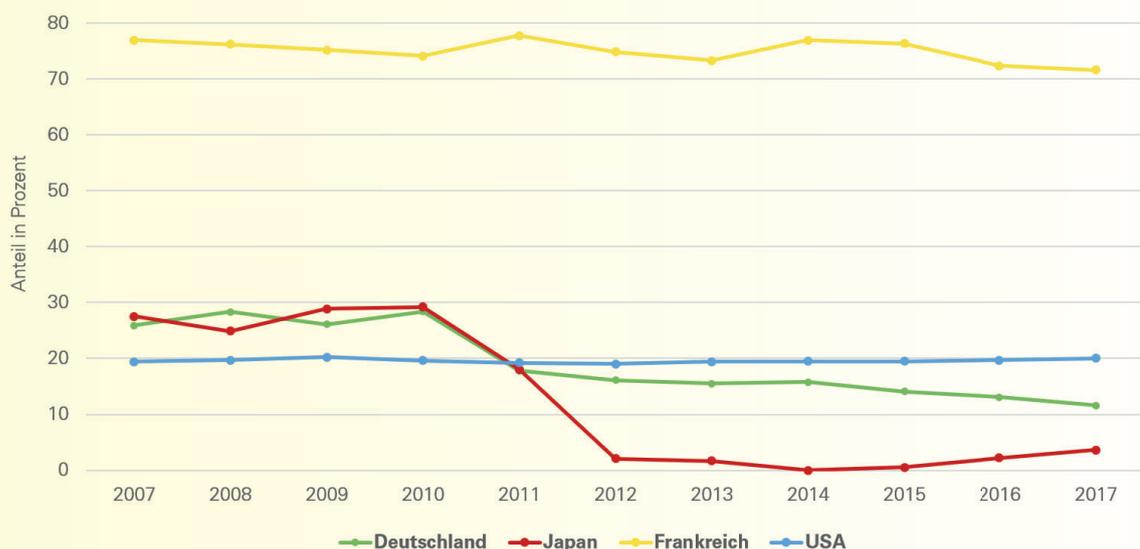
Externe Kosten

Kosten, die sich außerhalb des Strompreises, jedoch entlang des Lebenszyklus einer Energieanlage ergeben, werden als externe Kosten bezeichnet. Diese Kosten werden zumeist nicht vom Verursacher oder Verbraucher beglichen, sondern auf unterschiedliche Art und Weise auf die Gesellschaft übertragen. Dazu gehören auch Umwelt- und Gesundheitskosten (z.B. Artensterben, radioaktive Strahlung). Diese externen Kosten variieren zwischen konventionellen und erneuerbaren Energieträgern erheblich. Speziell im Hinblick auf ökologische Kosten, wie die Schädigung von Ökosystemen, die Verschärfung des Treibhauseffekts, die weltweite Umweltzerstörung oder Smog, aber auch hinsichtlich politischer Kosten, wie Rohstoffsicherung, Kriege um Reserven oder die Abhängigkeit vom Weltmarkt, differieren konventionelle und regenerative Energieträger stark.

Besonders hoch sind die externen Kosten bei der Atomenergie: Der Rückbau eines Kernkraftwerks kostet bis zu 1 Mrd. Euro, die Entsorgungskosten von radioaktivem Brennstoffmaterial lassen sich dabei nur schwer beziffern. Schätzungen für die monetären Schäden durch atomare Unfälle belaufen sich auf bis zu 5.000 Mrd. Euro (Ewers und Rennings 1992). Dabei müssen lediglich 2,5 Mrd. Euro von den Betreibern getragen werden, der Rest wird von der Allgemeinheit kompensiert. Durch die Nutzung von erneuerbaren Energien können die externen Kosten der Stromerzeugung um etwa 9 Milliarden Euro pro Jahr gesenkt werden.

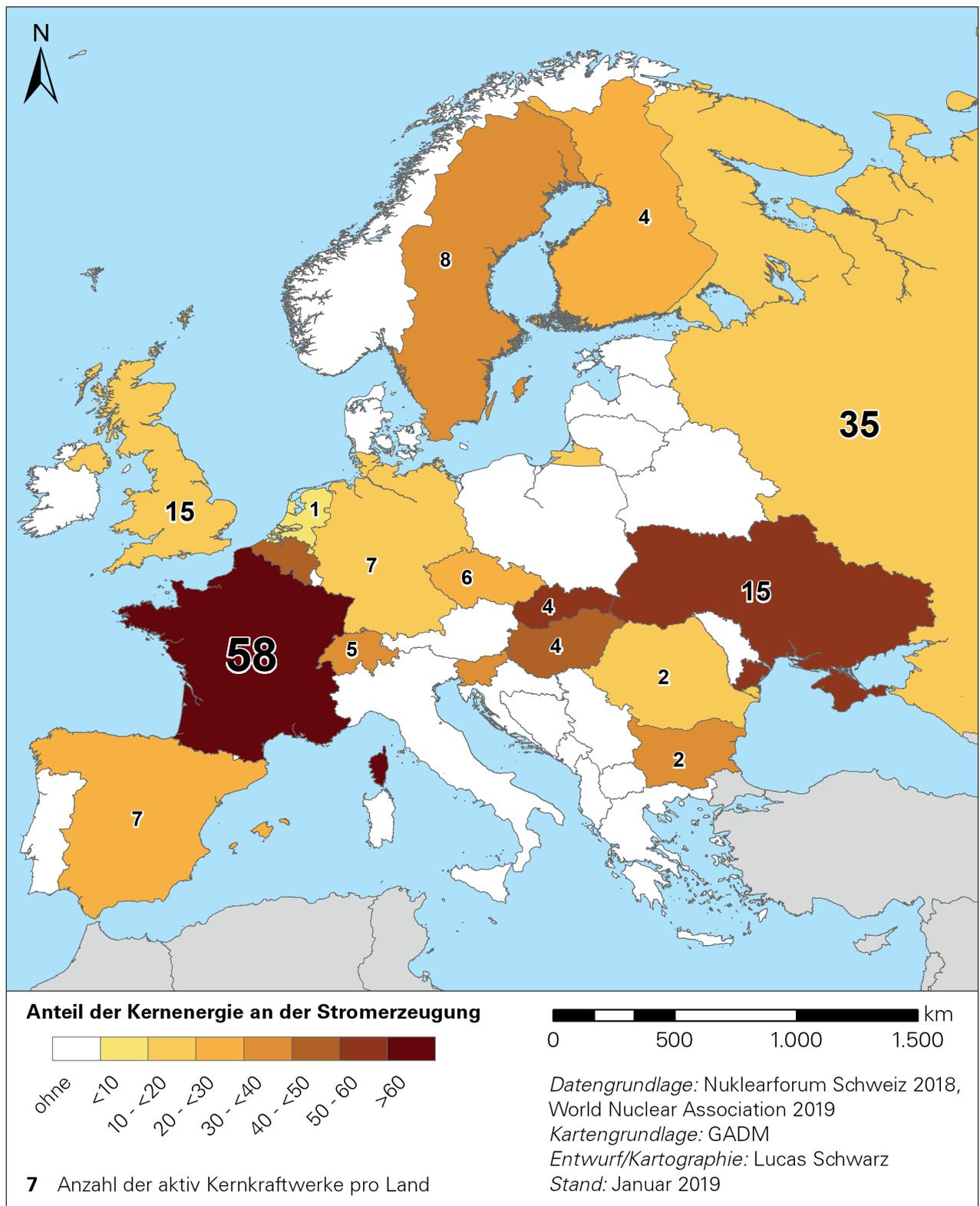
Trotz des steigenden Anteils erneuerbarer Energien an der europäischen Stromversorgung spielen externe Kosten in der EU immer noch eine große Rolle. Der Grund dafür ist u.a. die nach wie vor große Bedeutung der Atomenergie.

Quelle: Krewitt und Schломann 2006; Peyke et al. 2013; World Nuclear Association 2019



Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung ausgewählter Länder

Quelle: nach World Nuclear Association 2019



Kernenergie in Europa

Quelle: nach Nuklearforum Schweiz 2018, World Nuclear Association 2019

F

Flächenertrag

Der Flächenertrag beschreibt, wieviel Energie pro Flächeneinheit gewonnen werden kann, und wird typischerweise in GWh/ha oder kWh/m² angegeben.

Der Flächenertrag war schon immer ein wichtiger Faktor bei der Energiegewinnung. Ob bei der Brennholznutzung im Mittelalter, der punktuell-intensiven Landschaftsnutzung durch Tagebauten für die Braunkohlerschließung oder bei der Energiegewinnung durch erneuerbare Energien. Erneuerbare Energieträger sind nicht an Lagerstätten gebunden, vielmehr besitzen sie einen ubiquitären Charakter. Die Energiedichte ist

jedoch wesentlich geringer, als dies bei fossilen und nuklearen Energieträgern der Fall ist.

Der Flächenertrag beinhaltet nicht nur die Fläche, die zur Energiegewinnung erforderlich ist, sondern auch die Fläche für den Abbau von Energierohstoffen sowie indirekte Auswirkungen, wie Waldfläche, die zur CO₂-Kompensation benötigt wird. Werden alle diese Faktoren in die Fläche übertragen, ergibt sich ein stark differenziertes Bild über die Flächeneffizienz von Kraftwerken.

Fossilismus

Altvater (2007:40) sieht die Beziehung zwischen Mensch und Natur als krisenhaft an, da ein begrenzter Vorrat an Ressourcen innerhalb der dünnen Erdkruste die Grundlage des derzeitigen Wirtschaftssystems bildet (Fossilismus). In der Kritik steht dabei die Ausrichtung des Kapitalismus nach industrieller Skalierung und quantitativem Wachstum (Mathews 2011:872), die ein jähes Ende finden wird, sobald die begrenzten fossilen Lagerstätten der Erde durch exponentielles Wachstum von Bevölkerung und Wirtschaft erschöpft sein werden (Daly 1995). Doch nicht nur die Endlichkeit von Energieträgern, auch die Häufung meteorologischer Extremereignisse, Artensterben und der Anstieg des Meeresspiegels, die eine Folge der Nutzung fossiler Energieträger sind, stellen ein Hindernis für stabiles wirtschaftliches Wachstum dar (McCarthy 2015:2490). Der Club of Rome verdeutlicht in seinen Szenarien zur Entwicklung des Zustandes der Welt, dass der Wohlstand nur dann aufrechterhalten ist, wenn ein radikales Umdenken im Hinblick auf die Bewertung von Wachstum greift (Meadows et al. 2006:248ff.). Heinberg (2005:2) sieht in dem Schwinden mineralischer Rohstoffvorräte sogar das Ende des Industriezeitalters kommen. Es erscheint ihm unmöglich, der Zerstörung von Umwelt im Rahmen des bestehen-

den ökonomischen Systems Einhalt zu gebieten, da die fossilen Energieträger den global agierenden Unternehmen die Gelegenheit eröffnen, Produktion sowie Konsum räumlich zu trennen und die vielfältigen ökologischen Kosten zu externalisieren (vgl. auch Chisholm 1990). Sarkar und Kern (2008) spitzen die Möglichkeiten der Weltgemeinschaft im Rahmen ihrer Kapitalismuskritik auf die Optionen 'Ökosozialismus oder Barbarei' zu. Der Kapitalismus wird durch diese Rhetorik zum Feindbild stilisiert (Assheuer 2017), da er aufgrund der Ausbeutung natürlicher Ressourcen einerseits die Ursache der Umweltkrise darstelle (Daly 2005, S. 100ff.), andererseits zur Krisenbewältigung keinen geeigneten gesellschaftlichen Rahmen biete (Kallis et al. 2009:22).

Quelle: Altvater 2007; Assheuer 2017; Chisholm 1990; Daly 2005; Heinberg 2005; Meadows et al. 2006; Kallis et al. 2009; Mathews 2011; McCarthy 2015; Sarkar und Kern 2008

Geothermie

Die Geothermie wird auch als Erdwärme bezeichnet und beschreibt die energetische Nutzung von thermischer Energie aus dem Erdinneren sowie der oberen Erdkruste zu Heiz- und Erwärmungszwecken, aber auch zur Deckung des Strombedarfs. In Deutschland ist die Nutzung von Geothermie in unterschiedlicher Form an fast jedem Standort möglich.

Grundsätzlich wird zwischen der oberflächennahen Geothermie und der Tiefengeothermie unterschieden. Die oberflächennahe Geothermie findet im Bereich von bis zu 400 m Tiefe unter der Erdoberfläche statt. Diese wird zur Wärmeversorgung mithilfe von Wärmepumpen, Erdwärmesonden oder Erdkollektoren genutzt. Die Tiefengeothermie findet in Bereichen tiefer als 400 m unter der Erdoberfläche statt. Von wirtschaftlichem Interesse sind dabei vor allem heißwasserführende Gesteinsschichten, sog. hydrothermale Quellen, die mittels einer Injektions- und Förderbohrung erschlossen werden (hydrothermales Verfahren). In Deutschland liegen diesbezüglich vor allem im Bereich des Oberrheingrabens sowie im Süddeutschen Molassebecken große Potenziale vor. Geothermie kann jedoch auch genutzt werden, wenn keine wasserführenden Gesteinsschichten vorliegen. Dabei wird Wasser über eine Injektionsbohrung in eine erhitzte Gesteinsschicht eingepresst, wobei die Gesteinsschicht wie ein Durchlauferhitzer das Wasser erhitzt. Anschließend kann das erwärmte Wasser an anderer Stelle wieder an die Oberfläche gefördert und energetisch genutzt werden. Man spricht hierbei vom petrothermalen Verfahren (z.B. Hot-Dry-Rock-Verfahren). Sowohl beim hydro- als auch beim petrothermalen Verfahren erreicht das Arbeitsmedium Temperaturen von 100-130°C, wodurch die Produktion von Strom möglich ist. Die Bohrungen zur Erschließung der Energiequelle sind jedoch in Deutschland mehrere tausend Meter tief und damit sehr kostenintensiv. Zudem besteht ein hohes Fündigkeitsrisiko.

Das Kraftwerk mit der größten thermischen Leistung von 40 MW befindet sich in Oberhaching-Laufzorn (Bayern). Die größte elektrische Leistung erbringt das Kraftwerk Dürnhaar (Bayern) mit 7 MW. Beide Kraftwerke werden hydrothermal betrieben. Das erste Geothermiekraftwerk Deutschlands wurde 1984 in Waren (Mecklenburg-Vorpommern) mit einer Leistung von 1,3 MWth in Betrieb genommen.

Der Ausbau der Geothermie hat in Deutschland ein enormes Potenzial: Die AEE (2010) prognostiziert für 2020 ein elektrisches Potenzial von 3,8 Mrd. kWh und ein thermisches Potenzial von 42,1 Mrd. kWh.

Quelle: AEE 2010; Wesselak et al. 2017



Quelle: pixabay.com

G

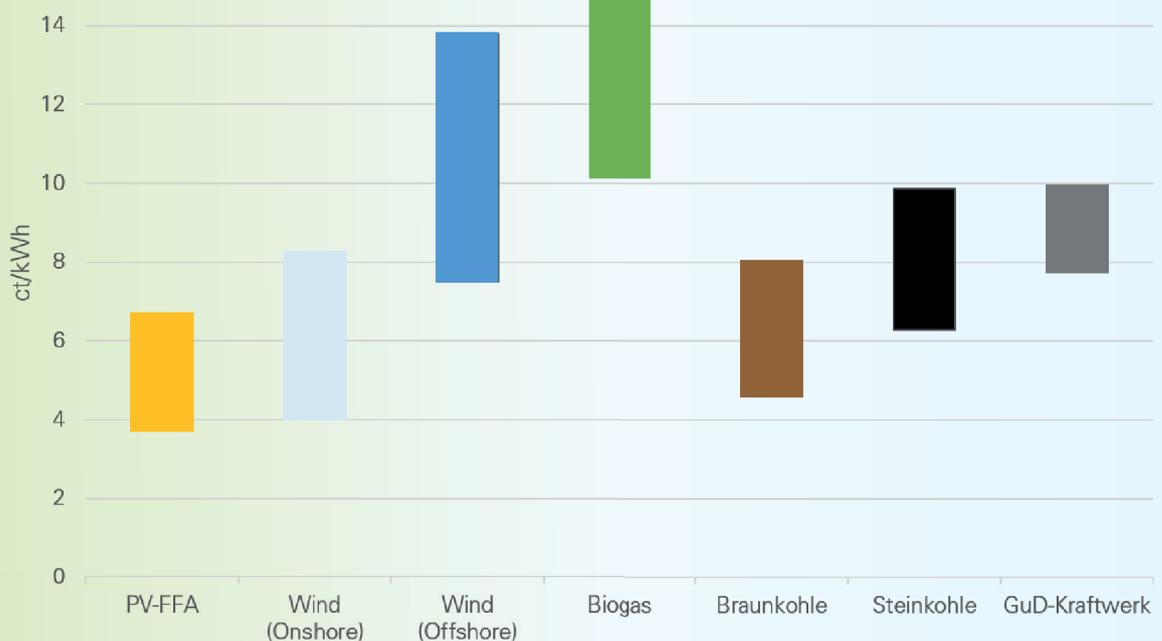
Gestehungskosten

Die Stromgestehungskosten setzen sich aus Kapital-, Betriebs- und Brennstoffkosten zusammen. Bei den erneuerbaren Energien hängen diese von folgenden Parametern ab:

- **Anschaffungskosten:** Kosten für den Bau und die Installation der Anlage
- **Standortbedingungen:** natürliches Energieangebot (bspw. Wind- und Strahlungsangebot)
- **Betriebskosten:** Nutzungszeit der Anlage
- **Lebensdauer der Anlage:** 20-30 Jahre
- **Finanzierungsbedingungen:** Pachtverträge, Renditen, Risikoaufschläge

Die Gestehungskosten unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Erzeugungstechnologie, den Standortbedingungen sowie im zeitlichen Verlauf. An einem Standort mit niedriger Sonneneinstrahlung hat eine PV-Anlage mit hohen Anschaffungskosten auch hohe Gestehungskosten. Aufgrund von Lernkurven und der technischen Weiterentwicklung kann bei erneuerbaren Energien von sinkenden Gestehungskosten ausgegangen werden, während die Gestehungskosten konventioneller Energieerzeugungsanlagen tendenziell ansteigen.

Quelle: Kost et al. 2018



Stromgestehungskosten (in ct/kWh)

Quelle: nach Kost et al. 2018

Grüner Kapitalismus

G

McCarthy (2015) sowie Kenis und Lievens (2016) erachten es als wünschenswert, die Neugestaltung des Energiesystems mit einer Neuordnung der sozio-materiellen Beziehungen zu verknüpfen. So sehen sie in einer Transformation des Energiesystems in Richtung erneuerbarer Energien und in der Kommodifizierung natürlicher Standort-faktoren (z.B. Wind) nicht nur eine ausreichende Strategie zur Bewältigung der globalen Umweltkrise, sondern auch die Gelegenheit für den Kapitalismus fortzubestehen. Ihrer Auffassung nach könne nicht davon ausgegangen werden, dass die Transformation des Energiesystems zwangsläufig antikapitalistisch sein muss. Auch Harriss-White und Harriss (2007:76) betonen, dass erneuerbare Energien nicht nur den Aufbau dezentraler Versorgungsstrukturen auf kommunaler Ebene stimulieren, sondern auch problemlos in die kapitalistische Logik von Markt und Massenproduktion eingebettet werden können. Selbst Klimawandel und Klimaschutz werden den Mechanismen des Marktes sowie den Kompetenzen von Geo-Engineering überlassen, ohne dabei die sozio-

materiellen Verhältnisse grundlegend in Frage zu stellen (McCarthy 2015:2490f.). Dies erlaube ein Umschiffen der ökologischen Krise und eine Fortführung der Akkumulation im Rahmen eines ökologisch stärker angepassten kapitalistischen Systems, dem Grünen Kapitalismus. Böhm et al. (2012:1617, 1620) halten eine Transformation des Kapitalismus in Richtung eines 'Green New Deal' ebenfalls für möglich, wobei sie wie Brand (2016a, 2016b) darin keinen Ansatz zur Lösung sozialer Probleme und globaler Ungleichheiten erkennen können. Daher lehnen marxistisch orientierte Umweltforscher einen Grünen Kapitalismus ab (Harris 2010, Harris 2013). Harriss-White und Harriss (2007:72) bestreiten zudem die Möglichkeit eines durchwegs ökologischen Kapitalismus, da Kapitalismus unweigerlich mit einer materiellen Verschwendung und einer ständigen Erhöhung von Entropie einhergehe.

Quelle: Bosch und Schmidt 2019; Brand 2016a, b; Böhm et al. 2012; Harriss-White und Harriss 2007; Harris 2010, 2013; Kenis und Lievens 2016; McCarthy 2015



Quelle: pixabay.com

I

Installierte Leistung

Die installierte Leistung beschreibt die maximale Leistungsfähigkeit eines Kraftwerks. Diese kann unter Idealbedingungen erreicht werden und ist von internen und externen Gegebenheiten, wie

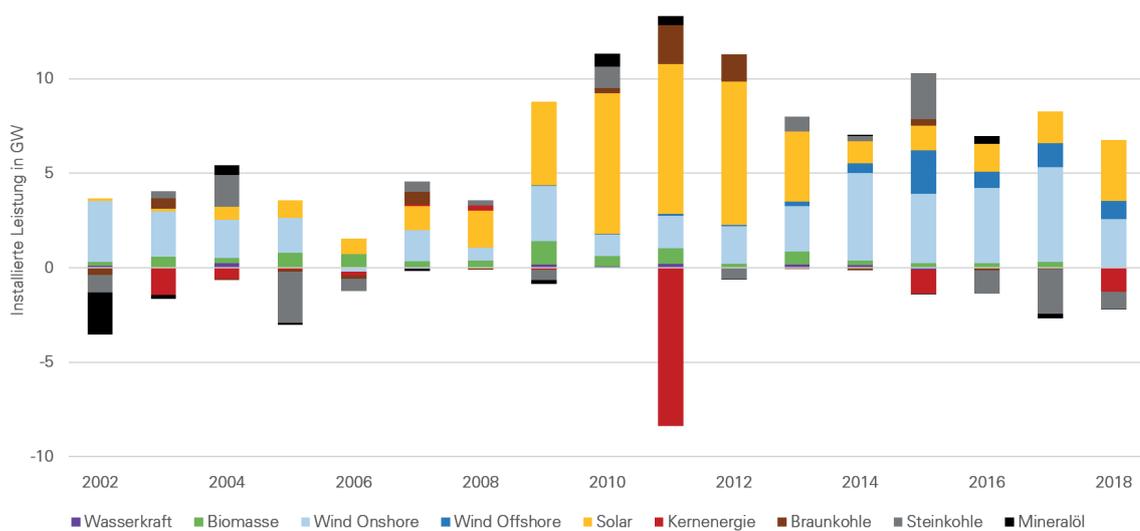
Witterung, Qualität des energetischen Rohstoffes und technischen Faktoren, abhängig.

Quelle: Amprion et al. 2018; Fraunhofer Institut 2019; Peyke et al. 2013

Energieträger (Deutschland, 2018)	Installierte Leistung [GW]
Wind onshore	52,83
Solar	45,55
Gas	29,63
Steinkohle	24,18
Braunkohle	21,20
Kernenergie	9,52
Biomasse	7,72
Wind offshore	6,41
Wasserkraft	5,50
Mineralöl	4,30

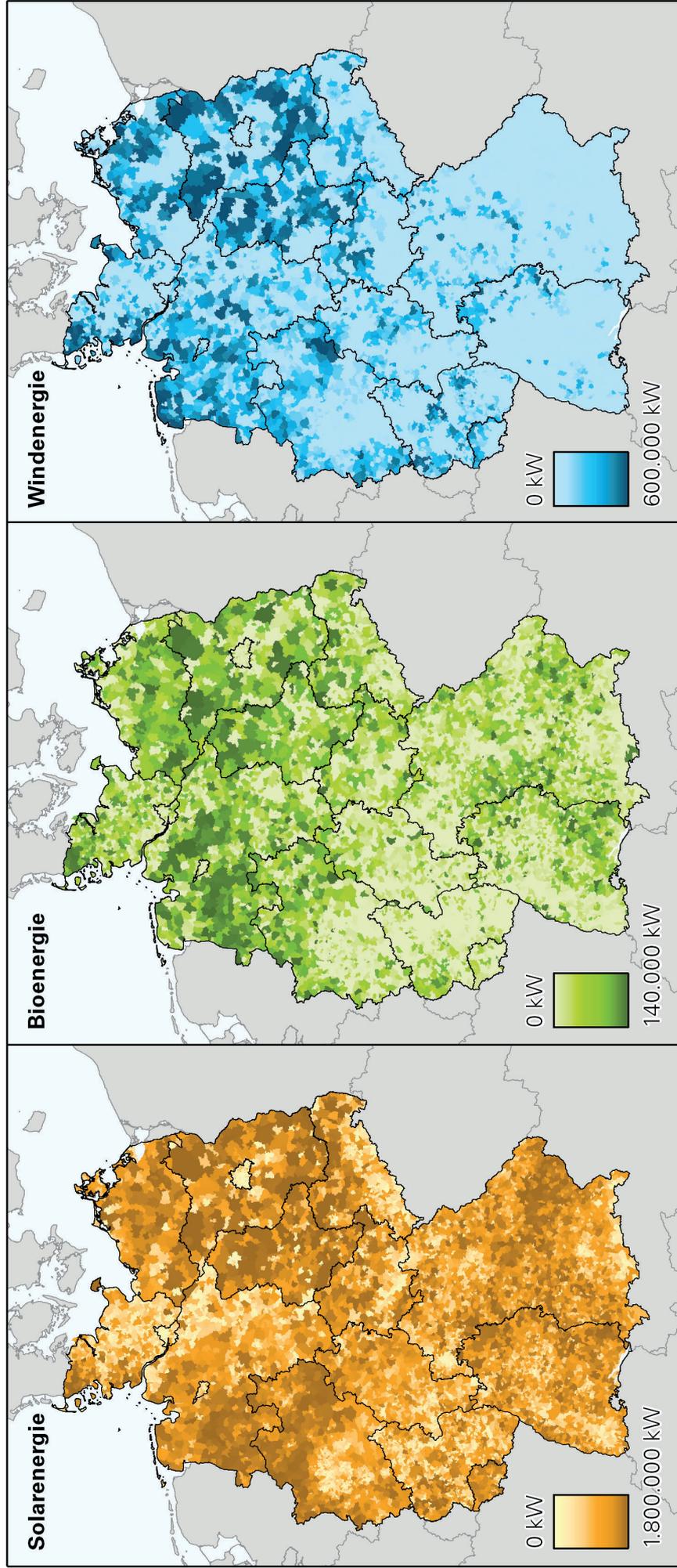
Installierte Leistung von Energieträgern in Deutschland 2018

Quelle: nach Fraunhofer Institut 2019



Zuwachs der installierten Leistung aller Energieträger in Deutschland

Quelle: nach Fraunhofer Institut 2019



Datengrundlage: Amprion, Tennet, TransNetBW, 50Hertz 2018 // Kartengrundlage: GADM 2019 // Entwurf/Kartographie: Lucas Schwarz // Stand: Februar 2019

Installierte Leistung von erneuerbaren Energien in Deutschland

Quelle: nach Amprion et al. 2018

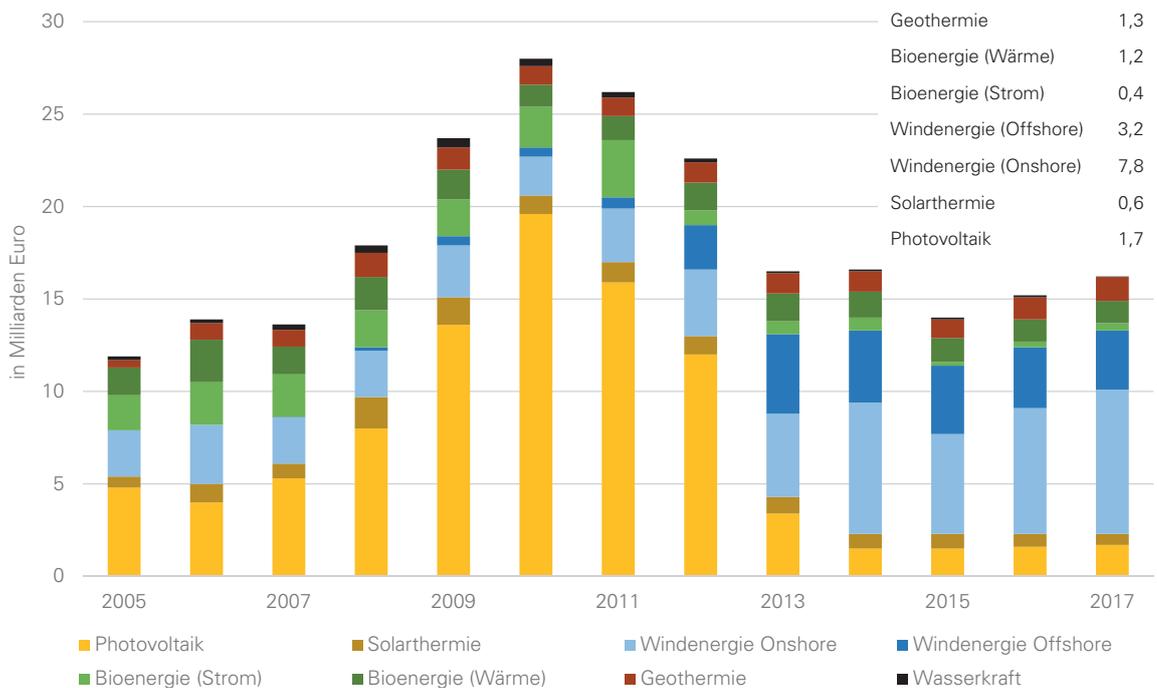
I

Investitionen

Aufgrund des dezentralen Charakters erneuerbarer Energien sowie aufgrund ihrer geringen Energiedichte haben sich in den letzten Jahren hohe Investitionssummen in Anlagen und Infrastruktur ergeben. Diese sind abhängig von den

Fördermöglichkeiten, wobei die Vergütungen seitens des EEG von zentraler Bedeutung sind. Bürger haben einen hohen Investitionsanteil an erneuerbaren Energie-Anlagen inne.

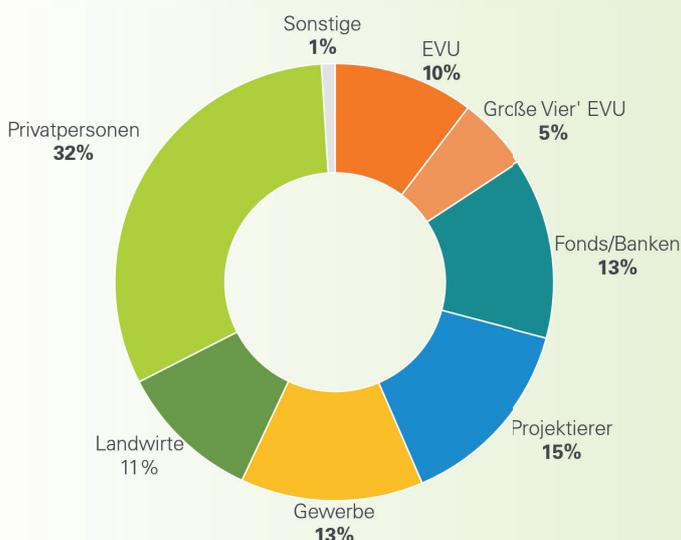
Quelle: AEE 2018e; AGEE Stat, UBA 2018



Geothermie	1,3
Bioenergie (Wärme)	1,2
Bioenergie (Strom)	0,4
Windenergie (Offshore)	3,2
Windenergie (Onshore)	7,8
Solarthermie	0,6
Photovoltaik	1,7

Entwicklung der Investitionen in erneuerbare Energien

Quelle: nach AGEE Stat, UBA 2018



Eigentümerstruktur von Erneuerbare Energie-Anlagen zur Stromerzeugung (2016)

Quelle: nach AEE 2018e

Kenngrößen

Joule

= Einheit der Größen Energie, Arbeit und Wärme. Ein Joule entspricht einem Newtonmeter oder einer Wattsekunde.

Watt

= Einheit der Leistung ~ Energieumsatz pro Zeit. Ein Watt entspricht einem Joule pro Sekunde.

Volt

= Einheit für elektrische Spannung. Ein Volt entspricht einem Watt pro Ampere.

Ampere

= Einheit der elektrischen Stromstärke.

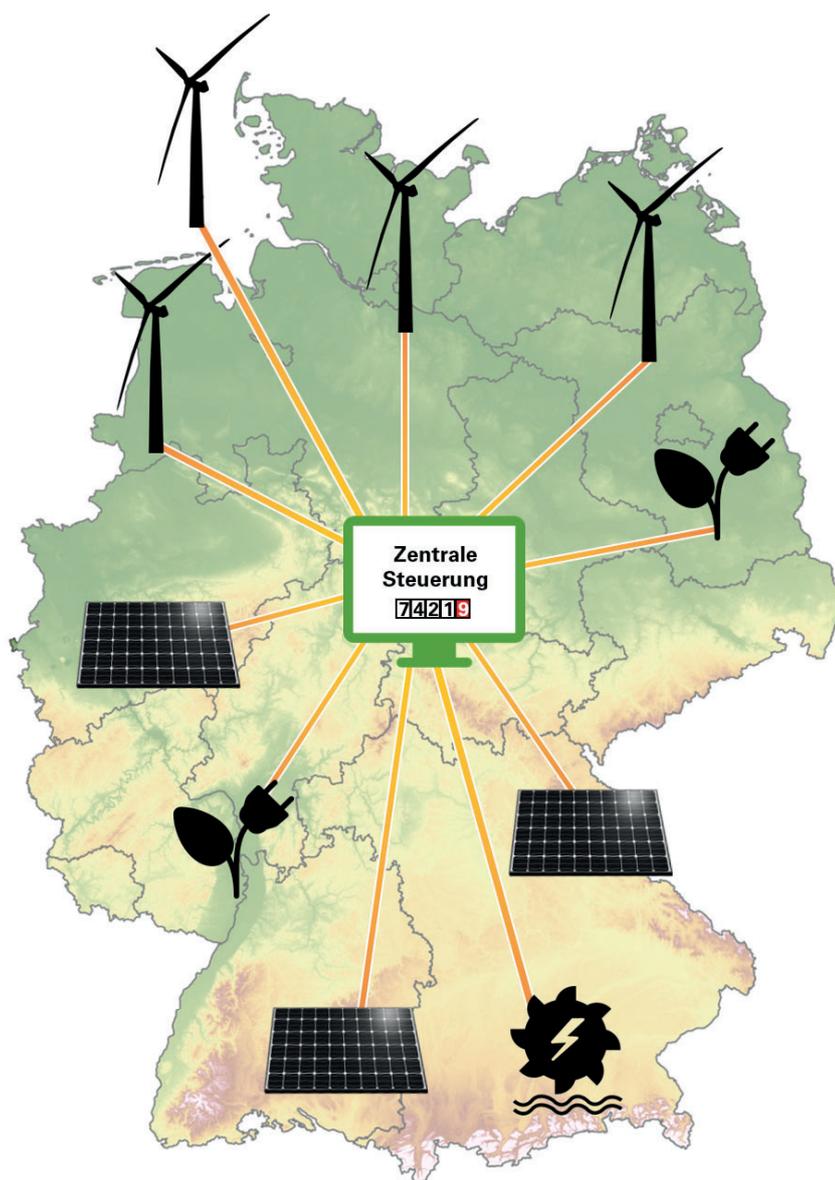
Quelle: JHS 2019

Kombikraftwerk

Das regenerative Kombikraftwerk ist ein von der Universität Kassel sowie den Unternehmen Enercon GmbH, Schmack Biogas AG und SolarWorld AG entwickeltes Projekt, um die zukünftige Versorgungssicherheit mittels regenerativen Energiequellen ermöglichen zu können. Dabei wurden elf Windenergieanlagen, 20 Solaranlagen, vier Biogasanlagen und ein Pumpspeicherkraftwerk über eine zentrale Steuerung miteinander verbunden. Das Pilotprojekt sollte zeigen, dass die erneuerbaren Energien zu jeder Tageszeit und bei jeder Witterung genügend Strom zur Deckung des Strombedarfs Deutschlands einspeisen können, ohne dass dabei auf konventionelle Energieträger zurückgegriffen werden muss. Aufgrund der dezentralen Verteilung über die gesamte Fläche der Bundesrepublik konnten witterungsbedingte Engpässe kompensiert werden. Wenn im Norden kein Wind wehte, konnte gleichzeitig im Süden Solarstrom erzeugt und das Defizit über einen räumlichen Verbund ausgeglichen werden. Wenn beide Technologien aufgrund der Witterung keinen Strom einspeisen konnten, wurde die Energie aus der grundlast- und spitzenlastfähigen Biomasse genutzt. Wenn zu viel Strom produziert wurde, dann wurde der Überschuss in einem Pumpspeicherkraftwerk zwischengespeichert. Das Pilotprojekt konnte zeigen, dass mittels der Kombination der verschiedenen Erzeugungstechnologien der Strombedarf stets gedeckt werden kann.

In einem zweiten Testlauf zwischen 2010 und 2014 konnte zudem vom Fraunhofer Institut in Kassel nachgewiesen werden, dass eine regene-

rative Stromversorgung nicht nur genug Strom produzieren kann, sondern auch noch eine stabile Versorgung ermöglicht.



Schematischer Aufbau eines Kombikraftwerks

Quelle: nach AEE 2019a

Konversionsflächen

Konversionsflächen stellen laut EEG 2017 Flächen dar, die ehemals wirtschaftlich, verkehrlich, wohnungsbaulich oder militärisch genutzt wurden. Dabei muss diese ehemalige Nutzung noch Wirkung auf gegenwärtige und zukünftige Nutzungen haben. Beispiele für Konversionsflächen stellen ehemalige Deponien oder Truppenübungsplätze dar. Heutzutage werden Konversionsflächen häufig durch PV-Freiflächenanlagen genutzt. Der Strom, der dabei gewonnen wird, wird ebenfalls nach dem EEG vergütet.

In Deutschland bestehen ca. 350.000 Hektar ehemalige Militärfächen. Durch die Nutzung der

Solarenergie findet eine Aufwertung solcher Flächen statt; allerdings müssen vor der Errichtung Munition und Altlasten entfernt werden. Diese Prozesse werden meistens durch Einmalzahlungen der Investoren oder durch Pachteinahmen finanziert.

Ein prominentes Beispiel für die Nutzung einer Konversionsfläche stellt der Solarpark Lieberoser Heide dar. Dieser Park ist mit einer Leistung von 71 MW einer der größten Solarparks Deutschlands und versorgt 15.000 Haushalte mit Strom.

Quelle: AEE 2010; EEG 2017; juwi AG 2019



**Photovoltaikanlage auf Konversionsfläche
(ehemaliges US-Munitionsdepot in Hainhaus, Odenwald)**

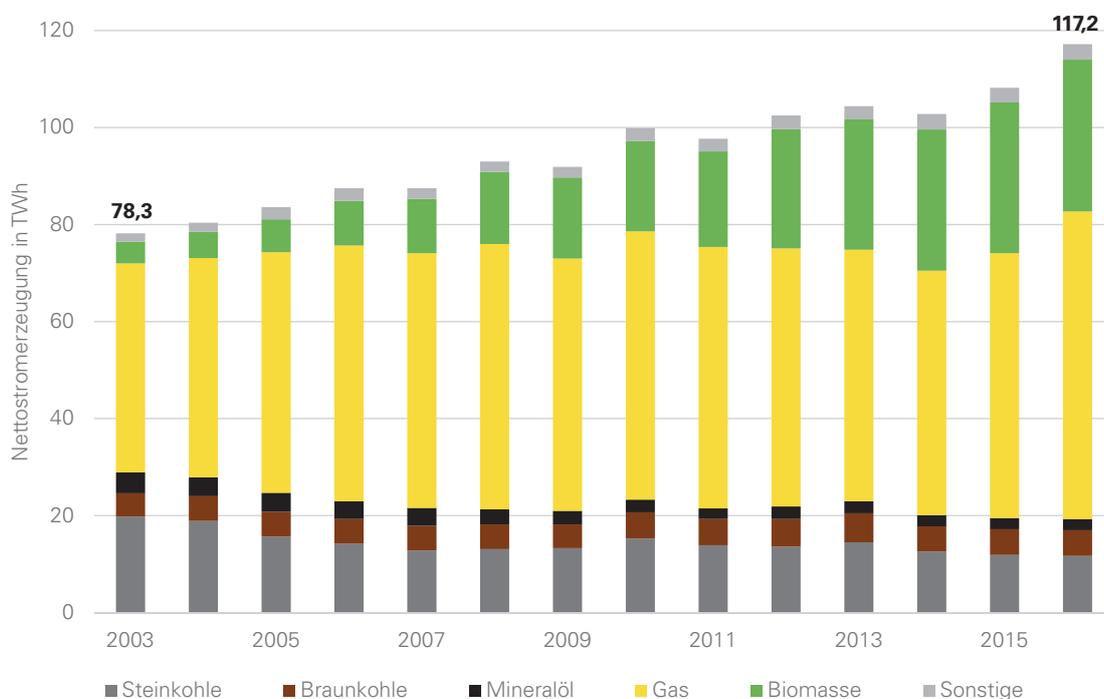
Quelle: Rainer Kaffenberger (OREG)

Kraft-Wärme-Kopplung

Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) stellen Bestandteile innerhalb von Heizkraftwerken dar, bei denen gleichzeitig Strom und Nutzwärme erzeugt werden. Somit kann der verarbeitete Energieträger effizienter genutzt werden. KWK-Anlagen können auf unterschiedlichen Technologien basieren, wie Dampf- oder Gasturbinen, Verbrennungs-, Dampf- oder Stirlingmotoren, ORC-Anlagen oder Brennstoffzellen. Dabei unterscheiden sich diese aufgrund der Stromkennzahl (Verhältnis von elektrischer Leistung zu Nutzwärmestrom) sowie aufgrund des elek-

trischen- und Gesamtwirkungsgrades. Der Vorteil der Nutzung von KWK-Anlagen liegt in der Reduktion von CO₂-Emissionen und in der Einsparung von Primärenergie. Als Grundlage und Anreiz für die Nutzung von KWK-Anlagen existiert das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz. Bereits 2010 konnten KWK-Anlagen einen Anteil von 12,5% an der Stromerzeugung decken, bis 2020 soll sich dieser Anteil laut Prognosen verdoppeln. 2016 lag der Anteil bei 19,1%.

Quelle: Umweltbundesamt 2018f



KWK-Nettostromerzeugung nach Energieträgern

Quelle: nach Umweltbundesamt 2018f

L

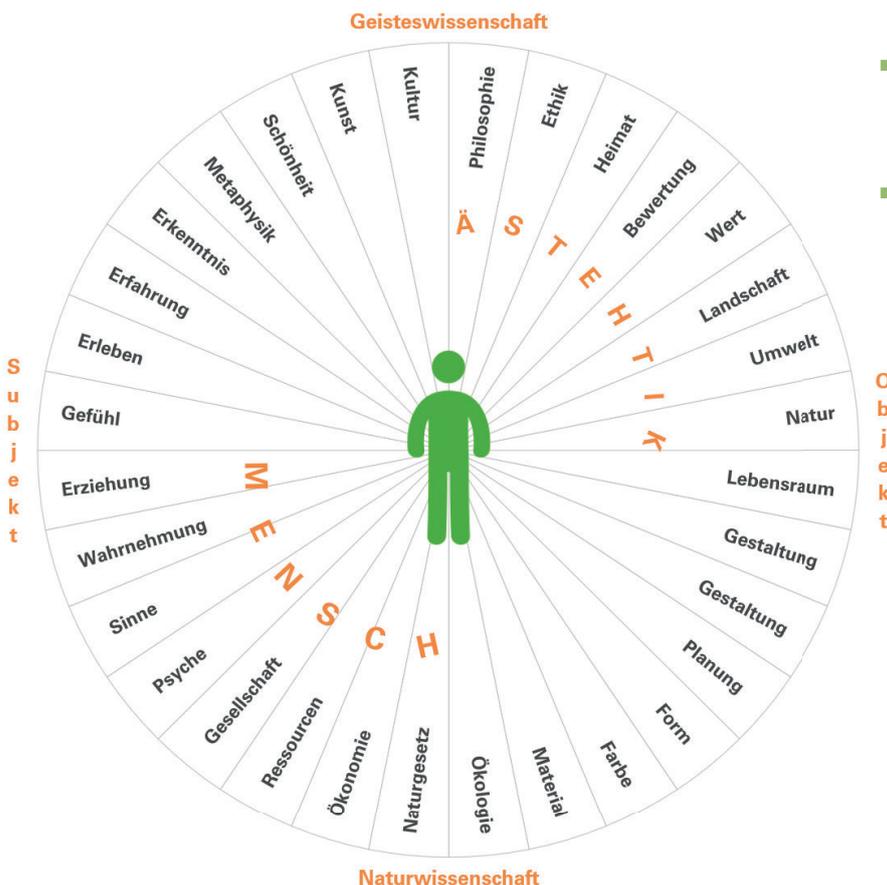
Landschaftsästhetik

Es besteht kein wissenschaftlicher Konsens über den Begriff der Landschaftsästhetik, allenfalls für den der Naturästhetik. Die Naturästhetik beschreibt die direkte Wahrnehmung von Natur (Lesch 1994:136). Demnach müsste sich die Landschaftsästhetik auf die direkte Wahrnehmung von Landschaft beziehen, eine Wahrnehmung, die auch idealisierten Vorstellungen unterliegen kann (romantisches, konservatives und aufklärerisches Landschaftsideal) (Kirchhoff 2014). Doch wie Landschaft wahrgenommen wird, hängt nicht nur von den messbaren physisch-materiellen Objekten sowie dem Gesamtgefüge einer Landschaft ab (Schöbel 2012), sondern auch davon, wie einzelne Menschen oder Gruppen diese bewerten (Linke 2018). Emotionen und Symbolik spielen dabei eine zentrale Rolle und haben zu der Erkenntnis geführt, dass die Wahrnehmung von Landschaft ein individuelles bzw. soziales Konstrukt ist (z.B. heimatische Normallandschaft, stereotype Landschaft) (Kühne und Weber 2017). In diesem Kontext offenbart die Wissenschaft von der landschaftlichen Ästhetik ein komplexes Beziehungsgefüge zwischen Mensch und Umwelt.

Da das Erscheinungsbild und die Ästhetik einer Landschaft häufig Konfliktpotenziale bei der Realisierung von Windkraftanlagen beinhalten, thematisierte Schöbel (2012) deren Verhältnis und zeigte Möglichkeiten der landschaftsgerechten Anordnung von Windparks auf. Dabei wurden sieben Faktoren einer erfolgreichen landschaftsästhetischen Anordnung beschrieben:

- **Landschaftlich einfügen** – Windenergieanlagen sollen in die vorhandenen Strukturen einer Landschaft eingefügt werden und deren Strukturen betonen. Schöbel (2012) spricht dabei von einer Zuordnung, ganz im Gegensatz zur oftmals von Planungsbehörden geforderten Unterordnung.
- **Vielfalt ermöglichen** – Windenergieanlagen sollen so in die Landschaft integriert werden, dass die Vielfalt der Natur und Kultur nicht verringert wird.
- **Gemeinwillen zeigen** – Die Berücksichtigung von Gemeininteressen soll bei der Standortwahl berücksichtigt werden.
- **Eigenart erhalten** – Um die Eigenart der Landschaft zu erhalten, sollen Regeln für die Bewahrung von Natur- und Kulturlandschaftsstrukturen befolgt werden.
- **Dialoge führen** – Windenergieanlagen sollen durch ihren Standort zu einem gesellschaftlichen und geschichtlichen Dialog anregen.
- **Zusammenhänge schaffen** – Windenergieanlagen sollen zu integrativen Teilen eines schlüssigen und ganzheitlichen Landschaftskonzepts werden.
- **Sinn stiften** – Windenergieanlagen sollen sinnfällig (wahrnehmbar und verständlich), sinnhaft (mit Bedeutung) und sinnvoll (als intelligente Veränderung) in die Landschaft integriert werden.

Quelle: Wöbse 2002; Schöbel (2012)



Ästhetik als Element im Beziehungsgefüge Mensch und Umwelt

Quelle: nach Wöbse 2002

Lastgang im Stromnetz

Der Lastgang des Stromnetzes stellt den Stromverbrauch im zeitlichen Verlauf dar. Dabei können Grundlast, Mittellast und Spitzenlast unterschieden werden.

Grundlast bezeichnet die Menge an Strom, die konstant zu jeder Tageszeit in jedem Fall benötigt wird. Diese Menge an Strom wird demnach im Energienetz nicht unterschritten. Kraftwerke, wie Kern-, Braunkohle- und Laufwasserkraftwerke, tragen zur Deckung der Grundlast bei und zählen deshalb zu den Grundlastkraftwerken. Diese sind unflexibel hinsichtlich der Menge des produzierten Stromes pro Tag, stellen so aber zuverlässig eine konstante Energiemenge zur Verfügung. Bestimmte regenerative Energiequellen können in Zukunft dazu beitragen, die Grundlast zu decken. Dazu eignen sich v.a. Biomasseanlagen, da sowohl die energetische Verwertung von Biomasse als auch von Biogas unabhängig von Witterungsbedingungen ist. Wind- und Solarkraftwerke kommen aufgrund ihrer Volatilität dafür nicht in Frage.

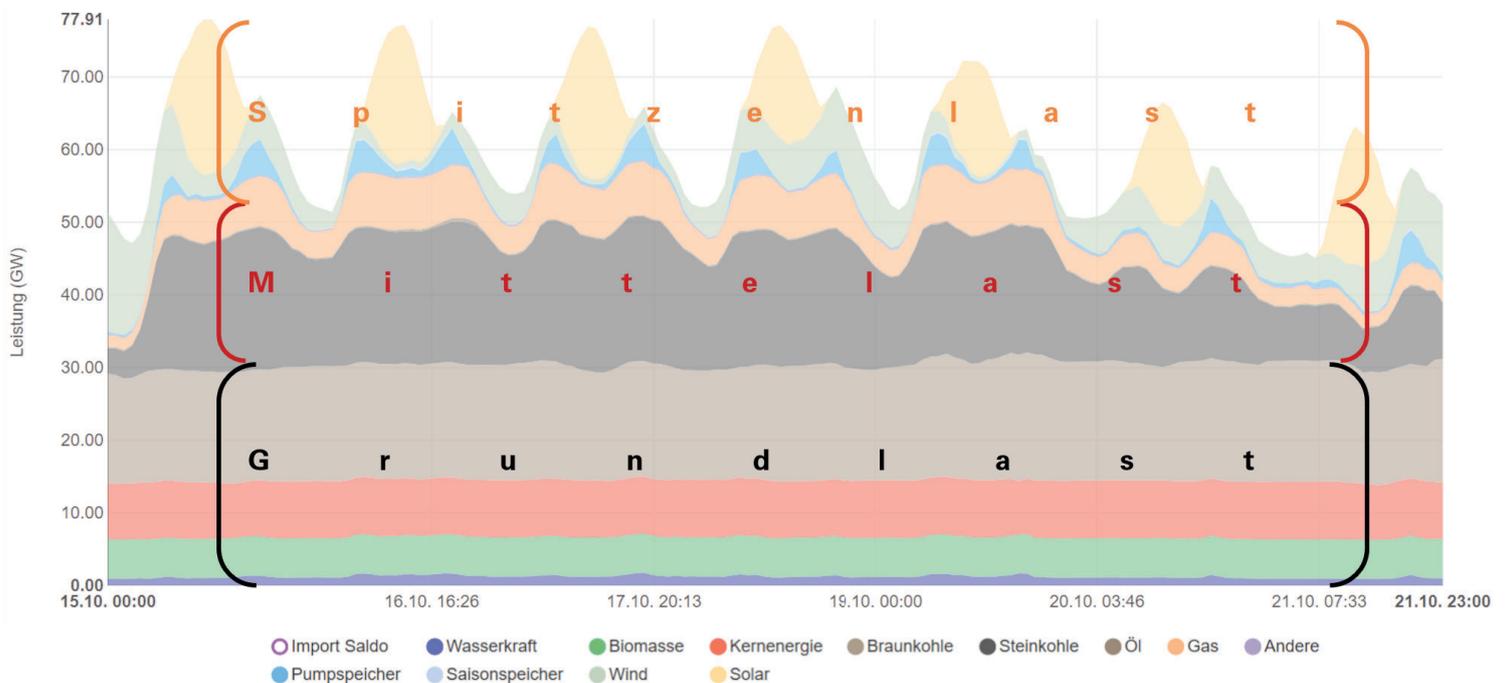
In der Zeit zwischen 06:00 Uhr morgens und 24:00 Uhr nachts steigt die Last im Stromnetz für gewöhnlich stark an. Dies ist auf die hohe Anzahl an aktiven und arbeitenden Menschen

zurückzuführen. Diese Last wird als **Mittellast** bezeichnet. Ein typisches Mittellastkraftwerk ist ein Steinkohlekraftwerk, das je nach Tagesgang der Last die Stromproduktion anfahren und drosseln kann.

Zu Spitzenzeiten, wenn punktuell viele Menschen große Mengen an Strom verbrauchen, wird von **Spitzenlast** gesprochen. Dabei handelt es sich um kurzzeitig auftretende Nachfragespitzen im Stromnetz. Ein Beispiel hierfür ist die Gänsebratenspitze an Weihnachten: Diese beschreibt eine historische Spitze im Stromverbrauch aufgrund der weihnachtlichen Tradition, einen Gänsebraten zuzubereiten. Früher von den Stromversorgern gefürchtet, gibt es diese, hauptsächlich aufgrund des Traditionsrückgangs, nicht mehr. Typische Spitzenlastkraftwerke, die Lastspitzen schnell abfangen können, sind bspw. Pumpspeicherkraftwerke.

Erneuerbare Energien kommen v.a. bei der Deckung der Mittel- und Spitzenlast zum Einsatz. Aufgrund der Volatilität der Energieerzeugung kann deren Anteil jedoch nicht präzise vorausgesagt werden.

Quelle: Fraunhofer Institut 2019; Hoffmann 2013



Lastgang im deutschen Stromnetz am 15.10.2018

Quelle: nach Fraunhofer Institut 2019

L

Liberalisierter Strommarkt

Im Jahr 1998 wurde in der Europäischen Union die Liberalisierung des Strommarktes durchgeführt. Diese Vorgaben wurden in Deutschland durch das *Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts* umgesetzt. Eine wichtige Neuerung dieser Liberalisierung ist, dass VerbraucherInnen seitdem den Stromanbieter frei wählen können. Dies ist auf den Prozess des Unbundling zurückzuführen: Hierbei wurde bei Marktakteuren die Trennung von Stromerzeugung, -transport und -vertrieb beschlossen. Die Liberalisierung stellt somit eine zentrale Voraussetzung der heutigen Akteursvielfalt im deutschen Energiesystem dar und ist darüber hinaus eine Grundlage für die Entwicklung der europäischen Strombörse EEX, die den starren, monopolistischen Betrieb des vorhergehenden Energiemarktes abgelöst hat.

Länder gewesen, das die Vorgaben bereits 1998 umsetzen konnte. Nicht zuletzt ist Deutschland das EU-Land mit den meisten Stromanbietern – insgesamt 453 (Stand 2018). Spanien und Dänemark folgten 2003, die Niederlande 2004, Ungarn 2007 und Frankreich 2008. Der Marktanteil der größten Stromerzeuger konnte durch diese Maßnahmen stark verringert werden. In Deutschland verringerte sich deren ursprünglicher Anteil von 80% zwischen 1999 und 2015 um 33%. Auch in Spanien konnte im gleichen Zeitraum der Anteil von 52% auf 25% gesenkt werden. Allein in Ungarn trat eine gegenläufige Entwicklung ein, da sich dort der Marktanteil der großen Stromerzeuger bis 2015 um 14% erhöhte.

Quelle: AEE 2018g; dena 2019b

In Europa wurde die Liberalisierung der nationalen Strommärkte in unterschiedlicher Geschwindigkeit umgesetzt. Deutschland ist eines der



Quelle: pixabay.com

Meeresenergie

Wellenenergie

Die Energie der Wellenbewegungen allen Wassers des Planeten entspricht 10 Millionen Terawattstunden (TWh) pro Jahr (Graw 2012:100). Im Vergleich dazu ist die weltweit jährlich erzeugte Strommenge mit 25.000 TWh (IEA 2018) sehr gering. Dass dieses große Potenzial kaum genutzt wird, liegt einerseits daran, dass die küstenfernen Bereiche der Meere für das menschliche Wirtschaften nur schwer zugänglich sind. Andererseits geht von Wellen eine zerstörerische Kraft aus, die den Kraftwerkskonstruktionen stark zusetzt und eine industrielle Nutzung bislang verhindert hat (Quaschnig 2013:329). Doch gerade die Fähigkeit, die zerstörerische Kraft in Energie umzuwandeln, macht Wellenkraftwerke so interessant für den Küstenschutz (Kaltschmitt et al. 2006:591). Beispielhaft hierfür steht das Wellenbrecherkraftwerk im Hafen der spanischen Stadt Mutriku, das – nach dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule auch OWC-Kraftwerk genannt – den Wellen des Atlantiks die zerstörerische Kraft entzieht und in Strom für 250 Haushalte umwandelt (Graw 2012:100).

OWC-Kraftwerke

OWC ist ein aus dem englischen hergeleitetes Akronym und steht für Oscillating Water Column. Wellenkraftwerke, die mit diesem Prinzip Strom erzeugen (vgl. Abb. Schema eines OWC-Kraftwerks), besitzen eine Kammer (Stahl oder Beton) mit zwei Öffnungen (Falcão, Henriques 2016). Eine Öffnung liegt dabei unterhalb des Meeresspiegels und lässt die einlaufenden Wellen ungehindert in die Kammer ein- und ausströmen. Die zweite Öffnung ist mit der umgebenden Luft verbunden und erlaubt einen Druckausgleich (Quaschnig 2013:328f.). Dieser Druckausgleich ist notwendig, da die Wassersäule in der Kammer oszilliert und die darüber liegende Luft abwechselnd verdrängt und einsaugt. Diese „Atembewegung“ des Kraftwerkes nutzt eine Turbine, die in der zweiten Öffnung sitzt und die Luftströmungen kontinuierlich in Strom umsetzt. Das Besondere an dieser Turbine ist, dass sie unabhängig davon, ob die Luft aus- oder

einströmt, die Drehrichtung beibehält. Prinzipiell können OWC-Kraftwerke überall auf dem Meer installiert werden. Nicht zuletzt werden sie im kleinen Maßstab schon seit Jahrzehnten zur autarken Energieversorgung schwimmender Leuchtbojen eingesetzt, in die sie modulartig integriert werden (Kaltschmitt et al. 2006:594). Große OWC-Kraftwerke werden jedoch direkt an der Küstenlinie errichtet und als wellenbrechende Elemente mit dem Küstenschutz kombiniert (Graw 2012:102ff.).

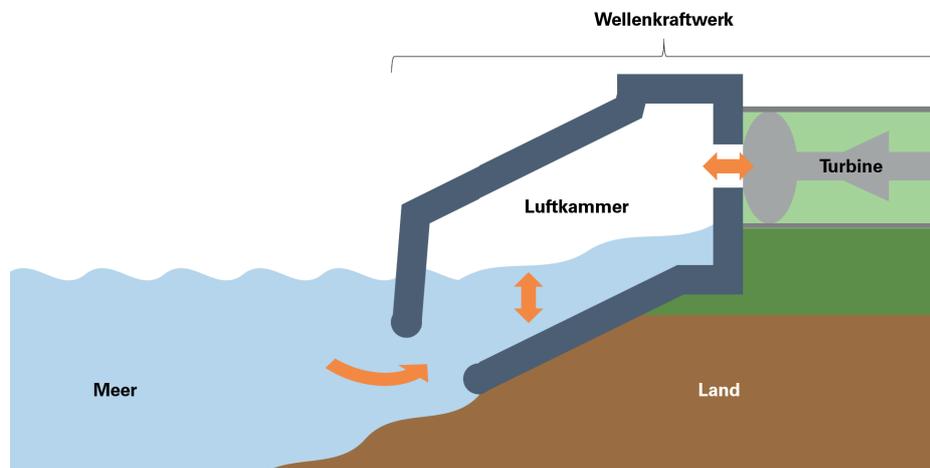
Gezeitenströmungsenergie

Das globale Strompotenzial von Strömungskraftwerken wird auf 1.200 TWh geschätzt (Ruprecht, Weilepp 2012:96), womit ein Achtzehntel des weltweiten Stromverbrauchs gedeckt werden könnte. Im Fokus stehen dabei aber nicht die permanenten Strömungen, wie der Golfstrom, dessen Zirkulation auf globalen Temperatur- und Salzkonzentrationsunterschieden beruht (Kaltschmitt et al. 2006:602). Technische Eingriffe in derlei fragile Systeme werden gescheut, da die Folgen für das globale Klima nicht absehbar sind. Das Interesse gilt vielmehr jenen Strömungen, die durch die Gravitation von Mond, Erde und Sonne angetrieben werden (Ruprecht, Weilepp 2012:95). Da die kinetische Energie dieser täglich mehrmals wechselnden Strömungen ohnehin durch die Kräfte der Reibung aufgezehrt wird, ist die Zwischenschaltung von Turbinen, die einen Teil der Bewegungsenergie in elektrische Energie umwandeln, ökologisch unbedenklich. Gezeitenströmungskraftwerke können zudem unterhalb der Wasseroberfläche platziert werden. Dadurch greifen sie nicht so stark ins Landschaftsbild ein, im Gegensatz zu den aus großen Dämmen bestehenden Gezeitenkraftwerken, die die potenzielle Energie des aufgestauten Wassers nutzen (Kaltschmitt et al. 2006:597ff.). Bei Gezeitenströmungskraftwerken werden die Turbinen frei umströmt, wobei aufgrund der großen Energiedichte von Wasser geringe Strömungsgeschwindigkeiten bereits hohe Energieausbeuten liefern. Um wirtschaft-

lich Strom produzieren zu können, sind dennoch Strömungsgeschwindigkeiten von mindestens 2,5 m/s in maximal 25 m Meerestiefe notwendig. Diese Bedingungen sind in Meeresengen, zwischen Inseln, in Buchten sowie an Landspitzen gegeben (Quaschnig 2013:327). Strömungen von mehr als 4 m/s werden in Kanada (Bay of Fundy), im Ärmelkanal (Alderney) sowie im Norden Schottlands (Pentland Firth) erreicht. Das erste Meeresströmungskraftwerk, mit dem Namen Seaflow (0,3 MW), wurde 2003 in der Straße von Bristol (Südwestengland) errichtet (FIZ 2004). In Deutschland wird das größte Standortpotenzial an der Südspitze von Sylt, mit Strömungsgeschwindigkeiten von 3 m/s, erreicht. Problematisch bei der Erschließung

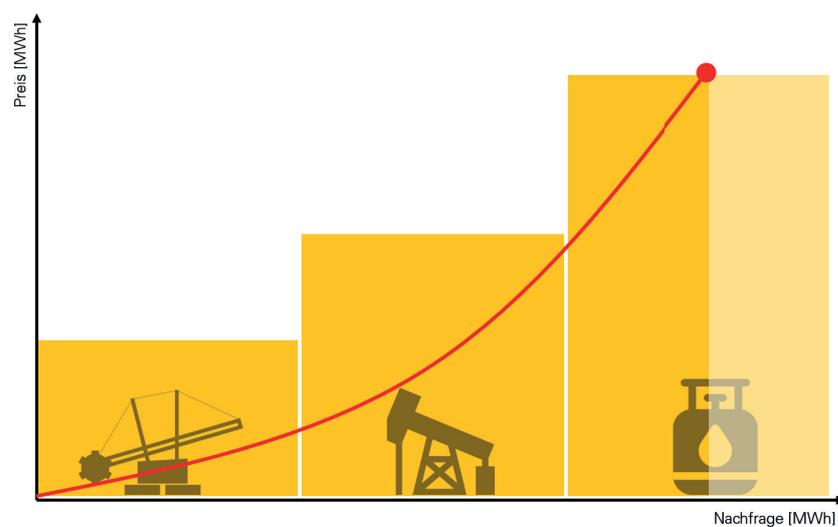
der Potenziale ist die starke Beanspruchung der Turbinen durch die technikfeindlichen Bedingungen in salzhaltigem Wasser. Forschung und Entwicklung konzentrieren sich daher auf die Vergrößerung der konstruktionstechnischen Robustheit (Kaltschmitt et al. 2006:599f.; Quaschnig 2013:327f.; Ruprecht und Weilepp 2012:95ff.). In den Fokus rückt aber auch das Vordringen in größere, technisch aufwändig zu erschließende Meerestiefen, die erhebliche Energiepotenziale bergen (Mejia-Olivaresa et al. 2018).

Quelle: Falcão und Henriques 2016; IEA 2018; Kaltschmitt et al. 2006; Graw 2012; Mejia-Olivaresa et al. 2018; Quaschnig 2013; Ruprecht und Weilepp 2012



Schema eines OWC-Kraftwerks

Quelle: nach OWC Wave Energy 2019



Merit-Order-Effekt an der Strombörse

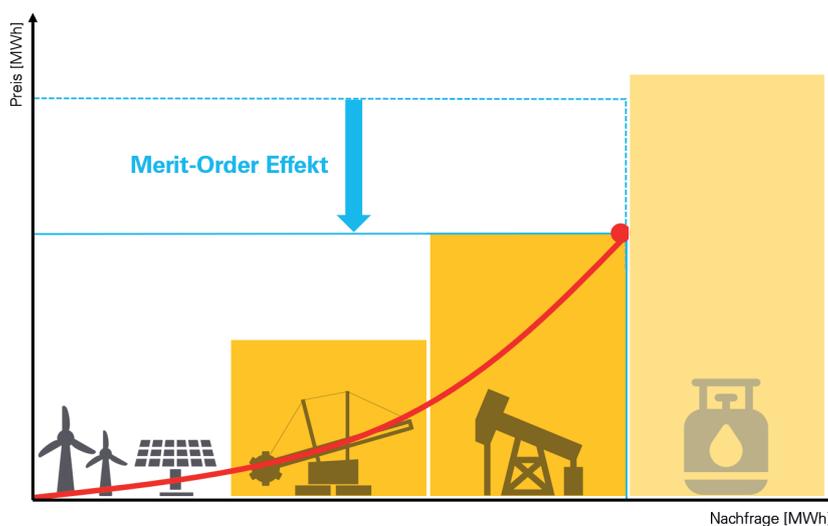
Quelle: nach AEE, Cludius et al 2014

Merit-Order-Effekt

Der Merit-Order-Effekt folgt aus der an der Strombörse erstellten Einsatzreihenfolge der prinzipiell zur Verfügung stehenden Kraftwerke zur Deckung des jeweils gegenwärtigen Strombedarfs in Deutschland. Die Reihenfolge ergibt sich dabei aus den kraftwerksspezifischen Grenzkosten (v.a. Brennstoffkosten, aber auch Investitions- und Wartungskosten). Jene Kraftwerke, die die niedrigsten Grenzkosten aufweisen, werden zuallererst zur Deckung des Strombedarfs herangezogen. Solange der Bedarf noch nicht gedeckt ist, werden weitere Kraftwerke mit immer höheren Grenzkosten zugeschaltet. Das letzte Kraftwerk (Grenzkraftwerk), das noch zur Deckung der Nachfrage benötigt wird, bestimmt mit seinen Grenzkosten den Strompreis an der Leipziger Strombörse EEX. Man spricht hierbei vom Market Clearing Price. Da die erneuerbaren Energien die geringsten Grenzkosten (gehen gegen Null, da keine Brennstoffkosten) aufweisen, werden sie an erster Stelle zur Deckung des Bedarfes verwendet. Der Ausbau erneuerbarer Energien führt damit zu einer sukzessiven Verdrängung teuer produzierender Kraftwerke (Gaskraftwerke, Steinkohlekraftwerke etc.) mit höheren Grenzkosten. Dadurch verringert sich auch der Market Clearing Price, woraus gefolgert werden kann, dass der Ausbau erneuerbarer

Energien den Strompreis an der Börse sukzessive reduziert. Diese Reduktion des Strompreises durch den Markteintritt der erneuerbaren Energien wird als Merit-Order-Effekt bezeichnet. Da die Differenz aus der Vergütungssumme für erneuerbare Energien und dem Börsenpreis durch die EEG-Umlage (derzeit 6,4 ct/kWh) kompensiert werden muss, erhöht der Merit-Order-Effekt zugleich den Kostendruck auf die Stromverbraucher. Somit steigt für den Endverbraucher der Strompreis (ca. 29,4 ct/kWh), obwohl dieser an der Strombörse immer billiger wird. Dieser Effekt wird in dieser Stärke jedoch maximal bis 2036 bestehen, da in jenem Jahr die letzten Anlagen aus der gesetzlichen EEG-Förderung (vor EEG 2017) ausscheiden. Davon abgesehen offenbart der Merit-Order-Effekt, dass durch den Austritt Deutschlands aus der Nutzung der Kernenergie die Braunkohleverstromung aufgrund der nächsthöheren Grenzkosten diesen Platz einnehmen und somit eine gewisse Renaissance erleben wird. Gaskraftwerke können hingegen kaum mehr wirtschaftlich betrieben werden, da gerade zur Mittagszeit, wenn Spitzenlaststrom benötigt wird, die Photovoltaik die Gaskraftwerke bei der Lastdeckung verdrängt.

Quelle: Cludius et al. 2014



Merit-Order-Effekt an der Strombörse

Quelle: nach AEE, Cludius et al 2014

N

Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo)

In Deutschland werden 16,7 Mio. Hektar als landwirtschaftliche Fläche genutzt. Davon werden 14% für den Anbau von Energiepflanzen und 2% von Industriepflanzen genutzt. Diese land- und forstwirtschaftlichen Produkte, die nicht als Nahrungs- und Futtermittel, sondern zur Energieproduktion eingesetzt werden, bezeichnet man als Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo). Diese verteilen sich in Deutschland auf eine Fläche von 2.650 Hektar. Vor allem die

Kulturpflanze Silomais, aus der Biogas und Bioethanol gewonnen wird, hat hierbei einen sehr großen Anteil (2.338 Hektar). Der Vorteil der Nutzung von NawaRos besteht in deren CO₂-Neutralität, da während der Wachstumsphase die gleiche Menge an CO₂ gebunden wird, wie anschließend, bei deren energetischer Umwandlung wieder freigesetzt wird.

Quelle: FNR 2019

Art	Rohstoff	2015	2016	2017
Industriepflanzen	Industriestärke	108.000	128.000	128.000
	Industriezucker	12.300	12.800	15.400
	Technisches Rapsöl	138.000	132.000	131.000
	Technisches Sonnenblumenöl	7.100	7.740	7.740
	Technisches Leinöl	3.500	3.500	3.500
	Pflanzenfasern	1.490	1.520	1.520
	Arznei- und Farbstoffe	12.000	12.000	12.000
	Summe Industriepflanzen	283.000	298.000	300.000
Energiepflanzen	Rapsöl für Biodiesel/Pflanzenöl	805.000	720.000	713.000
	Pflanzen für Bioethanol	238.000	259.000	251.000
	Pflanzen für Biogas	1.340.000	1.394.000	1.374.000
	Pflanzen für Festbrennstoffe	11.000	11.000	11.000
	Summe Energiepflanzen	2.390.000	2.380.000	2.350.000
Gesamtanbaufläche für NaWaRo		2.680.000	2.680.000	2.650.000

Anbau NaWaRo in Deutschland (in Hektar)

Quelle: nach FNR 2019

Naturstromspeicher

Bundesweit existieren 29.844 Windkraftanlagen. Vier davon stehen in Gaildorf (Lkr. Schwäbisch Hall, Baden-Württemberg) und sind Teil eines globalen Pilotprojektes, dem Naturstromspeicher Gaildorf. Dieses durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderte Bauvorhaben vereint mit der Wind- und Wasserkraft zwei erneuerbare Energiequellen, die in Kombination regenerativ, grund- und spitzenlastfähig sind.

Dabei stehen auf einer Anhöhe vier Windkraftanlagen mit jeweils einem Wasserspeicherbecken. Falls ein Stromüberschuss im Netz vorliegt, wird über die Leistung der Windkraftanlagen Wasser aus dem 200 Höhenmeter weiter unterhalb liegenden Reservoir in die Wasserspeicherbecken der Türme gepumpt. Sobald ein Stromdefizit im Netz vorherrscht, wird das Wasser über die Rohrleitungen wieder abgelassen und durchläuft die Turbine, die unterhalb der Speicherbecken platziert ist. Der Naturstromspeicher stellt als Windpumpspeicher damit eine Sonderform der Pumpspeichertechnologie dar.

Die Gondeln der vier Windkraftanlagen befinden sich alle auf derselben geodätischen Höhe. Aus der Stadt Gaildorf oder einer größeren Entfernung betrachtet, formen die Windkraftanlagen ein harmonisches Ensemble und wirken dadurch sinnstiftend und ästhetisch, so wie Schöbel (2012) es fordert. Mit einer Nabenhöhe von 178 Metern und einem Rotordurchmesser von 137 Metern handelt es sich bei diesen Anlagen, die eine installierte Leistung von jeweils 3,4 MW aufweisen, um die größten Windkraftanlagen

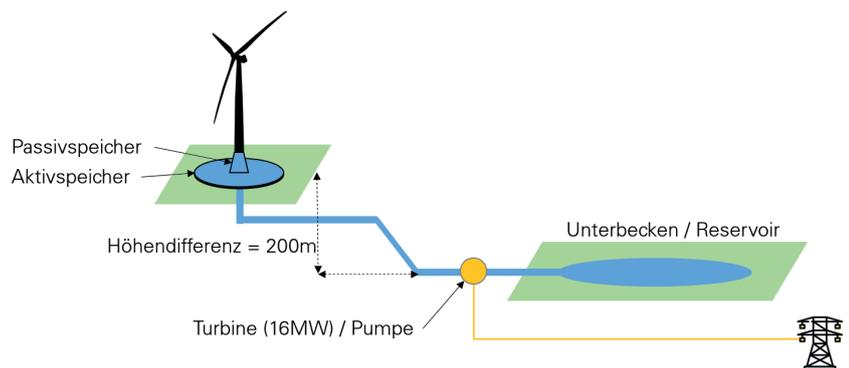


Windkraftanlagen mit Passivspeicher in Gaildorf

Quelle: Lucas Schwarz

gen der Welt. Die Jahresstromerzeugung liegt bei 42 GWh.

Die Speicherbecken der Türme haben eine Speicherkapazität von 160.000 l Wasser. Dies entspricht einer Speicherkapazität von 70 MWh und einer Netzeinspeisungsleistung von 16 MW, wobei die Wasserkraft über Francis-Turbinen in elektrische Energie umgewandelt wird. Francis-



Funktionsprinzip des Naturstromspeichers in Gaildorf

Quelle: nach Sterner und Stadler 2014

Turbinen sind radial von außen nach innen durchströmte sowie axial ausströmende Überdruckturbinen und können als horizontale aber auch vertikale Welle genutzt werden. Ein derartiges Pumpspeicherkraftwerk ist ab einem Höhenunterschied von 150 m rentabel, in Gaildorf liegt der Unterschied bei 200 Höhenmetern.

Bei der Errichtung der Anlage war die lokale Unterstützung der Bürger von Anfang an gegeben und demokratisch legitimiert. So wurde im Dezember 2011 ein Bürgerentscheid zum Projekt durchgeführt, bei dem insgesamt 3.946 Bürgerinnen und Bürger ihre Stimme abgegeben haben. Dabei stimmten 56,4% für die Durchführung des Projekts. Die Genehmigung des Naturstromspeichers erfolgte am 06.05.2014. Im gesamten Projekt wurde dabei auf eine transparente Kommunikation sowie die Einbindung der lokalen Behörden und Organisationen geachtet. Darüber hinaus wurden Eingriffe in die Landschaft möglichst gering gehalten.

Quelle: AEE 2010; BWE 2018; Eiselt 2012; Giesecke et al. 2014; Naturstromspeicher GmbH 2016, 2018; Oeding und Oswald 2016; Schöbel 2012; Sterner und Stadler 2014

N

Nennleistung

Die vom Hersteller angegebene maximal erreichbare Leistung eines Gerätes zur Erzeugung, Übertragung und zum Verbrauch von Energie wird als Nennleistung bezeichnet. Bei Anlagen, die zur Stromerzeugung genutzt werden, ist die Nennleistung äquivalent zur Dauerleistung. Die Dauerleistung stellt die höchste Leistung einer Anlage dar, die bei ordnungsgemäßem Betrieb ohne Einschränkung der Anlagenlebensdauer und Sicherheit erbracht werden kann. Aufgrund der starken Volatilität erneuerbarer Energien wird deren Nennleistung nur zu einem geringen Anteil ausgeschöpft. Die tatsächliche Leistung liegt damit witterungsbedingt weit unter den technischen Möglichkeiten.

Quelle: Next Kraftwerke GmbH 2019

Netzausbau

Das Stromübertragungsnetz unterliegt einem ständigen Wandel. Durch den Markteintritt der erneuerbaren Energien haben sich die Anforderungen an diese Infrastruktur stark verändert, so dass ein grundlegender Netzausbau und -umbau unausweichlich ist.

Der Netzausbau lässt sich in fünf wesentliche Schritte unterteilen: Die Übertragungsnetzbetreiber Amprion, Tennet; TransNetBW und 50 Hertz erarbeiten gemeinsam Szenarien zum Netzausbau. Diese unterscheiden sich v.a. im Hinblick auf den zukünftigen Strombedarf sowie angesichts des künftig zur Verfügung stehenden Kraftwerksparks. Anhand der verschiedenen Szenarien können unterschiedliche Bedarfe zum Ausbau berechnet werden. Diese Resultate werden im Netzentwicklungsplan zusammengetragen, der nicht nur von Übertragungsnetzbetreibern, sondern auch von der Bundesnetzagentur bestätigt werden muss.

In den darauf basierenden Bundesbedarfsplan fließen jedoch nicht nur technische Belange, sondern auch Umweltaspekte mit ein. Der Bundesbedarfsplan umfasst eine Liste der Leitungsvorhaben, die der Bundesregierung zur Orientierung vorgelegt wird. Um die Realisierung der

Netto-Stromerzeugung

Die Nettostromerzeugung stellt die Strommenge dar, die von einem Kraftwerk bzw. Land produziert wird, abzüglich des Kraftwerkeigenverbrauchs und der Netzverluste.

Quelle: AEE 2018f



vorgeschlagenen Leitungskorridore abwägen zu können, wird die Raumordnung bzw. die Bundesnetzagentur aktiv. Dabei werden im Zuge der Bundesfachplanung alle notwendigen Belange zum Leitungsbau abgewogen. Die Überlegungen münden schließlich im sog. Planfeststellungsverfahren, in dem die Leitungsverläufe konkretisiert und hinsichtlich ihrer Raumverträglichkeit überprüft werden.

Häufig wird in der Öffentlichkeit die Frage diskutiert, ob der Netzausbau mit Hilfe von Freileitungen oder Erdkabeln erfolgen soll. Beide Technologien haben dabei Vor- und Nachteile. Bei Freileitungen kann der Strom entweder als Dreh- oder Gleichstrom transportiert werden. Die Übertragung durch Dreh- bzw. Wechselstromtrassen stellt dabei die kostengünstigere Variante dar, ist aber gleichzeitig auch mit großen Transportverlusten verbunden (10% auf 1.000 km). Hier bietet sich der Transport über Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungstrassen an, wo die Transportverluste nur bei 2-4% pro 1.000 km liegen. Der größere Wirkungsgrad geht jedoch mit erhöhten Installationskosten einher. Freileitungen haben generell den Vorteil, dass diese nur wenig Fläche am Boden verbrauchen und im Vergleich zu Erdtrassen keiner

komplexen Installation bedürfen. Dennoch sind diese immer mit einem starken Eingriff in das Landschaftsbild verbunden. Erdkabel bringen neue technische Herausforderungen mit sich: Dazu gehört das Problem des Wärmeabtransports und des Platzverbrauchs. Zudem sind Erdkabel um den Faktor 5-20 teurer als Freileitungen (abhängig vom anstehenden Gestein). Der Impact auf das Landschaftsbild ist jedoch sehr gering, weswegen von einer größeren Akzeptanz in der Bevölkerung auszugehen ist.

Der Netzausbau stellt insgesamt eine große Investition dar. Laut den Netzentwicklungsplänen 2024 belaufen sich die Kosten für neue Leitungen sowie ergänzende Infrastrukturmaßnahmen

auf 18 Milliarden Euro an Land und 15 Milliarden Euro auf See. Diese Summen können je nach Trassenverlauf abweichen und enthalten noch keine Mehrkosten für die Verlegung von Erdkabeln. Getragen werden die Kosten von den Verbrauchern über die im Strompreis enthaltenen Netzentgelte.

Quelle: Bundesnetzagentur 2019

Netzbetreiber

In Deutschland teilen sich vier Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) und 888 regionale Verteilnetzbetreiber die Aufgabe des Stromtransports. Die „vier Großen“, Amprion GmbH, TenneT TSO, 50 Hertz Transmission und TransnetBW, teilen sich dabei das Gebiet der Bundesrepublik in sog. Regelzonen auf. Deren Aufgabe ist es, die sichere Stromversorgung zu gewährleisten (in §11 EnWG gesetzlich festgelegt). Konkret bedeutet dies, dass die vier ÜNB dafür sorgen müssen, dass die Netzspannung zu jeder Zeit und an jedem Punkt des Netzes annähernd 50 Hertz (+/- 0,2 Hertz) beträgt und das System somit stabil und vor einem Blackout gefeit ist. Die Gebietsmonopole können mit der Karte *Netzebenen des deutschen Stromnetzes* verglichen werden.

				
HS-Netz	11.000 km	10.700 km	3.200 km	9.980 km
Netzgebiet	73.100 km ²	140.000 km ²	34.600 km ²	109.360 km ²
Kunden	29 Mio.	20 Mio.	15 Mio.	18 Mio.
MitarbeiterInnen	1.250	1.700	600	950

Quelle: Amprion et al. 2019

N

Netzebenen

Das deutsche Elektrizitätsnetzwerk stellt ein Verbundsystem mit einer Netzlänge von 1,78 Mio. km Länge dar. Die vier Übertragungsnetzbetreiber TenneT, TransNetBW, 50Hertz und Amprion teilen sich dabei die Zuständigkeit für das Gebiet der Bundesrepublik auf. Die hohe Zuverlässigkeit des Stromnetzes, mit einer Verfügbarkeit von 99,8%, ist ein bedeutender Faktor für den Wirtschaftsstandort Deutschland.

Die Komponenten des Elektrizitätsnetzwerks sind Kraftwerke mit Generatoren zur Stromer-

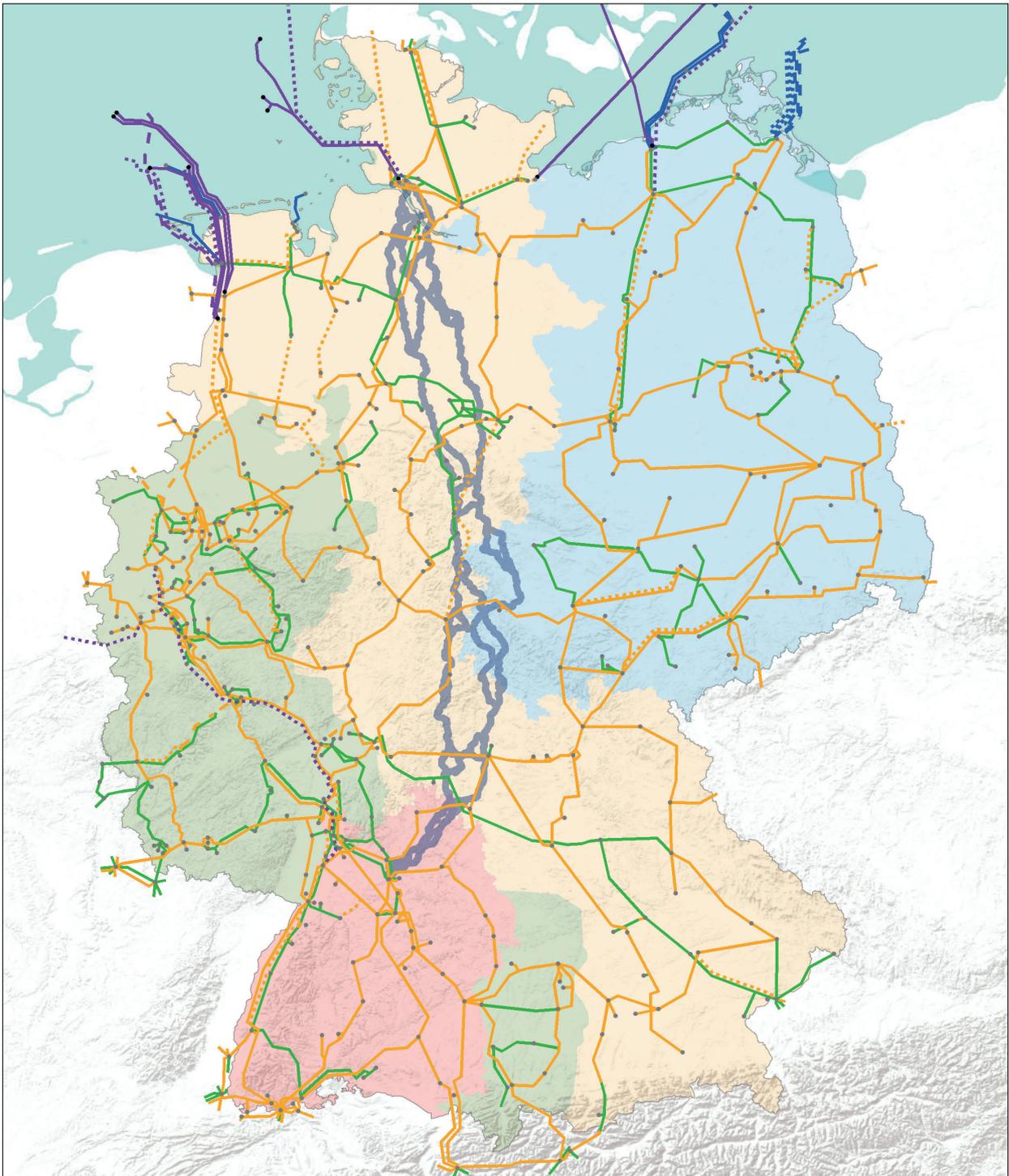
zeugung, Umspannwerke mit Transformatoren und Schaltanlagen, Netze, bestehend aus Freileitungen oder Erdkabeln sowie zusätzliche Hilfs- und Schutzeinrichtungen. Im Verbundsystem bestehen vier Netzebenen: das Höchstspannungsnetz (220/380 kV), das Hochspannungsnetz (60-110 kV), das Mittelspannungsnetz (16-30 kV) und das Niederspannungsnetz (0,23-0,4 kV).

Quelle: BMWi 2015a; Peyke et al. 2013; VDE FNN 2018

	Höchstspannungsnetz	Hochspannungsnetz	Mittelspannungsnetz	Niederspannungsnetz
Spannung	220/380 kV	60-110 kV	16-30 kV	0,23-0,4 kV
Länge	36.000 km	74.700 km	494.000 km	>1 Mio. km
Verteilung	Elektrizitätsverteilung	Ballungszentren	Industriebetriebe	Stromkunden (private Haushalte)
Einspeisung	Kraftwerke (Atom, Kohle, Gas), Wasser- und Pumpspeicherkraftwerke, Offshore-Windparks	Kraftwerke (Kohle, Gas), PV-Großanlagen, Windparks	Kraftwerke (Gas), kleine EE-Anlagen (z.B. Biogasanlagen)	Dezentrale Kraftwerke, kleine EE-Anlagen
Abnehmer	Nachbarstaaten	Großindustrie, Städte	Handel, Industrie, Kleinstädte	Gewerbe, private Kunden

Gliederung des deutschen Stromnetzes

Quelle: nach BMWi 2015a; Peyke et al. 2013



Höchstspannungsebene	Netzinfrastruktur	Netzgebiete
<ul style="list-style-type: none"> 380kV / im Bau / in Planung 220kV 150-220kV / im Bau / in Planung HGÜ / im Bau / in Planung 	<ul style="list-style-type: none"> Umspannwerk HGÜ-Station 	<ul style="list-style-type: none"> 50Hertz Amprion TenneT TransNetBW
SuedLink Planungskorridor		

0 50 100 200 300 km

N
 Datengrundlage: VDE FNN 2018
 Kartengrundlage: GADM
 Entwurf/Kartographie: Lucas Schwarz
 Stand: November 2018

Netzebenen des deutschen Stromnetzes

Quelle: nach VDE FNN 2018

N

Netzparität

Die Netzparität bezeichnet einen Zeitpunkt, an dem die Kosten für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Gleichgewicht ist mit Strombezug aus dem Netz, das von konventionellen Energieträgern gespeist wird.

Quelle: Paschotta 2018

NIMBY

Die NIMBY-Haltung stellt eine persönliche, egoistische Haltung gegenüber dem Ausbau von erneuerbaren Energien, insbesondere Windkraftanlagen, dar und ist eine Abkürzung für *Not-In-My-Backyard*. Dabei geht es um Menschen, die den Ausbau erneuerbarer Energien generell befürworten, den konkreten Ausbau in der eigenen Wohnumgebung jedoch strikt ablehnen. Wolsink (2000:57) stellt jedoch fest, dass der Widerstand gegenüber erneuerbaren Energien nicht im Ansatz durch den NIMBY-Effekt zu erklären ist, sondern komplexere soziale Prozesse am Werk sind, die stark von den jeweils lokalen Kontexten geprägt werden. Daher definiert er vier Widerstandstypen (*Resistance Types A-D*):

- **Resistance Type A:** Generelle Befürwortung des Ausbaus von Windkraftanlagen, dennoch Widerstand, wenn es um den Ausbau in der eigenen Umgebung geht. Dies stellt für Wolsink den grundlegenden NIMBY-Typen dar.
- **Resistance Type B:** Der Resistance Typ B unterscheidet sich vom Typ A dadurch, dass er eine generelle Ablehnung gegenüber der Windenergie hat. Dieser Typ lässt sich somit unter der Abkürzung NIABY zusammenfassen – *Not-In-Any-Backyard*.
- **Resistance Type C:** Eine positive Haltung gegenüber der Windenergie erfährt einen Wandel aufgrund von lokalen Diskursen und Wahrnehmungen von Risiken.
- **Resistance Type D:** Die Haltung des Typ D leitet sich aus dem Widerstand gegenüber einem konkreten Projekt ab und nicht aus einer ablehnenden Haltung gegenüber der Technologie. Dabei soll die Technologie genutzt werden, aber nur unter bestimmten Bedingungen (bspw. „geeigneter“ Standort). Dabei wird meistens argumentiert, dass die Nutzung eines bestimmten Standortes nicht nachhaltig sei, die Landschaft zu stark überformt würde oder Kosten und Nutzen nicht im richtigen Verhältnis stünden.

Quelle: Wolsink 2000



Quelle: pixabay.com

Online-GIS



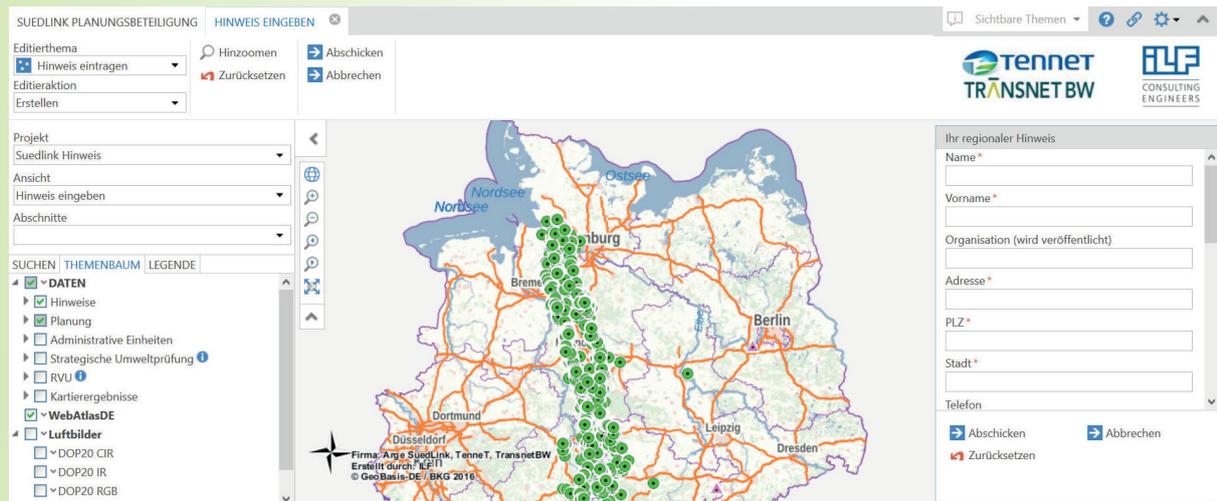
Um der breiten Bevölkerung den Stand der Energiewende näherbringen, Partizipation ermöglichen und ProjektiererInnen einen ersten Überblick über die natürlichen Potenziale an einem Standort verschaffen zu können, werden Geographische Informationssysteme (GIS) eingesetzt. Dabei gibt es eine Vielzahl an GIS-Systemen, die aktiv genutzt werden, um BürgerInnen im Kontext der Energiewende zu ermächtigen und dabei etwaige Einwände bezogen auf spezifische Planungsprozesse in die kartographischen Visualisierungen miteinfließen zu lassen.

Ein Beispiel für ein intensiv genutztes, partizipatives GIS-System zur Planung erneuerbarer Energien stellt das von TenneT und TransnetBW realisierte GIS zur Planung der SUEDE-Link Trasse dar. Hierbei wurden die möglichen Trassenverläufe eingezeichnet und BürgerInnen haben

die Möglichkeit, Hinweise jeglicher Art für die Planung einzugeben. Dabei können die Hinweise auch von anderen NutzerInnen eingesehen und exportiert werden.

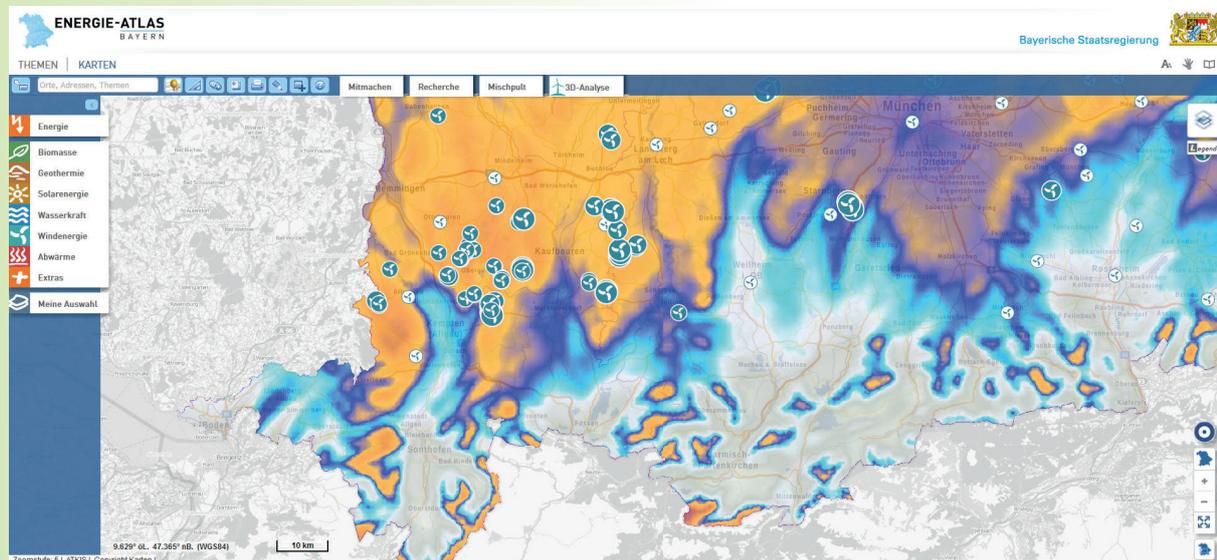
Weitere GIS-Systeme, die in fast jedem Bundesland existieren, stellen die digitalen Energie-Atlanten dar. Der Energie-Atlas Bayern ist hierfür ein Beispiel, in dem der Ausbaustand, natürliche Faktoren und raumordnungsrechtliche Festlegungen eingesehen werden können. Darüber hinaus bietet dieses GIS-System die Möglichkeit, Anlagendaten zu exportieren und in lokale GIS-Applikationen zu laden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, eine 3D-Animation von Windkraftanlagen in einer Landschaft zu erzeugen. Diese können zu Informations- und Planungszwecken genutzt werden.

Quelle: StMWi Bayern 2019; TenneT et al. 2019



Ausschnitt aus dem GIS-System zur Planung der SUEDE-Link Trasse

Quelle: TenneT et al. 2019



Ausschnitt aus Energie-Atlas Bayern (südwestliches Oberbayern + Allgäu)

Quelle: StMWi Bayern 2019

P

Pariser Klimaabkommen

Das Pariser Klimaabkommen stellt ein historisch-bedeutsames Klimaschutzabkommen dar, das im Dezember 2015 von 196 Ländern unterzeichnet wurde. Es handelt sich dabei um einen völkerrechtlich bindenden Vertrag, der den Klimawandel und seine Auswirkungen abschwächen und ausbremsen soll. Dabei wurde ein Plan entwickelt, um die Erderwärmung auf unter 2°C gegenüber vorindustriellen Referenzwerten zu begrenzen. Dabei wurden folgende Eckpunkte festgehalten:

Emissionsminderung

- Langfristiges Ziel: Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf unter 2°C gegenüber vorindustrieller Zeit
- Anstieg auf 1,5°C begrenzen

Transparenz und globale Bilanz

- Alle fünf Jahre werden strengere Ziele festgelegt, falls dies nach wissenschaftlicher Erkenntnis erforderlich ist
- Öffentliche Berichterstattung über Fortschritte bei der Zielverwirklichung

Anpassung

- Staatliche Erhöhung der Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel
- Internationale Unterstützung für Entwicklungsländer bei Klimaanpassungsstrategien

Verluste und Schäden

- Verluste und Schäden im Kontext des Klimawandels sollen minimiert und ausgeglichen werden
- Verbesserung der internationalen Zusammenarbeit zum Wissensaustausch

Städte, Regionen und lokale Behörden

- Maßnahmen zur Emissionsminderung
- Erhöhung der Widerstandsfähigkeit (Resilienz)

Unterstützung

- EU (und andere Industrieländer) sollen auch in Zukunft Klimaschutzmaßnahmen unterstützen (v.a. in Entwicklungsländern)

Das Pariser Klimaabkommen trat am 04.11.2016 in Kraft. Im Jahre 2021 wird dieser Vertrag das Kyoto-Protokoll ersetzen. Der Vertrag setzt dabei auf die nationale Selbstverpflichtung. Dies bedeutet, dass alle Staaten, die den Vertrag ra-

tifiziert haben, eigene Emissionsziele festlegen können.

Mitte 2017 kündigten die Vereinigten Staaten ihren Austritt aus dem Klimaabkommen zum Jahr 2020 an.

Quelle: Europäische Kommission 2019; LPB BW 2019

Peak-Oil

Bridge (2010:524f.) sieht in den scharfen Debatten um Peak Oil die ökologisch motivierte Ankündigung einer neuen Energieordnung. Dabei handle es sich um nicht weniger als einen Wendepunkt in der Geschichte der menschlichen Zivilisation, an dem sich die modernen Industriestaaten von ihrer Ölabhängigkeit befreien würden. Neomarxistische Gruppierungen wollen im Ende des Ölzeitalters gar eine apokalyptische Zeitenwende erkennen, bei der sich die Natur an der ökologischen Überheblichkeit des Kapitalismus rächen wird. Nach Bettini und Karaliotas (2013:331f.) erlangt die Peak Oil-Narration dadurch eine Symbolik, die weit über die mathematischen Berechnungen zur Knappheit fossiler Energieträger hinausreicht und zur generellen Kritik an einem System erweitert wird, das ausschließlich an Wachstum orientiert ist. Peak Oil wird dabei als unbestreitbare Tatsache vermarktet und zu einer rhetorischen Alarmglocke verengt, so Bettini und Karaliotas (2013:334f.) weiter. Die propagierte Unausweichlichkeit einer Transformation wird jedoch immer wieder durch die Anpassung von Prognosen zur Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe untergraben. So gelingt es mittels neuer Technologien, die Reichweite fossiler Energieträger stetig zu vergrößern (Gold 2014). Hierdurch wird klar, dass es sich bei den Debatten um Peak Oil um eine unterkomplexe Form, der sich am Erdöl ergehenden Wachstumskritik handelt, die ihre Argumentation allein über den Bezug zur Geologie zu entfalten versucht. Vor diesem Hintergrund ist die Aussage von Bridge (2010:525), wonach in der Bezeichnung Peak Oil allein die Interessen jener zum Ausdruck kommen, die den Niedergang des

Kapitalismus, das Ende der Globalisierung und den Beginn der Dekarbonisierung propagieren, nicht korrekt. Denn wo die linksorientierte Instrumentalisierung von Peak Oil Gefahr läuft, nicht mehr ernst genommen zu werden, bietet sich für Konservative und Neoliberale die Gelegenheit, die hegemonialen Perspektiven auf Umwelt sowie Energiesicherheit zu verstetigen und einen post-fossilen Kapitalismus zu etablieren (Bettini und Karaliotas 2013:337f.).

Quelle: Bettini und Karaliotas 2013; Bridge 2010; Gold 2014

Prognosen

Energieprognosen und -szenarien werden genutzt, um einen Eindruck über die Entwicklung des Energiemarktes in Deutschland zu erhalten sowie auf aktuelle Geschehnisse reagieren und potenzielle Ausbaupfade ergründen zu können. Dabei werden Szenarien entwickelt, die auf unterschiedlichen politischen und technischen Grundannahmen hinsichtlich des Energiesektors beruhen. Die letzte Energiereferenzprognose wurde Ende 2012 vom Bundeswirtschaftsministerium in Auftrag gegeben.

In dieser von EWI (*Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln*), GWS (*Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH*) und Prognos AG durchgeführten Studie wurde die Entwicklung des Energiemarktes bis 2030 prognostiziert und ein Trendszenario bis 2050 dargestellt. Hierbei wurde analysiert, dass bis 2025 die Strompreise in Deutschland für Haushalte, Handel, Gewerbe und Industrie steigen werden. Den erneuerbaren Energien wurde ein rasches Wachstum vorausgesagt, v.a. bei der Wind- und Solarenergie geht man von hohen Ausbauraten aus. Der Primärenergieverbrauch soll nach der Studie, trotz steigender Wirtschaftsleistung, geringer werden. Im Jahre 2020 sollen die energiebedingten Treibhausgasemissionen gegenüber dem Basisjahr 1990 um 36% und bis 2050 um 65% niedriger sein.

Andere Studien prognostizieren eine andere Ent-

wicklung des deutschen Strommarktes. So hat das Unternehmen *Exxon Mobil* in einer Studie für den Zeitraum 2018 bis 2040 folgende Vorhersagen getätigt: Mit 60% sollen im Jahr 2040 Mineralöl und Erdgas die wichtigsten Energieträger in Deutschland sein. Die Erneuerbaren hingegen sollen mit 40% neben Erdgas die wichtigsten Stützen der Stromversorgung darstellen. Auch in dieser Studie wird prognostiziert, dass der Primärenergieverbrauch rückläufig sein wird: bis 2040 soll sich dieser um 30% gegenüber 1990 verringern.

Die Prognosen unterscheiden sich deshalb so stark, da sie auf unterschiedlichen Interessenlagen basieren. In der Politik finden derart weit in die Zukunft gerichtete Prognosen zu komplexen Systemen ohnehin nur wenig Eingang, da die Aussagen doch eine zu große Unsicherheit bergen und nicht in die Fristigkeit der üblicherweise kurzen Legislaturperioden passen.

Dennoch werden Prognosen auch für die europäische oder globale Ebene erstellt. So bietet bspw. der *World Energy Outlook* Szenarien für den gesamten Planeten an, die seitens der *Internationalen Energieagentur (WEO)* erarbeitet wurden. Diese Prognosen orientieren sich jedoch vorwiegend an ökonomischen Kennzahlen und beinhalten bspw. die Information, dass die Kosten für Wind- und Solarkraft sinken, die Ölpreise hingegen weiter steigen werden.

Quelle: EWI et al. 2014; Exxon Mobil 2018; IEA 2018

P

Photovoltaik

Die Photovoltaik nutzt die direkte und indirekte Strahlungsenergie der Sonne und wandelt diese in elektrische Energie um. Die Funktionsweise von Photovoltaik-Zellen lässt sich in die folgenden drei Schritte zusammenfassen: Absorption der Photonen im Halbleitermaterial, Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren und Trennung der Ladungsträger im elektrischen Feld des p-n-Übergangs.

Zu den gängigen Modultypen gehören monokristalline und polykristalline Zellen, aber auch Dünnschicht-, Multijunction-, Konzentrierende, Organische oder Farbstoffzellen.

Monokristalline Solarzellen sind durch ein einheitliches Kristallgitter gekennzeichnet. Zur Herstellung wird hochreines Silizium geschmolzen und daraus ein Siliziumstab gezogen. Durch Sägedraht werden dünne Scheiben aus diesem Stab geschnitten, die sogenannten Wafer, die keine kristallographischen Defekte aufweisen. Zusätzlich zur Bor-Dotierung, die für diesen Herstellungsprozess notwendig ist, findet eine Phosphor-Dotierung am Ende des Prozesses statt. Monokristalline Solarzellen haben im Vergleich mit bis zu 20% die höchsten Wirkungsgrade. Da jedoch die Herstellung sehr (energie-)aufwendig ist, haben monokristalline Module auch einen hohen Preis.

Zur Herstellung von **polykristallinen Solarzellen** wird Silizium gereinigt, gegossen und anschließend, im Bridgeman-Verfahren, Siliziumblöcke erzeugt. Der Vorteil bei diesem Verfahren ist das Preis-Leistungs-Verhältnis, da das Verfahren deutlich billiger als bei monokristallinen Zellen ist. Polykristalline Solarzellen haben momentan einen Marktanteil in Deutschland von etwa 80%. Von Nachteil sind der geringere Wirkungsgrad (mehr kristallographische Defekte) und das große Gewicht, v.a. im Vergleich zu Dünnschichtmodulen.

Bei **Dünnschichtmodulen** wird der Träger mit einem Halbleiterwerkstoff, wie bspw. Silizium, aber auch Cadmiumtellurid (CdTe), Galliumarsenid (GaAs) oder Kupfer-Indium-Selenid (CuInSe₂), beschichtet. Die Herstellung ist weniger komplex als bei kristallinen Solarzellen, der

Wirkungsgrad ist aber auch deutlich geringer (5-10%). Die Vorteile dieser Technologie liegen in der kostengünstigen Herstellung, dem geringen Verbrauch an Ressourcen und dem geringen Gewicht. Zusätzlich haben Dünnschichtmodule ein hohes Ertragspotenzial bei diffuser Strahlung sowie temperaturunabhängige Stromerträge.

In **Multijunction-Solarzellen** (auch Tandem- oder Triple-Solarzellen) werden mehrere Halbleiterschichten gestapelt und somit mehrere p-n-Übergänge genutzt. Die Vorteile dieser Technologie liegen in der optimalen Nutzung des einfallenden Lichtspektrums. Bei herkömmlichen Solarzellen kann dieses nicht vollständig genutzt werden und die überschüssige Energie wird in Wärme umgewandelt. Der Wirkungsgrad liegt bei über 30%. Die Herstellung ist jedoch sehr teuer. Multijunction-Solarzellen werden daher in kleiner Stückzahl und v.a. in der Raumfahrt eingesetzt.

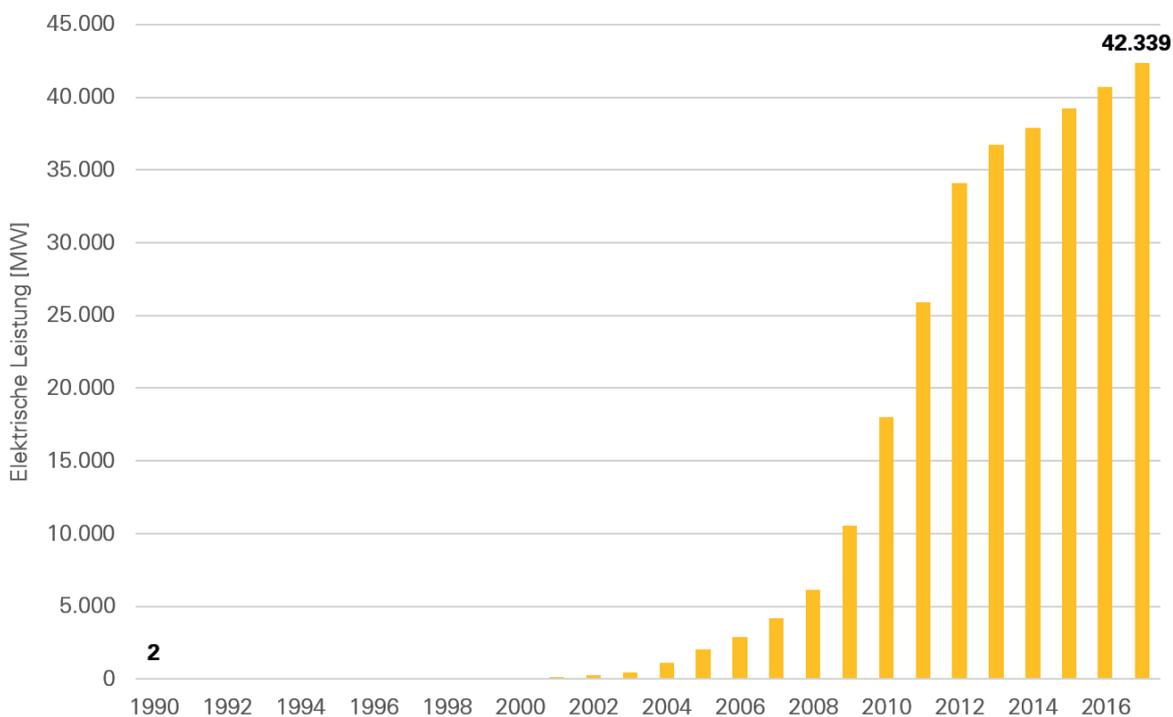
Eine weitere Solarzelle der dritten Generation stellt die **konzentrierende Solarzelle** dar. Dabei wird dem eigentlichen Modul eine Fresnel-Linse vorgeschaltet, um eine Konzentration der einfallenden Strahlungsenergie zu ermöglichen. Aufgrund der hohen Konzentration (bis zu 500-fach) benötigt die Solarzelle eine Kühlung, die unter dem Modul angebracht ist. Somit können Wirkungsgrade von 29-40% erzielt werden. Durch die Notwendigkeit einer technischen Nachführung der Modulfläche nach dem Sonnenstand, um jederzeit eine optimale Konzentration zu erreichen, lohnt sich diese Technologie jedoch nur bei sehr hochwertigen Solarzellen, wie zum Beispiel Multijunction-Zellen, und allein im subtropischen Hochdruckgürtel.

Organische Solarzellen basieren auf Kohlenwasserstoffverbindungen. Aufgrund des geringen Materialeinsatzes sind die Herstellungs- und Ressourcenkosten sehr gering. Durch die Flexibilität der Zelle können diese ohne großen Aufwand an sämtlichen Oberflächen angebracht werden. Der Wirkungsgrad ist jedoch mit maximal 12% sehr gering und bedingt somit einen großen Flächenbedarf. Zusätzlich ist die Langzeitstabilität ungenügend.

Eine Abwandlung der organischen Solarzelle stellt die **Farbstoffzelle** (auch Grätzel-Zelle, benannt nach ihrem Erfinder Michael Grätzel) dar. Hierbei wird das Halbleitermaterial durch einen organischen Farbstoff, wie zum Beispiel Chlorophyll, ersetzt. Die Funktionsweise basiert somit auf einer technischen Photosynthese. Mit dieser Technologie konnten bereits Wirkungsgrade von bis zu 20% erreicht werden. Auch die Herstellung in einem nasschemischen Verfahren ist kostengünstig und bescheinigt dieser Technologie ein hohes Entwicklungspotenzial. Forschungsbedarf besteht noch bei der Stabilisierung des Wirkungsgrades und im Hinblick auf die kurze Lebensdauer.

Im Jahr 2017 war in Deutschland eine PV-Leistung von knapp 43 GW_p (Gigawatt Peak) installiert, verteilt auf 1,64 Mio. Module. Dies entsprach einem Anteil von 6,6% am Bruttostromverbrauch.

Quelle: BMWi 2018d; BSW 2018; O'Regan und Grätzel 1991; Photovoltaik.org 2019; Quaschnig 2013; Wesselak et al. 2017



Installierte elektrische Leistung Photovoltaik in Deutschland

Quelle: nach BMWi 2018d

Postfossilismus

Die Chance eines postfossilen Kapitalismus sieht McCarthy (2015:2496) in der Kommodifizierung von Wind, Sonnenlicht, Erdwärme und Wellen, wenngleich er dies aufgrund seiner marxistischen Perspektive prinzipiell ablehnt. Damit würde nicht zuletzt die Natur erneut in den Kreislauf des Kapitals hineingezogen werden. Van den Bergh (2011:881) erkennt hierin einen gangbaren Weg und empfindet die Kritik an Marktwirtschaft und Kapitalismus, die sich einseitig an der Problematisierung von Wachstum abarbeite, ohne dabei zugleich realisierbare Alternativen aufzuzeigen, als zu radikal. Er präferiert daher das a-growth-Konzept, das von einer neutralen Position gegenüber Wachstum ausgeht und soziale sowie ökologische Nachhaltigkeit über Preispolitik, Umweltabkommen und Bildungsinitiativen herzustellen versucht. Die Kommodifizierung von Natur wird seitens der Degrowth-Bewegung jedoch abgelehnt, da sich beim Vergleich des auf Vorschriften basierenden Montreal-Protokolls (Ozon) mit dem handelsbasierten Kyoto-Protokoll (Klimawandel) die größere Wirksamkeit regulativer Maßnahmen gezeigt habe, so Kallis (2011:877). Zudem spricht North (2010:586) in Bezug auf die Möglichkeiten des Marktes von stupider Technikgläubigkeit neoliberaler Enthusiasten, die irrtümlicherweise davon überzeugt sind, dass die schöpferische Zerstörung nach Schumpeter (1954) dazu ausreiche, den gesellschaftlichen Herausforderungen 'Peak Oil' und 'Klimakrise' zu begegnen. Polanyi (1973) sieht in der Marktwirtschaft sogar den Ursprung der Zerstörung aller sozialen und umweltbezogenen Verhältnisse. Deshalb wird für den Aufbau einer symbiotischen Ökonomie geworben (Garcia-Olivares und Sole (2015:31), die jenseits von obsessivem wirtschaftlichem Wachstum liegt (Buch-Hansen 2018:157). Erneuerbare Energien würden sich hierzu eignen, da sie über kollaborative Bottom-up-Mechanismen auf kommunaler Ebene entwickelt werden können und so eine Dezentralisierung sowie Demokratisierung der Energieversorgung erlauben (Rifkin 2013:139).

Quelle: Buch-Hansen 2018; Kallis 2011; McCarthy 2015; van den Bergh 2011; Polanyi 1973; Schumpeter 1954; Olivares, Rifkin 2013; Sole 2015

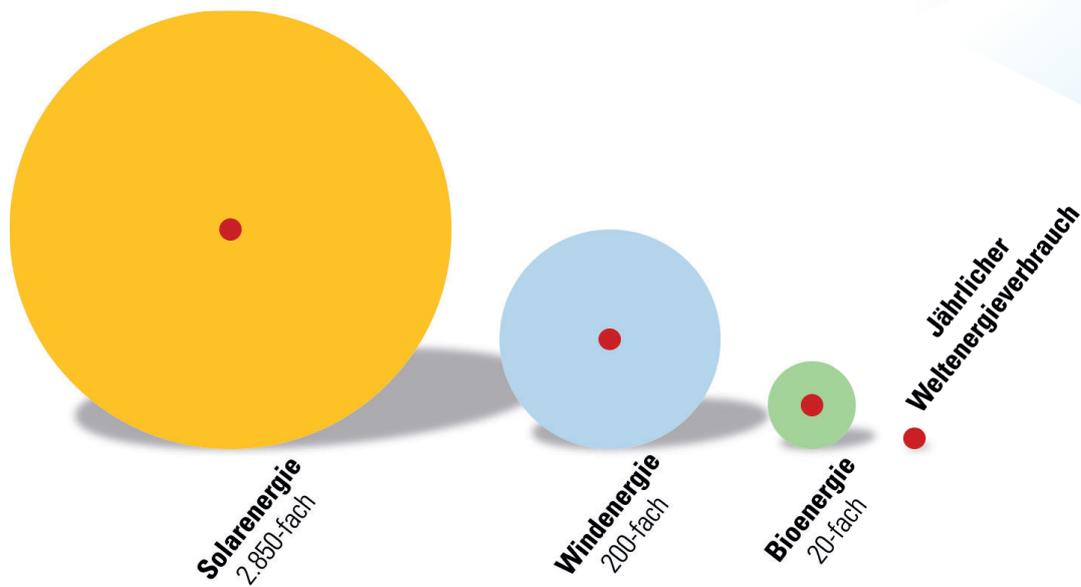
Potenzial

Erneuerbare Energien haben ein großes Ausbaupotenzial in Deutschland. Dabei muss der Potenzialbegriff jedoch in drei Kategorien unterteilt werden: Das **theoretische Potenzial** bezieht sich dabei auf das physikalisch vorhandene Energieangebot in einem Raumausschnitt. Ein Beispiel hierfür ist die Strahlung der Sonne oder das Winddargebot. Das **technische Potenzial** bezeichnet das durch die zur Verfügung stehenden Technologien prinzipiell realisierbare Potenzial. Dieses Potenzial kann sich durch technologischen Fortschritt erhöhen. Durch höhere und leistungsstärkere Windkraftanlagen sowie durch PV-Module mit höheren Wirkungsgraden konnte das technische Potenzial sukzessive erweitert und dadurch ein immer größerer Anteil des theoretischen Potenzials erschlossen werden. Das **wirtschaftliche Potenzial** offenbart, welcher Anteil des technischen Potenzials unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten realisierbar ist. Dabei werden lokale Faktoren, wie administrative Restriktionen oder rechtsverbindliche Regelungen (BImSchG, BNatSchG,...) berücksichtigt. Durch Förderungen können wirtschaftlich suboptimale Standorte aufgewertet werden, durch Restriktionen können wirtschaftliche Potenziale eingeschränkt werden. In beiden Fällen wird vom **erschließbaren Potenzial** gesprochen, das i.d.R. kleiner als das wirtschaftliche Potenzial ist.

Die erneuerbaren Energien haben ein theoretisches Potenzial, das den jährlichen Weltenergieverbrauch um ein Vielfaches übersteigt.

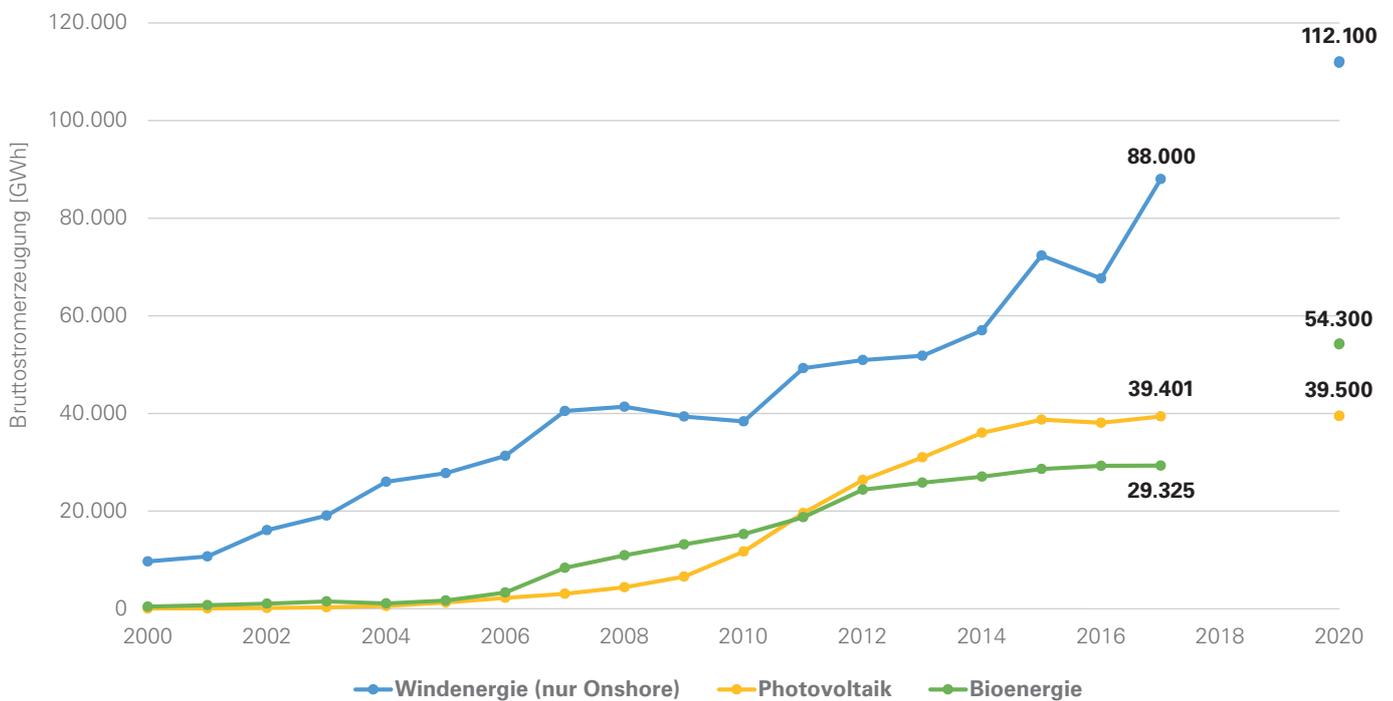
Um das Potenzial der erneuerbaren Energien in Deutschland zu beziffern, wurde 2010 der Potenzialatlas für Erneuerbare Energien von der Agentur für Erneuerbare Energien herausgegeben. Dieser legt die Potenziale der gesamten Bandbreite an regenerativen Quellen dar und beschreibt, wie diese realisiert werden können. Demnach könnten bis 2020 47% des Stromverbrauchs durch erneuerbare Energien gedeckt werden.

Quelle: AEE 2010; BWE 2015; Peyke et al. 2013



Theoretisches Potenzial der Erneuerbaren Energien

Quelle: nach BWE 2015



Theoretisches Potenzial der erneuerbaren Energien in Deutschland

Quelle: nach AEE 2010

P

Power-to-Gas

Gasförmige Energieträger können auf Basis der Power-to-Gas-Technologie gespeichert werden. Power-to-Gas stellt eine chemische Energiespeicherungstechnologie dar. Dabei wird mittels des überschüssigen regenerativen Stroms zunächst Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Der gewonnene Wasserstoff kann entweder direkt ins Erdgasnetz eingespeist werden oder durch Methanisierung, d.h. durch die Verbindung des Wasserstoffs mit Kohlenstoffdioxid, zu synthetischem Erdgas (Methananteil bei 96%) umgewandelt werden. Das Erdgas stellt dabei einen speicherbaren Energieträger dar, der entweder im Erdgasnetz transportiert oder in Gasspeichern gelagert werden kann. Steigt die Nachfrage nach Strom wieder an bzw. sinkt das Angebot an regenerativem Strom, so kann das gespeicherte Gas über Blockheizkraftwerke rückverstromt werden. Erdgasnetz und Stromnetz sind folglich bidirektional miteinander verknüpft, so dass die Energie räumlich sowie zeitlich flexibel für den Wärme-, Strom- und Kraftstoffmarkt bereitgestellt werden kann.

Ein Beispielprojekt stellt die BioPower2Gas-Anlage in Allendorf (Eder) dar. Hierbei können 300 kWel. zu 150 kWth. gespeichert werden. Der Wirkungsgrad kann durch die Nutzung von Abwärme optimiert werden. Darüber hinaus

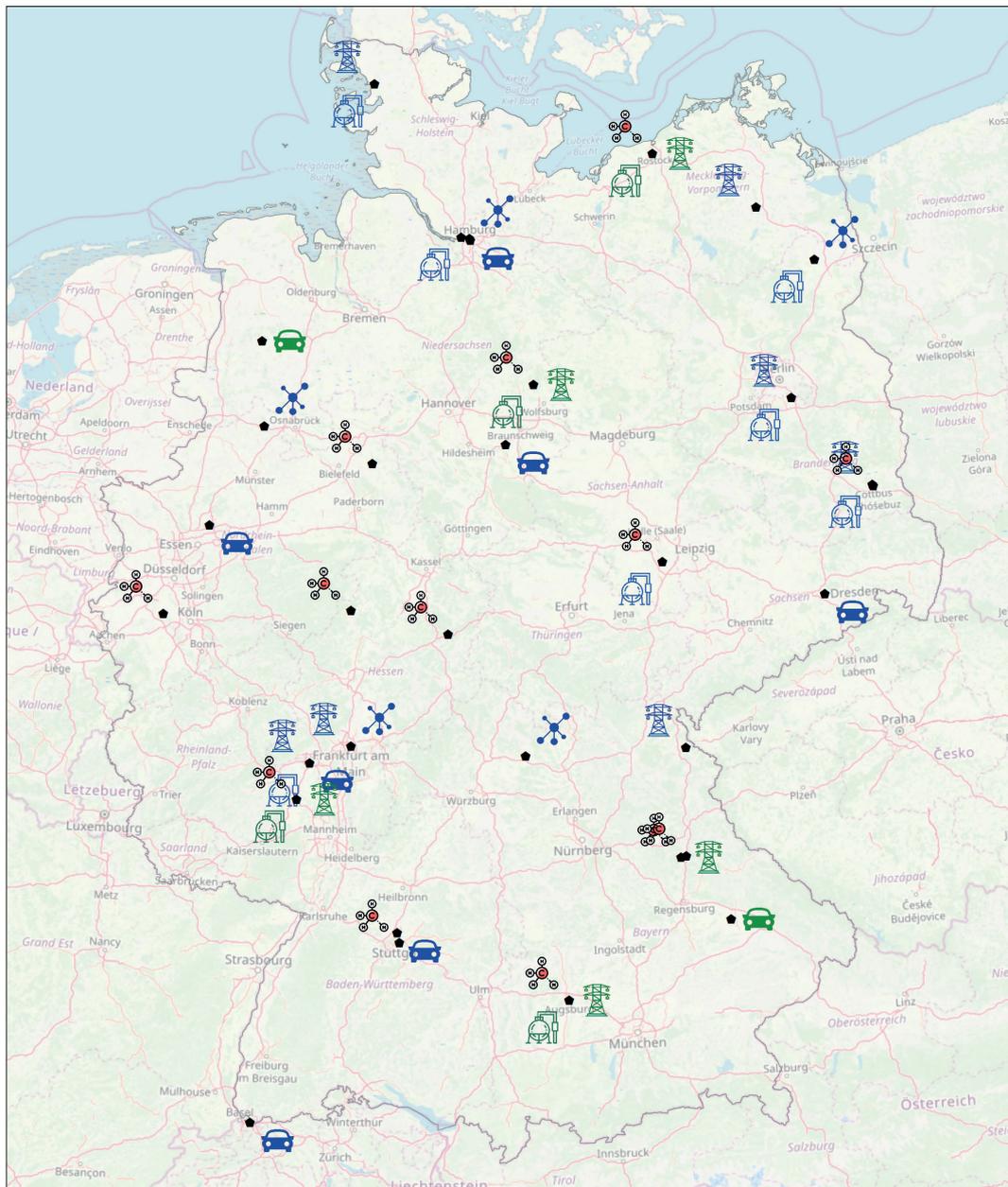
bestehen weitere Forschungs- und Pilotanlagen in Deutschland, in denen die Machbarkeit und wirtschaftliche Realisierbarkeit von Power-to-Gas Anlagen erforscht und getestet werden soll.

Im Rahmen einer Potenzialstudie der Deutschen Energieagentur konnten verschiedene Power-to-Gas-Cluster in Deutschland identifiziert werden (vgl. Abb. S. 61), die sich aufgrund von Wasserstoff- oder Methanprojekten, der Nähe zu Projekten der Wärmeerzeugung, der industriellen Nutzung von Wasserstoff sowie aufgrund von Raffinerien oder Standorten der Chemieindustrie konstituieren. Diese vier Cluster liegen in Nord- (Untere Elbe/Weser/Ems), West- (Rhein/Main/Ruhr), Ost- (Mitteldeutschland/Berlin/Brandenburg) und Südwestdeutschland (Neckar). Bayern, Saarland und Thüringen sind dabei die einzigen Bundesländer, die keinem Cluster zugeordnet wurden. Zur Realisierung solcher Cluster ist es wichtig, die regulatorischen Rahmenbedingungen anzupassen (u.a. Power-to-Gas als Energiespeicher anzuerkennen sowie den Entwicklungseinfluss am Strommarkt zu berücksichtigen), die Technologie weiterzuentwickeln (Wasserstoffanteile im Gasnetz erhöhen, Technologieeffizienz steigern, Produktionskosten senken), die Synergien zu nutzen, die Clusterregionen zu vernetzen sowie Power-to-Gas in die Netzentwicklungspläne zu integrieren.

Quelle: dena 2016, 2019; Sterner und Stadler 2017

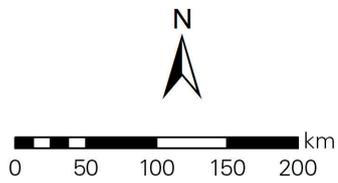


Quelle: pixabay.com



Power-to-Gas Projekte in Deutschland

- Methanisierung
- Methanspeicherung
- Methanverstromung
- Methan als Kraftstoff
- Wasserstoffspeicher
- Wasserstoffverstromung
- Wasserstoff ins Gasnetz
- Wasserstoff als Kraftstoff
- Power-to-Gas Standort



Datengrundlage: dena 2019
 Kartengrundlage: GADM
 Entwurf/Kartographie: Lucas Schwarz
 Stand: Februar 2019

Power-to-Gas Projekte in Deutschland

Quelle: nach dena 2019

P

Prosumenten

Ein neuer Akteur, der durch den Ausbau der erneuerbaren Energien und deren lukrative Preisentwicklung auf dem Energiemarkt erschienen ist, ist der sog. Prosument. Prosumenten sind Haushalte bzw. Privatpersonen, die nicht mehr nur als reine Energiekonsumenten auftreten, sondern durch eigene Energieanlagen Strom produzieren und ins Netz einspeisen. Prosumenten können z.B. durch eigene PV-Dachanlagen dazu beitragen, dass Netzengpässe ausgeglichen werden. Siedlungen, die einen hohen Anteil an gebäudeintegrierter Photovoltaik aufweisen, werden an sonnigen Tagen so zu Stromproduzenten, wobei es den Netzbetreibern obliegt, den überschüssigen Strom so zu verteilen, dass das Netz stabil bleibt.

Quelle: Aretz et al. 2016



Quelle: pixabay.com

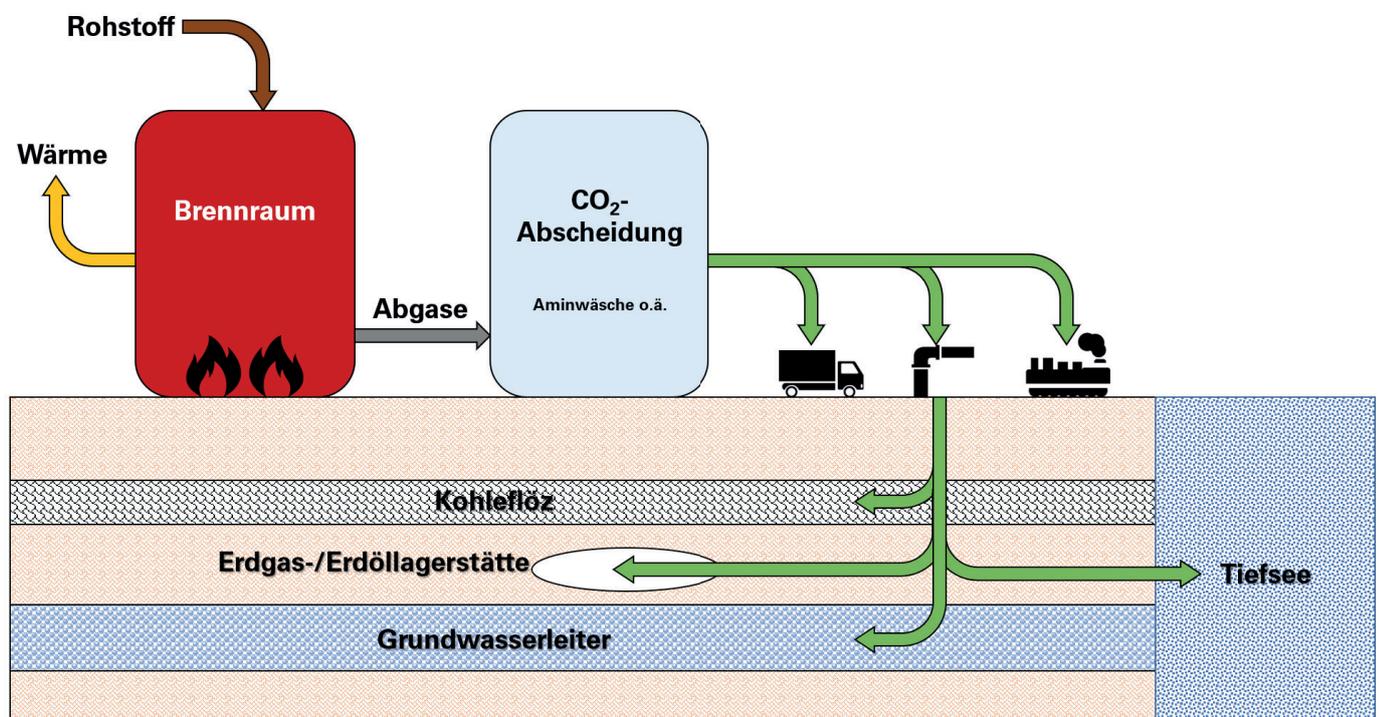
CO₂-Sequestrierung



Zur CO₂-armen Nutzung fossiler Ressourcen stellt die CO₂-Sequestrierung einen Teil des CCS-Prozesses (Carbon Dioxid Capture and Storage) dar. Darunter wird die Speicherung von CO₂ im Untergrund verstanden. Das CO₂, das bei der Verbrennung von Rohstoffen erzeugt wird, soll abgetrennt werden, um nicht in die Atmosphäre zu gelangen. Die Sequestrierung bezeichnet dabei die Abscheidung und Einspeicherung im Untergrund. Die Abtrennung kann mithilfe verschiedener Verfahren erfolgen.

In Deutschland besteht eine Vielzahl an potenziellen CO₂-Speicherstätten. Dazu zählen Erdgaslagerstätten, Grundwasserleiter (Aquifere) oder Kohleflöze. Weitere Speicherstätten stellen Erdöllagerstätten oder die Tiefsee dar. Die unterirdische Speicherung von Kohlenstoffdioxid steht partiell in Konkurrenz zur Geothermie, da prinzipiell die gleichen Lagerstätten beansprucht werden.

Quelle: Bundesverband Geothermie 2019



Sequestrierung von CO₂

Quelle: nach Bundesverband Geothermie 2019

Räumlich-zeitliche Kompression

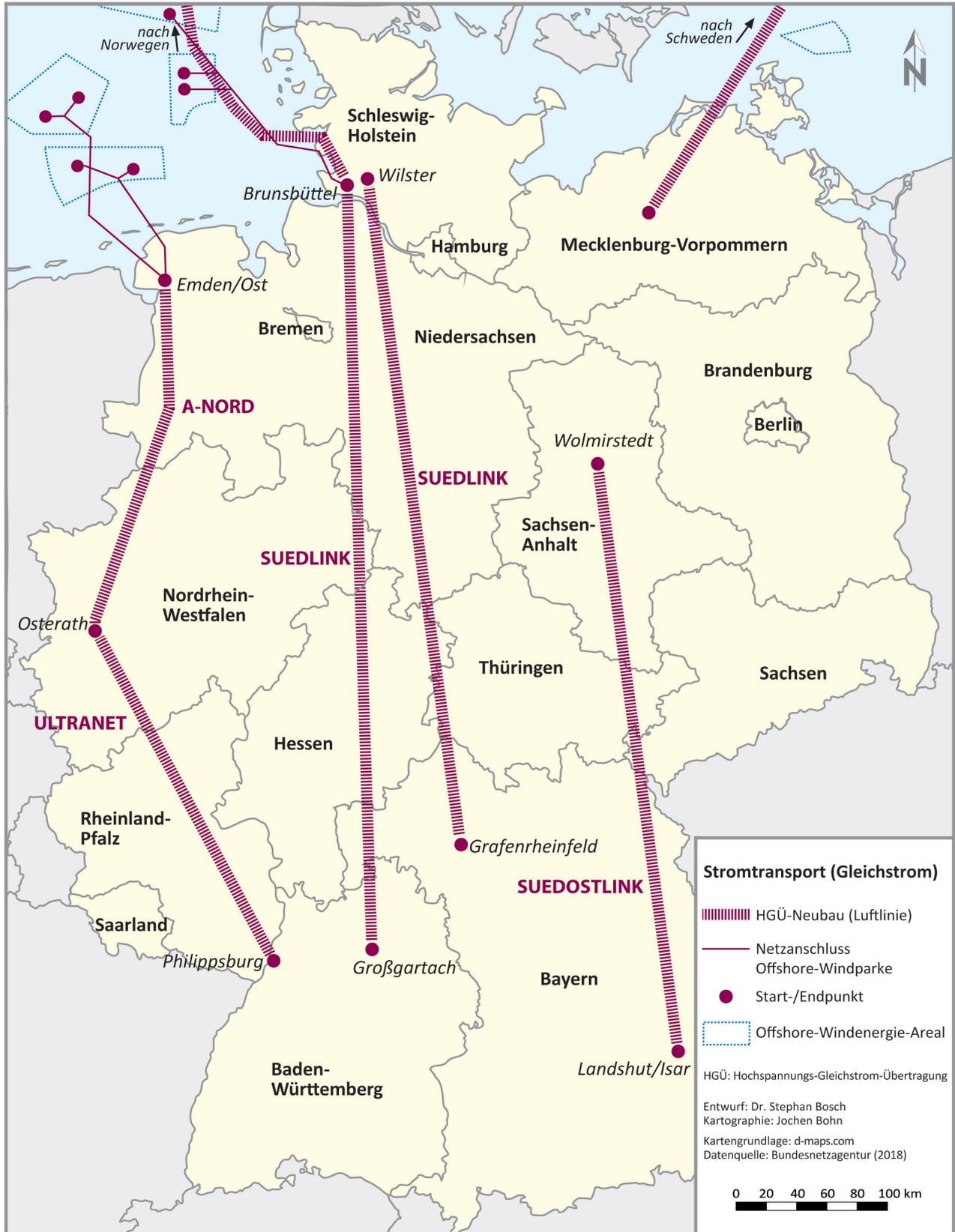
Altvater (2007:41ff.) sieht in der fossilen Rohstoffbasis die zwingend notwendige Voraussetzung zur Steigerung der Produktivität. Er behauptet, dass die enorme Produktivität des Kapitalismus allein auf Basis fossiler Energieträger basiert, da durch die globale Transportierbarkeit von Öl, Gas und Kohle unternehmerische Tätigkeiten nicht an lokal verfügbare Energieressourcen gebunden sind, sondern eine globale Reichweite besitzen. Zudem unterliegen fossile Energieträger keinen tageszeitlichen und saisonalen Schwankungen. Transportierbarkeit und Grundlastfähigkeit führen so zur räumlich-zeitlichen Kompression (Harvey 1996:242ff.), da Produkte in immer kürzeren Zeitintervallen hervorgebracht werden. In dieser Logik würde mit der Limitierung der fossilen Rohstoffbasis das Ende des kapitalistischen Systems einhergehen.

Dass der Energiefluss in einem solarbasierten Energiesystem schwer kontrollierbar ist (Georgescu-Roegen 1971:303f.), bleibt unbestritten. Es handelt sich bei den meisten Formen erneuerbarer Energien um intermittierende Quellen, deren Beiträge zum Energiemix den Rhythmen von Sonne, Wind, Niederschlag und Gezeiten unterliegen (Fares 2015). Die Anpassung der Energieproduktion an den Bedarf, eine Grundvoraussetzung für kontinuierliches Wirtschaftswachstum, wird damit zu einer großen Herausforderung. Daher stellt sich die Frage, ob der Übergang von einem fossilen auf ein regeneratives Energiesystem tatsächlich mit einem Verlust an räumlich-zeitlicher Flexibilität einhergeht und einer räumlich-zeitlichen (Wieder-)Ausdehnung (vgl. North 2010:585) weicht. Was Altvater, Harvey und North nicht in ihre Überlegungen miteinbeziehen, sind die zahlreichen technologischen Innovationen zur Stabilisierung regenerativer Energiesysteme. So stehen mit Biomasse und Erdwärme zwei grundlastfähige Energieträger zur Verfügung (Matek und Gawell 2015:101), die im Rahmen von regenerativen Kombikraftwerken die witterungsabhängigen Energiequellen Sonne und Wind stützen (Palensky und Dietrich 2011:381; Ramchurn et al. 2011:5). Bedeutend sind zudem die innovativen Technologien zur Energiespeicherung, von denen bislang je-

doch nur wenige die industrielle Reife erlangt haben. Dabei werden mechanische, chemische, elektrische und thermische Speicherarten unterschieden (Hadjipaschalis et al. 2009:1514ff.). Vielversprechend sind Druckluft- und Pumpspeicherkraftwerke, mit Wirkungsgraden von bis zu 80% (Anagnostopoulos und Papantonis 2008:1685). Geforscht wird aber auch an der Umwandlung von überschüssigem Regenerativstrom in Methan oder Wasserstoff (Jensen et al. 2007:3253), wodurch eine bidirektionale Verknüpfung von Strom- sowie Gasnetz und die Transportierbarkeit sowie Grundlastfähigkeit innerhalb großer Raumeinheiten möglich wird. Die räumlich-zeitliche Verfügbarkeit kann zudem durch den Ausbau und die Kapazitätserweiterung von Stromtrassen erhöht werden (Walter und Bosch 2013). Je größer der Raum ist, innerhalb dessen Regenerativstrom intelligent organisiert und über verlustarme Stromleitungen zugeteilt wird, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt tatsächlich Energie zur Verfügung steht (McCarthy 2015:2492). Dabei spielt der Ausbau von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen eine entscheidende Rolle, da hierdurch die Transportierbarkeit von Regenerativstrom über weite Strecken hinweg wirtschaftlich wird. So erhält der windschwache, industriestarke Süden Deutschlands einen direkten Zugang zu den großen Windenergie-Offshore-Potenzialen im Norden sowie zu den Speicherkraftwerken in Skandinavien. Die Möglichkeiten des interkontinentalen Stromtransports aus erneuerbaren Quellen wurden von Grossmann et al. (2013, 2014) grundlegend erörtert.

Energiespeicherung und Stromnetzausbau werden folglich die derzeit noch bestehenden räumlich-zeitlichen Einschränkungen regenerativer Energiesysteme aufheben. Beide Bereiche sind jedoch nicht isoliert voneinander, sondern werden über Smart Grids koordiniert. Solomon und Krishna (2011:7429) betonen, dass sich Smart Grids hervorragend zur Implementierung marktbasierter Ansätze eignen und so künftig von einem innovationsgetriebenen Massenmarkt für Energieeffizienz-Technologien auszugehen ist.

Quelle: Altvater 2007; Anagnostopoulos und Papantonis 2008; Fares 2015; Georgescu-Roegen 1971; Grossmann et al. 2013, 2014; Harvey 1996; Hadjipaschalis et al. 2009; Jensen et al. 2007; Krishna 2011; Matek und Gawell 2015; North 2010; Palensky und Dietrich 2011; Ramchurn et al. 2011; Walter und Bosch 2013



Quelle: Altvater 2007; Anagnostopoulos und Papantonis 2008; Fares 2015; Georgescu-Roegen 1971; Grossmann et al. 2013, 2014; Harvey 1996; Hadjipaschalis et al. 2009; Jensen et al. 2007; Krishna 2011; Matek und Gawell 2015; North 2010; Palensky und Dietrich 2011; Ramchurn et al. 2011; Walter und Bosch 2013

Regionalplanung

Der Ausbau erneuerbarer Energien stellt eine komplexe Aufgabe für die räumliche Planung auf allen Ebenen dar. Die Bundesraumordnung stellt Ziele und Grundsätze auf, die von allen nachfolgenden Ebenen befolgt werden müssen. Die Landesplanung beschließt das Landesentwicklungsprogramm (LEP), das konkrete Ausbauziele für die Bundesländer enthält. Die Regionalplanung ist die erste Ebene der Raumplanung, die einen konkreten räumlichen Bezug enthält (die einzige Ausnahme ist die AWZ, diese wird im LEP von Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und Niedersachsen bearbeitet).

Die Regionalplanung befasst sich im Kontext der Energiewende v.a. mit der Ausweisung von Gebietskategorien für Energieerzeugungsanlagen, die eine überörtliche Raumbedeutsamkeit aufweisen: Raumbedeutsamkeit besagt, dass eine Planung die räumliche Entwicklung, aber auch die Funktion eines Gebietes beeinflusst und eine Standortentscheidung daher nicht nur lokal, sondern überörtlich betrachtet werden muss. Bei der Regionalplanung wird zwischen Gesamtplanung und Fachplanung unterschieden: Die Gesamtplanung befasst sich mit der ganzheitlichen Gestaltung und Entwicklung einer Region (integrative Planung), während sich die Fachplanung mit komplexen Planungsfragen einzelner Fachgebiete auseinandersetzt (z.B. Wasserschutz). So stellt beispielsweise der Naturschutz eine Fachplanung dar, die sich stark am Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) orientiert. Weitere Fachplanungen, die bei der Implikation von erneuerbaren Energieanlagen bedeutend sind, sind die Verkehrswegeplanung oder die Lärmminde-rungsplanung. Im Zuge der konkreten Planung und Ausweisung von Flächen ist die Abwägung ein entscheidender Prozess, der die ganzheitliche Raumbetrachtung zum Ziel hat. Dabei werden Fachbelange gegeneinander abgewogen, um eine möglichst raumverträgliche Ausweisung von Gebietskategorien zu ermöglichen.

Die erneuerbaren Energien sind von den Vorgaben der Regionalplanung abhängig, da diese Vorrang-, Eignungs-, Vorbehalts- und Ausschlussgebiete für diese Technologie ausweisen kann. Dabei ist v.a. die Windenergie die Techno-

logie, die in Teilfortschreibungen von Regionalplänen räumlich gesteuert wird. Die Vorgaben aus der Regionalplanung haben unterschiedlich starke Wirkungen, die für den Ausbau von erneuerbaren Energien eine wichtige Grundlage darstellen:

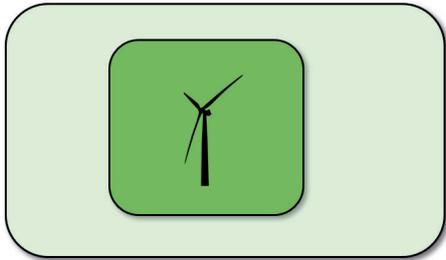
Vorranggebiete haben eine positive Wirkung auf die ausgewiesene Raumnutzungsart. Nutzungsarten, die dem vorrangigen Nutzen entgegenstehen, werden aus einem Vorranggebiet ausgeschlossen, Nutzungsarten die diesem nicht entgegenstehen, können der vorrangigen Nutzungsart zur Seite gestellt werden. In einem Vorranggebiet für Windkraftanlagen kann bspw. nach wie vor Landwirtschaft betrieben werden; FHH-Gebiete stellen jedoch eine Konkurrenz-nutzung dar. Davon abgesehen besteht die Möglichkeit, bei Wind-Vorranggebieten den Zusatz *mit Ausschlusswirkung* hinzuzufügen. Dies bedeutet, dass die Windenergie in einem Vorranggebiet mit Ausschlusswirkung gebaut werden muss und außerhalb des Gebiets nicht zulässig ist. Diese Wirkung ist vergleichbar mit der eines Eignungsgebietes.

Eignungsgebiete beziehen sich nur auf privilegierte Bauvorhaben im Außenbereich. Windkraftanlagen zählen zu diesen Bauvorhaben (§35 BauGB). Durch die Ausweisung eines Eignungsgebietes wird der Raumnutzer außerhalb des Gebietes jedoch ausgeschlossen.

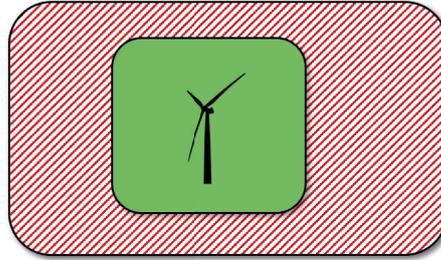
In einem **Vorbehaltsgebiet** ist die Rauminanspruchnahme einem gewissen Raumnutzer vorbehalten. Diesem kommt in der Abwägung ein besonderes Gewicht zu. Konkurrierende Nutzungen werden nicht ausgeschlossen und können bei der Abwägung sogar den vorbehaltenen Nutzer verdrängen.

Quelle: Schneider und Boenigk 2012

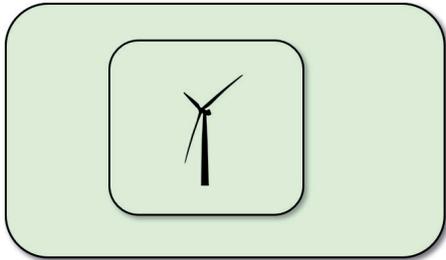
Vorranggebiet



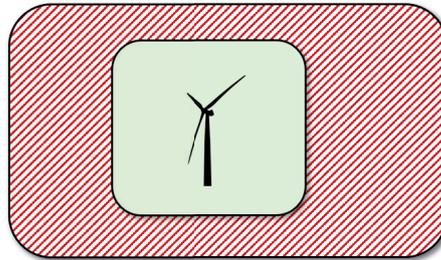
Vorranggebiet mit Ausschlusswirkung



Vorbehaltsgebiet



Eignungsgebiet



-  WEA müssen hier gebaut werden
-  WEA dürfen hier gebaut werden
-  hier dürfen keine WEA gebaut werden

Gebietskategorien der Regionalplanung

Quelle: nach Schneider und Boenigk 2012

Repowering

Repowering bezeichnet das Austauschen von alten, weniger modernen und leistungsschwachen Kraftwerkseinheiten durch neue, moderne, effizientere und leistungsstärkere Kraftwerkseinheiten. Vor allem in der Windenergie wird das Repowering praktiziert, da v.a. in Norddeutschland viele alte Anlagen in Betrieb sind, die aus der Pionierzeit der Windkraft stammen. Eine technisch modernere Anlage kann an solchen Standorten wesentlich höhere Erträge bringen. Durch die Substitution von vielen leistungsarmen Anlagen durch wenige leistungsstarke Anlagen kann die Gesamtleistung eines Windparks erhöht werden, gleichzeitig aber auch das Erscheinungsbild des Windparks in der Landschaft, durch die langsamere Rotorbewegung bei großen Anlagen, beruhigt werden (wenngleich die Anlagen

i.d.R. größer sind und damit weithin sichtbar). Im EEG 2012 wurde das Repowering explizit mit einem Anfangsbonus in der Vergütung gefördert; bereits 2014 wurde diese Regelung aber wieder gestrichen. Das Repowering spielt im Rahmen eines schonenden Ausbaus der Windenergie eine bedeutsame Rolle. Es bedarf keiner neuen Standortfindung, somit können bestehende Standorte energetisch und wirtschaftlich stark aufgewertet werden. Der BWE prognostiziert ein Repoweringpotenzial mit dem Faktor 5 gegenüber dem Jahr 1990. Dieses Potenzial wird jedoch durch regulatorische Rahmenbedingungen, wie Abstände und Mindesthöhen stark eingeschränkt.

Quelle: BWE 2015



vor Repowering



nach Repowering

Repowering von Windkraftanlagen

Quelle: Eigene Darstellung

Sektorenkopplung

Die Sektorenkopplung stellt eine Möglichkeit dar, die Energieversorgung Deutschlands mittelfristig Zeit zu dekarbonisieren. Momentan ist der Energiebereich für 83,4% aller Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich. Ziel der Sektorenkopplung ist es, die drei Energiesektoren Strom, Wärme und Verkehr intelligent miteinander zu verknüpfen, um Energie im räumlichen und zeitlichen Kontext optimal einzusetzen. Somit soll die Volatilität der erneuerbaren Energien besser ausgeglichen werden. Die Kopplung mit Gas bietet dabei große Vorteile, da die technische Infrastruktur hierzu bereits deutschlandweit vorhanden ist. Gas kann aber nicht nur transportiert, sondern auch unbegrenzt gespeichert und jederzeit über BHKWs wieder rückverstromt werden. Teil der Sektorenkopplung ist somit die Power-to-Gas-, aber auch die Power-to-X-Technologie, durch die Strom in andere Sektoren gelangen soll. Diese energetische Sektorenkopplung soll in Zukunft auch durch eine strukturelle Sektorenkopplung ergänzt werden. Hierbei sollen die Energiesektoren mit den Verbrauchssektoren (Haushalt, Gewerbe, Industrie und Verkehr) verbunden werden, um Bedarfe besser koordinieren zu können.

Ein Beispiel für eine praktische Umsetzung der Sektorenkopplung lässt sich anhand der Stadtwerke Flensburg darlegen: Hierbei wurde in einem Heizkraftwerk ein Elektroheizkessel installiert, der überschüssigen Strom aus der Windkraft in speicherbare Wärme umwandelt. Würde dieser Strom nicht abgenommen, müssten die Windkraftanlagen abgeschaltet werden. Somit kann die Nutzung von fossilen Rohstoffen aus Heizölkesseln vermieden, CO₂ eingespart und die Energie der Erneuerbaren optimal genutzt werden.

Quelle: BDEW und DVGW 2018; Forum Synergiewende 2018; Quaschning 2016

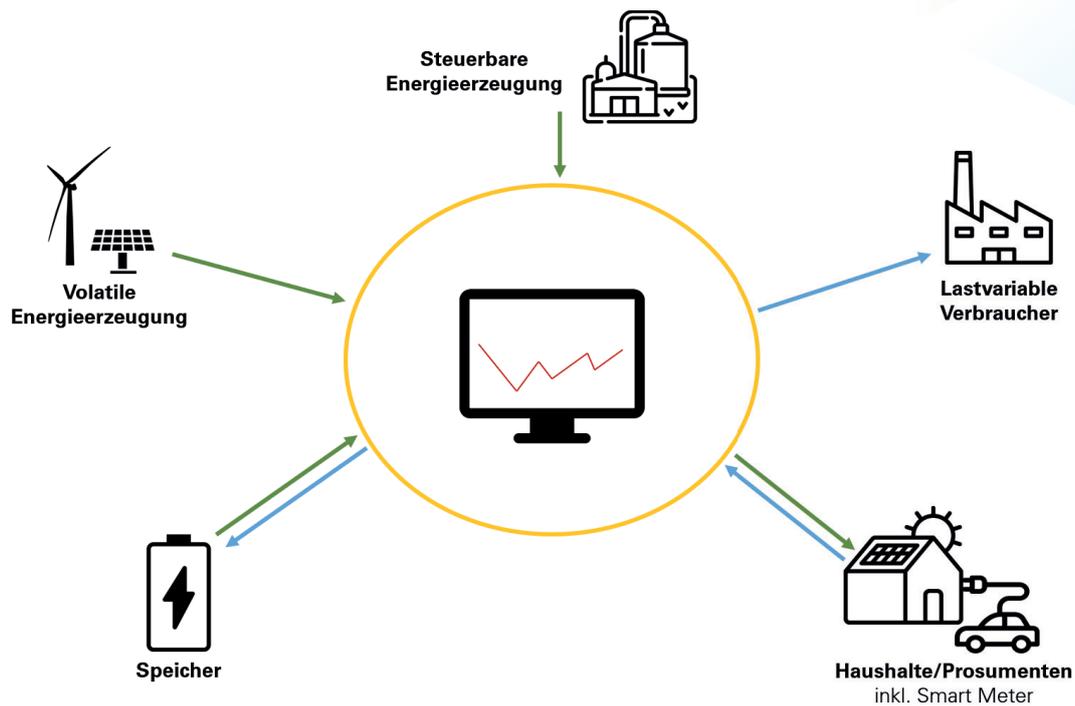
SMARD

Die Plattform SMARD (Abk. StromMARKt-Daten) stellt einen Teil des Ziels der Bundesnetzagentur dar, für mehr Transparenz auf dem Strommarkt zu sorgen. Dabei können in Echtzeit Erzeugungs- und Verbrauchsdaten sowie Import und Exportstatistiken eingesehen werden. Zusätzlich ist es möglich, die aktuelle erneuerbare wie auch konventionelle Erzeugungsleistung abzurufen und den Großhandelsstrompreis einzusehen. Damit Analysen getätigt werden können, besteht überdies die Möglichkeit, Daten für einen definierten Zeitraum im Excel-Format herunterzuladen und kostenfrei zu nutzen.

Quelle: Bundesnetzagentur 2019

Smart Grid / Smart Meter

Ein **Smart Grid** stellt eine netzwerkorientierte Reaktion auf die vermehrte Nutzung von volatilen Energieträgern dar. Dabei werden volatile Energieerzeuger, wie Windkraft- und PV-Freiflächenanlagen, steuerbare Erzeuger, wie Biogasanlagen, lastvariable Verbraucher, Speichertechnologien sowie Haushalte über eine Kommunikations- und Steuerzentrale miteinander in Verbindung gesetzt. Ziel der Smart Grid-Vernetzung ist es, die Stromproduktion und den Stromverbrauch besser zu koordinieren. Dabei sollen energieintensive Anwendungen, die zeitlich variabel sind, dahingehend gesteuert werden, dass deren Einsatz auf energetisch günstige Tageszeiten fällt. Elektroautos werden bspw. in Zeiten des Stromüberschusses über das Smart Grid geladen, können aber genauso in Zeiten des Stromdefizites wieder Strom ins Netz einspeisen. Des Weiteren können Wärmepumpen v.a. in lastschwachen Zeiten arbeiten, wenn der Strom üppig vorhanden und günstig ist. Dies tritt bspw. nachts auf, wenn viel Windstrom produziert, aber nicht abgenommen wird. Der häusliche Strombezug wird dabei durch ein **Smart Meter** koordiniert und optimiert. Dabei werden nicht



Aufbau eines Smart Grid

Quelle: nach AEE 2019b

nur Informationen zum Stromverbrauch, sondern auch zu den Preisen geliefert. Diese sind für den Kunden jederzeit einsehbar, so dass stets auf Preisschwankungen reagiert werden kann, indem bspw. der Einsatz von hausinternen Elektrogeräten auf diese Informationen abstimmt wird. Der energieintensive Betrieb von Wasch- oder Spülmaschinen kann so zu energetisch günstigen Tageszeiten stattfinden. Die Nutzung von teurem Spitzenlaststrom kann durch diese Art der Kommunikation verhindert werden.

Dennoch besteht auch Kritik: Insbesondere in der Nutzung von Smart Meter wird ein Risiko für Hackerangriffe gesehen, die die Stabilität und Sicherheit des Systems gefährden können. Diese Gefahr soll durch technische Weiterentwicklungen eingedämmt werden.

Quelle: AEE 2019b

Solarthermie

Die Solarthermie stellt, neben der Photovoltaik, eine Nutzungsform der solaren Strahlungsenergie dar. Diese nutzt dabei nur die direkte Sonnenstrahlung. Es kann zwischen strahlungskonzentrierenden und nicht-strahlungskonzentrierenden Systemen unterschieden werden.

Nicht-strahlungskonzentrierende Systeme arbeiten im Niedertemperaturbereich. Dies umfasst v.a. dezentrale Systeme, wie Schwimmbadbeheizungen, Trinkwasser-erwärmungsanlagen, Heizungsunterstützungen, Nahwärmeversorgungsanlagen oder Kühlungsanlagen. Aufgrund der niedrigen Arbeitstemperaturen eignen sich nicht-strahlungskonzentrierte Systeme hauptsächlich für kleine Anwendungen, wie private Haushalte.

Strahlungskonzentrierende Systeme können weiter in linienkonzentrierende und punktkonzentrierende Systeme unterschieden werden. Diese werden v.a. in großtechnischen Anlagen

genutzt. Gängige Linienkonzentrationssysteme sind Parabolrinnenkraftwerke und Fresnel-Kollektoren, Beispiele für punktkonzentrierende Systeme sind Dish-Stirling-Anlagen oder Solarturmkraftwerke. Charakteristisch für strahlungskonzentrierende Systeme sind die hohen Arbeitstemperaturen (z.T. weit über 1.000°C), die einen Einsatz für die Stromerzeugung erlauben. Als Wärmeträgermedium wird zumeist Wasser, Luft, flüssiges Salz oder ein Thermoöl genutzt.

Solarthermische Anlagen werden zumeist in Form von Luft- oder Wasserkollektoren betrieben und eignen sich demnach zur Wärmeer-

zeugung. Ein Beispiel für eine solarthermische Anwendung findet sich am Forschungszentrum des DLR in Jülich. Hier wurde ein Solarturm gebaut, bei dem viele Spiegel (Heliostaten) so ausgerichtet werden, dass diese das Sonnenlicht direkt auf einen Receiver lenken, der an einem Turm angebracht ist. Dieser erwärmt sich und leitet die Wärme an Generatoren weiter, in denen die Wärme dann in Strom umgewandelt wird. Das Projekt wird momentan jedoch hauptsächlich zu Forschungszwecken verwendet.

Quelle: DLR 2019; Quaschnig 2013

Stromeinspeisegesetz (StromEinspG)

Das Stromeinspeisegesetz stellt den Vorläufer des Erneuerbare-Energien-Gesetzes dar. Es wurde am 07.12.1990 beschlossen und trat zum 01.01.1991 in Kraft. Inhalt der Regelung war die vergütete Abnahme von Strom, der ausschließlich aus erneuerbaren Energien (Wasserkraft, Windkraft, Sonnenenergie, Deponiegas, Klärgas, biologische Rest- und Abfallstoffe aus der Land- und Forstwirtschaft) gewonnen wurde. Somit wurden die Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) verpflichtet, Strom aus EE abzunehmen und ins Netz einzuspeisen. Das Stromeinspeisegesetz konnte den Ausbau der erneuerbaren Energien befördern, v.a. Windkraftanlagen wurden ab dessen Einführung vermehrt ausgebaut. Trotz juristischen Widerstandes seitens der EVUs wurde das StromEinspG bestätigt und im Jahr 2000 durch das EEG ersetzt.

Quelle: BMWi 2019d

Stromerzeugung und -verbrauch

Bei der Stromerzeugung und beim Stromverbrauch besteht eine Vielzahl an unterschiedlichen Angaben bezüglich der elektrischen Arbeit und der gesamten Kraftwerksleistung in Deutschland. Im Folgenden soll daher ein Überblick über die wesentlichen Begriffe gegeben werden:

	Bruttostromerzeugung
-	Eigenverbrauch der Erzeuger
=	Netto-Stromerzeugung
+	Stromimporte
=	Stromaufkommen
-	Stromexporte
=	Verfügbares Aufkommen
-	Pumpstromverbrauch
=	Bruttostromverbrauch
-	Stromnetzverluste
=	Nettostromverbrauch

Quelle: ChemgaPedia 2018

Strompreis

Der Strompreis lässt sich in den Stromgroßhandelspreis und den Endverbraucherstrompreis unterteilen. Der Stromgroßhandelspreis ergibt sich aus Angebot und Nachfrage an der Europäischen Strombörse EEX. Determinierende Faktoren sind v.a. der Rohstoffpreis und der Emissionshandel.

Der Preis für Endverbraucher liegt über dem Stromgroßhandelspreis und beinhaltet neben den Kosten für die Stromerzeugung zahlreiche weitere Posten. Im Wesentlichen zählen hierzu die Netzentgelte (zur Finanzierung des Stromnetzausbaus), Umlagen (EEG-Umlage, Offshore-Haftungsumlage, Umlage für abschaltbare Lasten), Steuern (Umsatz- und Stromsteuer), Abgaben (z.B. Konzessionsabgabe) sowie die Gewinne für die Stromversorger. Im Jahr 2018 lag der Strompreis für Privatkunden mit einem Verbrauch zwischen 2.500 und 5.000 kWh bei durchschnittlich 29,88 ct/kWh (BMWi 2019a). Der Preis für Endverbraucher ist abhängig vom Anteil erneuerbarer Energien am Strom und an der Bezugsmenge. Durch den Merit-Order-Effekt steigt der Strompreis durch den höheren Anteil von Erneuerbaren am Strommix punktuell an, da die EEG-Umlage die Differenz zwischen Börsenstrompreis und garantierter Vergütung darstellt. Da aufgrund der EEG-Novelle 2017 jedoch immer mehr EE-Anlagen aus der gesetzlich festgelegten Vergütung ausscheiden, wird sich der Merit-Order-Effekt sukzessive verringern.

Quelle: AEE 2018c; BMWi 2019a

SuedLink

Um die großräumige Volatilität der erneuerbaren Energien ausgleichen und Engpässe oder Überlastungen im Stromnetz verhindern zu können, wird momentan die SuedLink-Trasse von TransNetBW und TenneT geplant. Durch HGÜ-Trassen soll es möglich werden, den im Norden Deutschlands produzierten Offshore-Windstrom in den industriestarken Süden zu transportieren. Nicht zuletzt gerät der Süden im Zuge der Abschaltung aller Atomkraftwerke bis 2022 wieder in größere externe Energieabhängigkeit.

Durch den Ausbau der SuedLink-Trasse sollen die Stromkosten stabilisiert werden. Darüber hinaus sollen durch eine verbesserte Abnahme der erneuerbaren Energien Abschaltzeiten, die das Ergebnis von Netzüberlastungen sind, verhindert werden. Durch die Nutzung von HGÜ-Trassen soll dieser Ausgleich möglichst verlustarm vollzogen werden.

Durch das *Gesetz zur Änderung von Bestimmungen des Rechts des Energieleitungsbaus* wurde Erdkabeln ein Vorrang beim Ausbau von neuen Stromtrassen eingeräumt. Dies betrifft auch die SuedLink-Planungen. Aufgrund des Ausmaßes des Projektes fand eine aktive Beteiligung von BürgerInnen, mithilfe eines GIS-Onlinetools, statt. Hier konnten Bürger Hinweise sowie Kommentare zu den möglichen Trassenverläufen geben.

Quelle: TenneT TSO GmbH 2019

T

Thermodynamik

Es bestehen vier Hauptsätze der Thermodynamik. Hauptsatz eins bis drei wurden in dieser Reihenfolge festgeschrieben, der nullte Hauptsatz wurde chronologisch später festgestellt, ist aber von so elementarer Bedeutung, dass er an den Anfang gestellt wurde:

0. Hauptsatz

= Gesetz des thermischen Gleichgewichts

Steht ein System A im thermischen Gleichgewicht mit einem System B und steht gleichzeitig das System B im thermischen Gleichgewicht mit einem weiteren System C, so stehen auch System A und System C im thermischen Gleichgewicht.

1. Hauptsatz

= Energieerhaltungssatz der Thermodynamik

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden. Energie ist lediglich von einer Form in eine andere umwandelbar.

2. Hauptsatz

= Entropiesatz der Thermodynamik

Wärme fließt immer vom wärmeren System in Richtung eines kälteren Systems. Somit wird die energetische Fließrichtung vorgegeben. Physikalischen Prozessen wird dadurch eine klare Richtung gegeben, zudem kann die Existenz eines Perpetuum Mobiles ausgeschlossen werden. Im zeitlichen Verlauf nimmt dadurch die Unordnung (Entropie) im Universum zu.

3. Hauptsatz

= Nernstsches Wärmetheorem

Es ist unmöglich, ein System durch irgendeinen Vorgang auf den absoluten Nullpunkt abzukühlen. Am absoluten Nullpunkt ist die Entropie eines Systems gleich Null.

Quelle: Grotz 2019; Kristen 2019



Umspannwerke

Umspannwerke stellen die Verbindung zwischen den unterschiedlichen Netzebenen im Stromnetz dar und regeln die Stromübergabe von einer Spannungsebene in die nächste. I.d.R. werden Umspannwerke als abgeschlossene Gebäude errichtet. Dies ist jedoch bei großen Umspannwerken nicht möglich. Daher werden diese als Freiluftanlagen gebaut, wodurch ein stärkerer Einfluss auf die umgebende Landschaftsästhe-

tik besteht. Besonders an Knotenpunkten zwischen HGÜ-Trassen und Hochspannungs- bzw. Höchstspannungs-trassen, aber auch an der Grenze zu Nachbarländern, nehmen Umspannwerke eine essenzielle Rolle für den Stromtausch im europäischen Binnenmarkt ein.

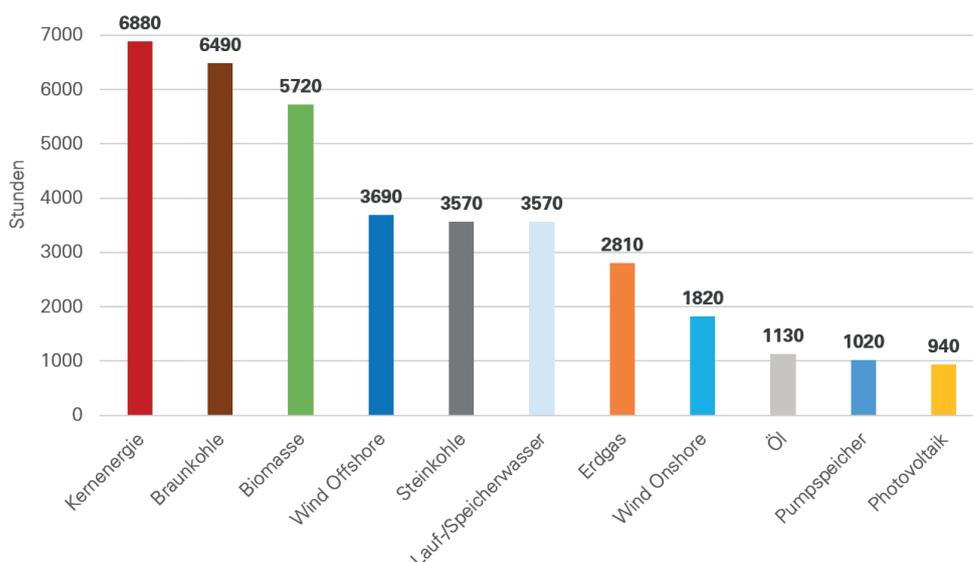
Quelle: Peyke et al. 2013

Volllaststunden

Wenn der Jahresertrag eines Kraftwerkes durch seine Nennleistung dividiert wird, erhält man die Anzahl der Stunden die ebenjenes Kraftwerk theoretisch bei voller Leistung hätte betrieben werden müssen, um diesen Jahresenergieertrag bilanziell zu erreichen. Diese sog. Volllaststunden erlauben so einen auf Leistung normierten Vergleich zwischen verschiedenen Standorten, Anlagen oder Jahren (IEE 2019). Das Jahr hat 8.760 Stunden und anhand der Volllaststunden können Kraftwerke in die Kategorien Grund-, Mittel- und Spitzenlastkraftwerke unterteilt werden. Grundlastkraftwerke, wie Kern- oder

Braunkohlekraftwerke, haben die meisten Volllaststunden, stellen gleichzeitig aber auch die am wenigsten flexiblen Kraftwerkstypen dar. Mittellastkraftwerke können je nach Tagesgang der Last gedrosselt und angefahren werden, jedoch mit einer gewissen zeitlichen Schwerfälligkeit (z.B. Steinkohlekraftwerke). Die Anzahl an Volllaststunden bewegt sich daher im mittleren Bereich. Spitzenlastkraftwerke weisen nur eine geringe Anzahl an Volllaststunden auf, sind jedoch flexibel einsetzbar (z.B. Pumpspeicherkraftwerke).

Quelle: BDEW 2018; IEE 2019; Peyke et al. 2013



Jahresvolllaststunden 2017 nach Energieträger

Quelle: nach BDEW 2018

W

Wasserkraft

Die Wasserkraft stellt die erneuerbare Energiequelle mit der längsten Nutzungshistorie dar und wird oftmals eher dem konventionellen Energiesystem zugeordnet. Bereits vor der Industrialisierung wurden Wasserräder genutzt, um Mühlen oder andere Maschinen anzutreiben. Heutzutage wird die Wasserkraft zur Energiegewinnung entlang von Fließgewässern genutzt und gilt als die erneuerbare Energiequelle mit den geringsten Umweltbelastungen. Darüber hinaus ist sie weitestgehend grundlastfähig und hat den höchsten Wirkungsgrad unter den erneuerbaren Energien (>80%).

Bei der Nutzung der Wasserkraft können drei Formen unterschieden werden: **Kleinwasserkraftwerke** haben eine Leistung von unter einem Megawatt. Diese nutzen dabei die kinetische Energie von Fließgewässern zur Stromproduktion.

Speicherkraftwerke zeichnen sich durch ein höheres Gefälle aus und nutzen meistens die potenzielle Energie von Talsperren und Bergseen. Durch ihre Flexibilität können Speicherkraftwerke, wie das Walchenseekraftwerk in Kochel am See (Bayern), die Grund- aber auch die Spitzenlast im Strombedarf decken.

Laufwasserkraftwerke haben einen Anteil von rund 80% an den Wasserkraftwerken in Deutschland und im Grunde das gleiche Funktionsprinzip wie Kleinwasserkraftwerke. Durch Turbinen innerhalb eines Turbinenhauses wird die Energie von Fließgewässern in elektrische Energie umgewandelt. Dabei ist die Fallhöhe deutlich geringer als bei Speicherkraftwerken. Entscheidend für die Stromproduktion sind die Menge des durchlaufenden Wassers und die Fallhöhe zwischen Ober- und Unterlauf. Da es bei Hochwasser in Kanälen oftmals zu Rückstau von Wasser kommt und sich hierdurch die Fallhöhe zwischen Ober- und Unterlauf verringert, fällt die Stromproduktion trotz eines hohen Durchflusses geringer aus als bei einer durchschnittlichen Ganglinie.

Das Ausbaupotenzial der Wasserkraft in Deutschland ist nahezu ausgeschöpft. Lediglich durch technische Modernisierung und Ausbau bestehender Anlagen kann der Anteil an der Stromversorgung noch erhöht werden.

Der Lech stellt ein Beispiel für einen durch die Wasserkraft intensiv genutzten Fluss dar. So bestehen 28 Wasserkraftwerke und 24 Stauseen entlang des Lechs, bevor dieser bei Donauwörth in die Donau mündet. Durch die Begradigung des Flusses konnte seine Fließgeschwindigkeit gesteigert werden. Doch auch der Sedimentabtransport erhöhte sich dadurch. Mittels Querbauten, wie Wasserkraftwerke, konnte dieser Problematik vorgebeugt werden. Stellenweise wurden die Wasserkraftwerksbauten nicht in den eigentlichen Flusslauf, sondern in ausgeleiteten Nebenarmen errichtet, um den Fluss ökologisch nicht weiter zu belasten.

Quelle: AEE 2010; BMWi 2019c; Rutschmann 2012

Windenergie – Onshore

Wind stellt eine Ausgleichsströmung zwischen Orten mit unterschiedlichem Luftdruck dar. Die Bewegung dieser Windmassen kann von Windkraftanlagen genutzt werden und in mechanische bzw. elektrische Energie umgewandelt werden.

Die Windenergie hat eine lange Geschichte. Angefangen bei der landwirtschaftlichen Nutzung von hölzernen Holland-Windmühlen wurde die erste moderne Windkraftanlage 1983 als Forschungsprojekt in Betrieb genommen. *Growian* (Abk.: Große Windenergieanlage) wurde am 17.10.1983 in Koog an der Nordseeküste in Betrieb genommen. Das Projekt wurde dabei von der MAN, REW, HEW und Schleswig getragen und beinhaltete eine zweiblättrige Windkraftanlage, die eine Leistung von 2-3 MW haben sollte. Dieses Projekt scheiterte jedoch, eröffnete aber gleichzeitig die Entwicklung von Windkraftanlagen, wie sie heute existieren.

Heutzutage existieren verschiedene Möglichkeiten der Windenergienutzung. Dazu gehören Vertikal- und Horizontalachsenkonverter. Vertikalachsenkonverter kommen zumeist in kleinen Installationen vor. Ein Beispiel ist der Darrieusrotor, der sich trotz langer Geschichte nie gegen Anlagen mit Horizontalachsenkonverter durch-

setzen konnte. Diese stellen die klassischen Anlagen dar und sind wie folgt aufgebaut:

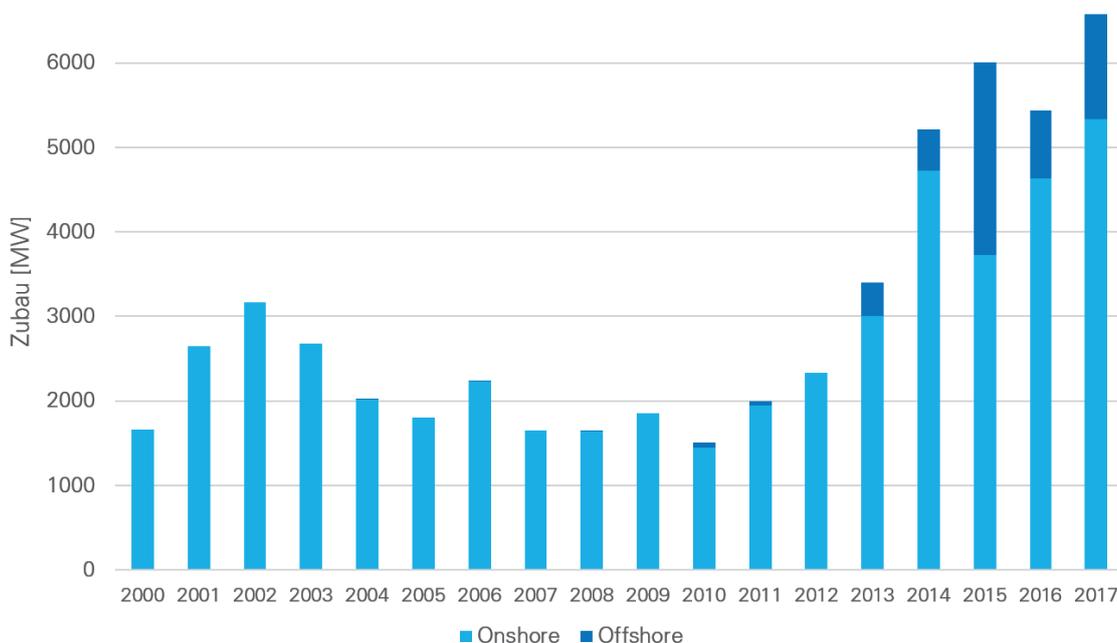
Im Boden sorgt ein verstärktes Betonfundament für die Standsicherheit der Anlage. Der Turm wird ebenfalls zumeist aus Betonteilen gefertigt und ist im Inneren mit einer Aufstiegstreppe und Kabeln ausgestattet. Das Herzstück einer Windkraftanlage bildet die Gondel, die auf den Turm aufgesetzt wird: In ihr befindet sich der Generator, der durch die Drehbewegung der Nabe, an der die Rotorblätter befestigt sind, angetrieben wird. Zur technischen Effizienzsteigerung verfügen moderne Windkraftanlagen über Rotorblattverstellmechanismen und Windrichtungsnachführungen.

Heute existieren Windkraftanlagen mit einer Rotorhöhe von über 260 Metern und Leistungen von bis zu acht Megawatt. Der technologische Fortschritt sorgt dabei immer weiter für Effizienz- und Leistungssteigerungen, Veränderungen der Komponenten und Verbesserung der logistischen Transportierbarkeit von Windenergieanlagen.

Aufgrund der technisch bedingten Höhe der Anlagen beeinflussen sie die umgebende Landschaft in ästhetischer und ökologischer Hinsicht beträchtlich. Daher wurden über die letzten Jahre

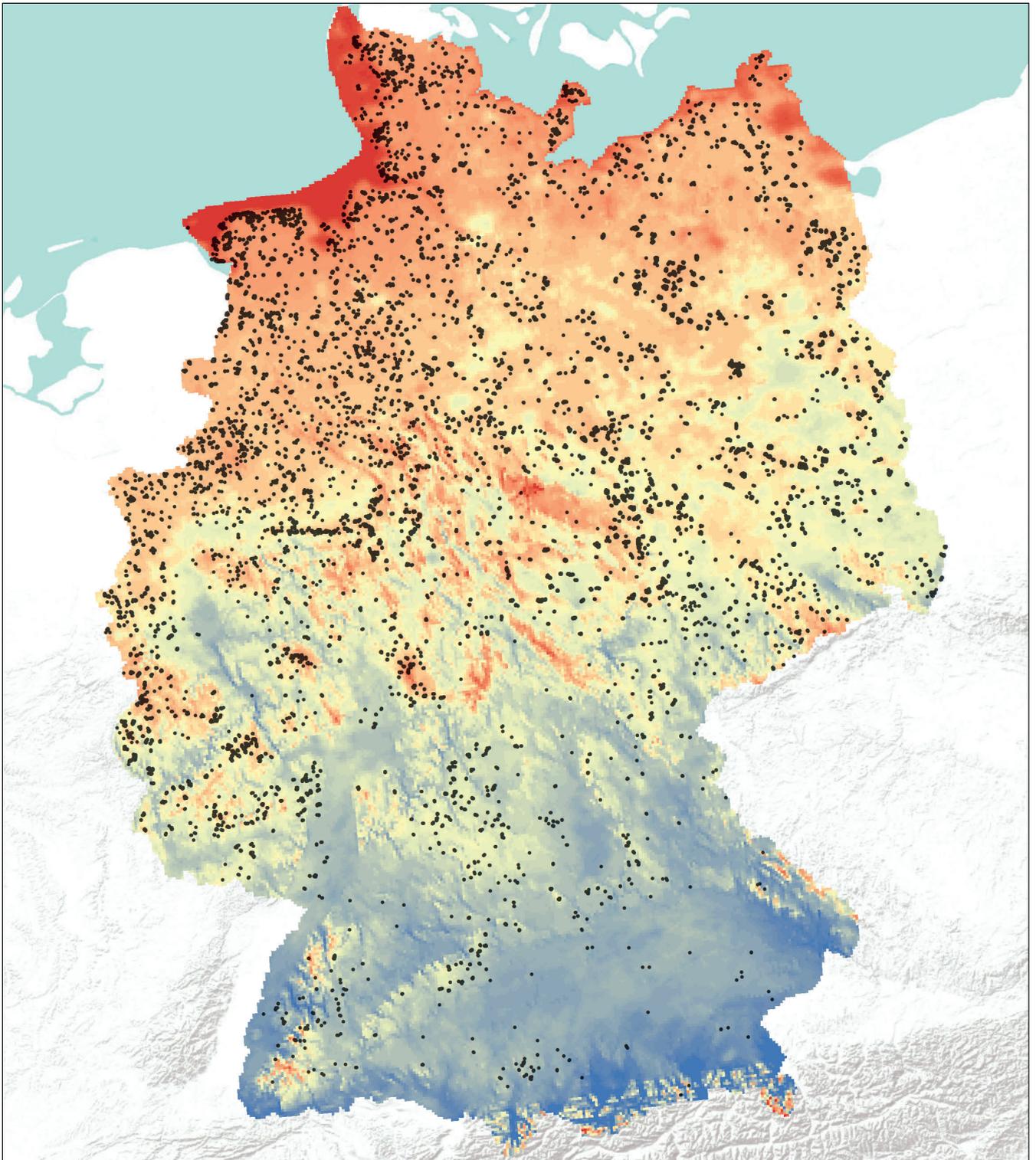
verschiedene technische Neuerungen entwickelt, die das Tötungsrisiko für Vögel und Fledermäuse sowie den Einfluss auf das Landschaftsbild deutlich verringert haben. Dazu gehören unter anderem Abschaltmechanismen für Zeiträume, in denen Vogelzüge ein Gebiet durchqueren, Rotorblattheizungen, die den Eiswurf von Rotorblättern verringern sowie Radar- und Transpondereinrichtungen, die die nächtliche Befeuern der Anlagen minimieren.

In Norddeutschland liegen die höchsten und zuverlässigsten Windgeschwindigkeiten vor. Durch technische Innovationen können inzwischen aber auch im eher windschwachen Bayern Windkraftanlagen gebaut werden, die wirtschaftlich sind. Dabei gilt die Faustregel, dass durch einen höheren Turm die Windräufigkeit abnimmt und durch einen doppelt so großen Rotor eine vierfache Menge an Windenergie geerntet werden kann. Durch weitere Forschungen können somit größere, leistungsfähigere Anlagen gebaut werden, die auch windschwache Standorte als erschließbar erscheinen lassen. Ziel dabei ist es, in die Schicht des geostrophischen (reibungsfreien) Windes vorzustoßen, was durch immer größere Anlagen möglich ist.



Zubauvolumen Windenergie in Deutschland

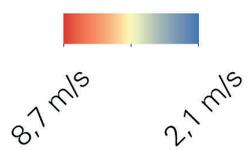
Quelle: nach IWR 2019



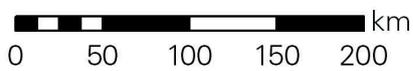
Windenergie in Deutschland

Durchschnittliche Windgeschwindigkeit in 130m Höhe

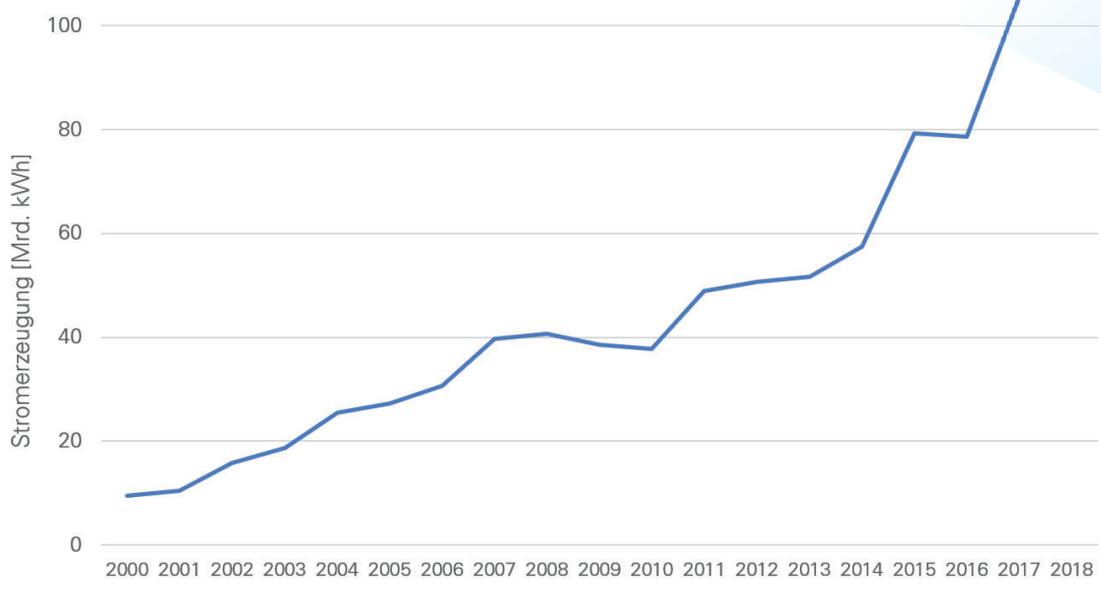
Windkraftanlagen



• Standorte



Datengrundlage: BWE 2013
 Kartengrundlage: GADM 2018
 Kartographie/Entwurf: Lucas Schwarz
 Stand: Februar 2019

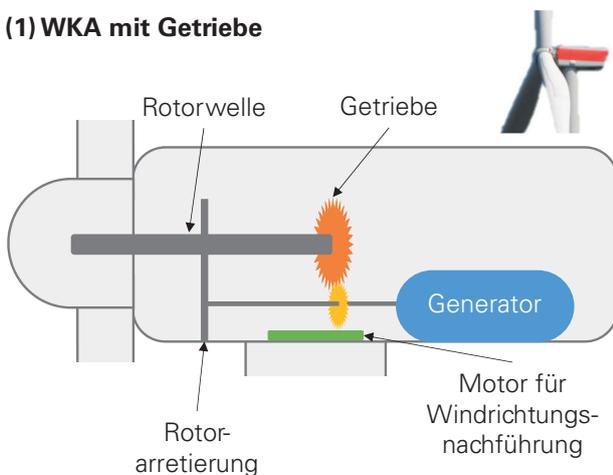


Nach ihrer Bauweise können zwei verschiedene Typen von Windkraftanlagen unterschieden werden: Anlagen mit Getriebe und getriebelese Anlagen. Windkraftanlagen mit einem Getriebe haben dieses zwischen dem Rotor und dem Generator zwischengeschaltet. Das Getriebe bietet dabei die Möglichkeit, die physikalisch bedingt niedrige Drehzahl des Rotors für den Generator zu erhöhen. So kann eine Rotordrehzahl von 14 Umdrehungen pro Minute auf 500 bis 1.650 Umdrehungen pro Minute im Generator gesteigert werden. Dadurch können die Baugröße von Generatoren minimiert und somit Kosten gespart

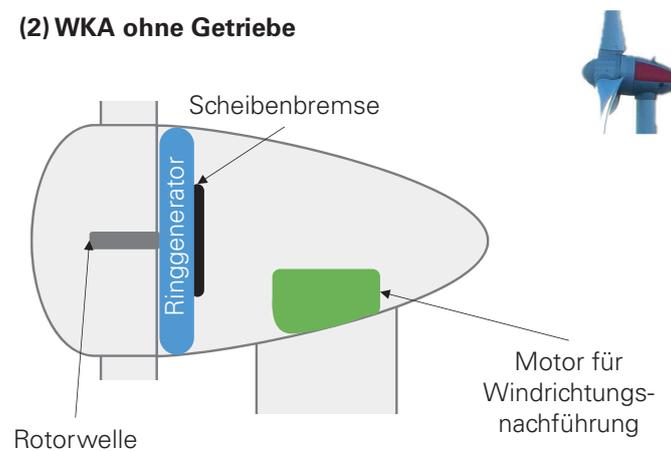
werden. Bei getriebelesen Anlagen wird die Rotorleistung direkt auf den Generator übertragen. Somit ergibt sich ein wartungsärmerer Betrieb als bei Anlagen mit Getriebe. Zusätzlich kann die Zahl der verbauten Teile sowie die Anlagenkomplexität reduziert werden. Hierbei kommen häufig Permanentmagnete zum Einsatz, bei deren Herstellung Neodym und Dysprosium, zur Gruppe der Seltenen Erden gehörend, genutzt werden.

Quelle: BMWi 2015b; BWE 2013, 2015, 2019; IWR 2019; Kuttler 2009; Pulczynski 1991; Schaffarczyk 2016; Wesselak 2017

(1) WKA mit Getriebe



(2) WKA ohne Getriebe



Vergleich: WKA mit und ohne Getriebe

Quelle: nach BWE 2015b

W

Windenergie – Offshore (Deutschland)

Der räumliche Schwerpunkt der deutschen Offshore-Industrie liegt in der Nordsee, wo 87% der Offshore-Windenergieanlagen stehen (Johanning 2018:27). Nicht zuletzt ist die Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) hier wesentlich größer als in der Ostsee, wengleich zahlreiche konkurrierende Flächennutzungen das Ausbaupotenzial erheblich einschränken (vgl. Karte Gebietskategorien in der deutschen AWZ). An diese beiden AWZ-Bereiche, innerhalb derer Deutschland eingeschränkte Hoheitsbefugnisse in Bezug auf die Ausbeutung von Ressourcen besitzt, grenzen die Ausschließlichen Wirtschaftszonen Großbritanniens, der Niederlande und Dänemarks an (vgl. Karte Ausbau der Windenergie in der Nordsee). Großbritannien besitzt eine Gesamtleistung im Offshore-Bereich von 6.840 MW (Stand 12/2017), womit es in Europa an erster Stelle steht. Neben der Nordsee besitzt Großbritannien auch bedeutende Offshore-

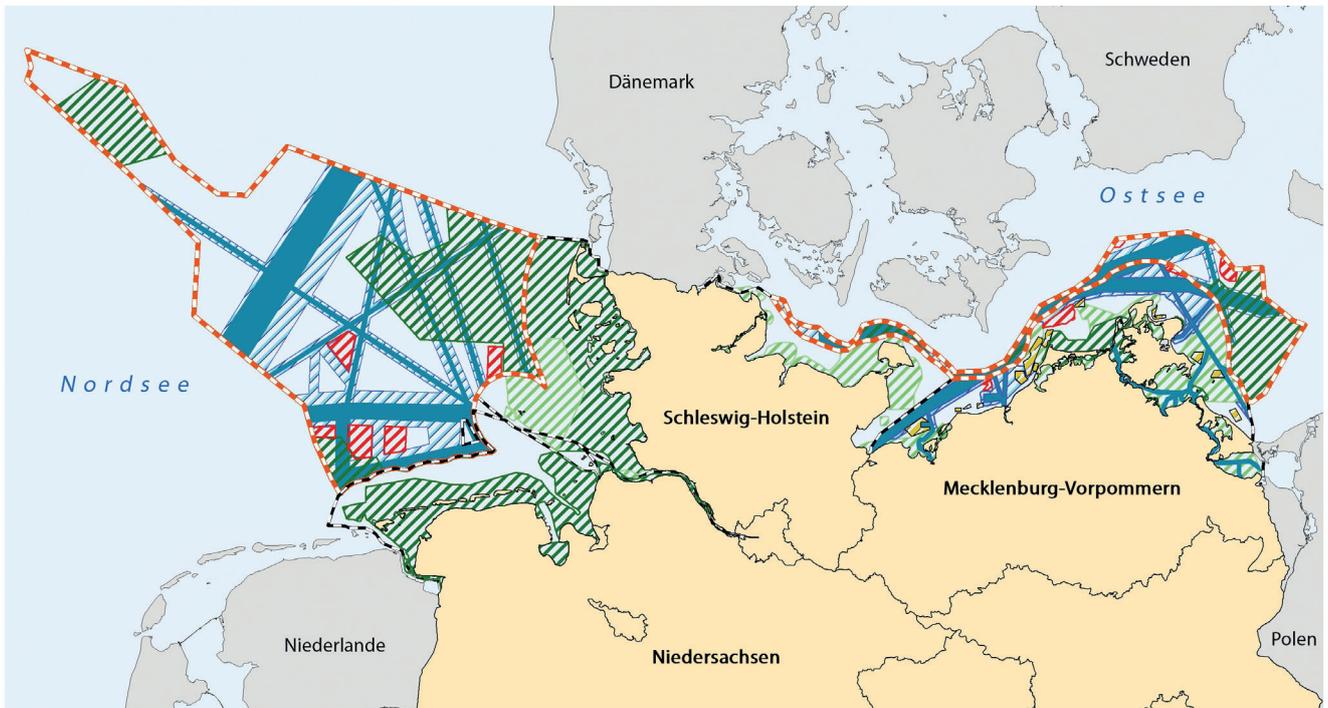
Kapazitäten in der Irischen See und im Atlantik (Ärmelkanal), wo im Gegensatz zu Deutschland (Platz 2) stark im Near-Shore-Bereich ausgebaut wird. Auf Platz 3, 4 und 5 folgen das Pionierland der Offshore-Windenergie Dänemark (1.300 MW), die Niederlande (1.120 MW) sowie Belgien (890 MW). Mit insgesamt 15.500 MW installierter Leistung nehmen diese fünf Staaten nahezu den gesamten Anteil des europäischen Offshore-Ausbaus (15.800 MW) ein (IWR 2018), dessen Gesamtpotenzial auf 140.000 MW geschätzt wird (Mossig et al. 2010:232). Mit insgesamt 18.800 MW liegen diese Nordseerainer auch im weltweiten Vergleich weit vor dem zweiten räumlichen Schwerpunkt der Offshore-Windindustrie: Asien, mit 2.800 MW, wo v. a. China den Ausbau in den küstennahen Bereichen des Gelben Meeres sowie Teilen des Ostchinesischen Meeres vorantreibt (ESRI 2018).

Die derzeit leistungsstärkste Windkraftanlage der Welt wurde im März 2018 vom deutschen Unternehmen GE Renewable Energy vorgestellt. Die GE Haliade-X 12 MW hat mit einer Rotorhöhe von 260 Metern, einer Rotorlänge von 107 Metern und einer somit überstrichenen Fläche von 38.000 m² eine Leistung von 12 MW. Diese Anlage ist für die Nutzung im Offshore-Bereich optimiert. Aufgrund der optimierten technischen Eigenschaften kann die Anlage bis zu 67 GWh/Jahr erzeugen. Dies entspricht einer Leistungssteigerung um 45% gegenüber den meisten Windenergieanlagen auf dem Markt (GE Renewable Energy 2019).

Quelle: ESRI 2018; GE Renewable Energy 2019; Johanning 2018; Mossig et al. 2010



Quelle: pixabay.com



Naturschutz und Windenergie

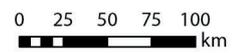
- Vorranggebiet Windenergie
- Nationalpark/ Vorranggebiet Naturschutz
- Vorbehaltsgebiet Naturschutz
- Vorbehaltsgebiet Küstenschutz

Schifffahrt

- Vorranggebiet Schifffahrt
- Vorbehaltsgebiet Schifffahrt

Grenzen

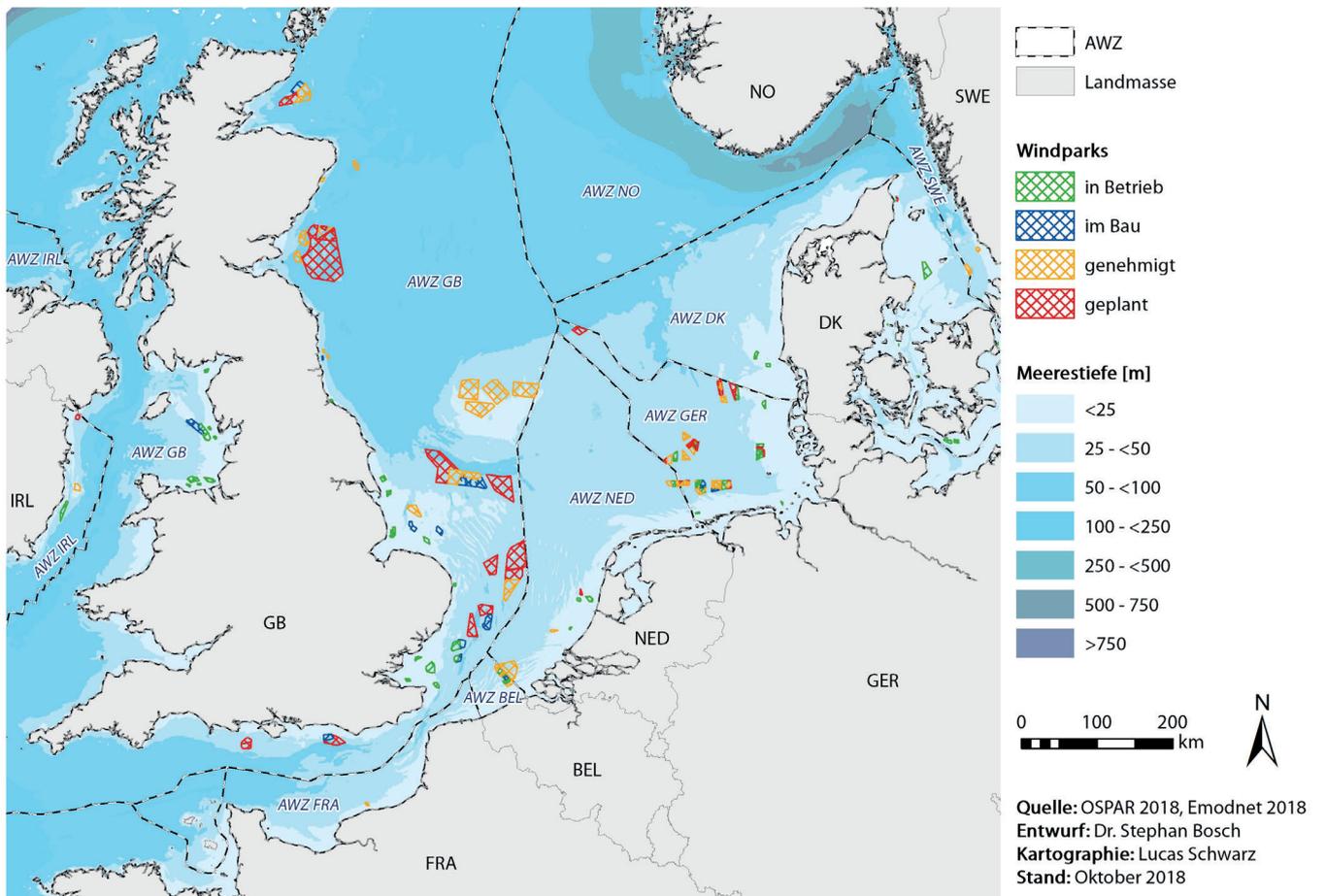
- Seegrenze
- AWZ



Quelle: LEP SH/MV/NS, BSH 2018
 Entwurf: Dr. Stephan Bosch
 Kartographie: Lucas Schwarz
 Stand: Oktober 2018

Gebietskategorien in der deutschen AWZ

Quelle: Bosch 2019



- AWZ
- Landmasse

- Windparks**
- in Betrieb
 - im Bau
 - genehmigt
 - geplant

- Meerestiefe [m]**
- <25
 - 25 - <50
 - 50 - <100
 - 100 - <250
 - 250 - <500
 - 500 - 750
 - >750



Quelle: OSPAR 2018, Emodnet 2018
 Entwurf: Dr. Stephan Bosch
 Kartographie: Lucas Schwarz
 Stand: Oktober 2018

Ausbau der Windenergie in der Nordsee

Quelle: Bosch 2019

W

Windenergie – Projektentwicklung

Da Windparks industrielle Anlagen darstellen und deren Wirtschaftlichkeit gewährleistet sein muss, bedürfen sie einer sachgerechten Planung. Diese lässt sich in die folgenden Schritte unterteilen: Flächenidentifikation, Schaffung der rechtlichen Projektgrundlagen, Genehmigung und Netzanschlussplanung, Finanzierung, Bau, Inbetriebnahme und Betrieb des Windparks.

(1) Flächenidentifizierung

Da die Standorte für Windparks maßgeblich von den Windverhältnissen abhängig sind, stellt eine erste Grundlage der Projektentwicklung die Identifikation von Flächen mit einer ausreichend hohen Windhöflichkeit dar. Die Auswahl solcher Flächen kann sich nach Windatlanten, ausgewiesenen Flächen in Regional- oder Bauleitplänen aber auch nach eigenen Messungen richten. Generell kann davon ausgegangen werden, dass Standorte, die eine Windhöflichkeit von weniger als 5 m/s aufweisen, unwirtschaftlich sind.

Bei der Analyse der Flächen werden sog. Windparklayouts erstellt, in denen lokale Besonderheiten, wie Topographie, Naturdenkmäler und physische Einschränkungen (z.B. Stromtrassen), berücksichtigt werden. Darüber hinaus müssen die Eigentumsverhältnisse (z.B. Pacht) geklärt, das Windpotenzial abgeschätzt und das Vertragsmodell bestimmt werden.

(2) Schaffung der rechtlichen Projektgrundlagen

Nachdem in Schritt (1) die Eigentumsverhältnisse geklärt wurden, erfolgt anschließend die Sicherung der Fläche durch die Aufstellung eines Pachtvertrages. Zumeist gehören Offenlandflächen Landwirten oder Gemeinden und Forstflächen staatlichen Einrichtungen, wie den Bayerischen Staatsforsten (AÖR). Die Flächensicherung kann dabei innerhalb kürzester Zeit geklärt werden, kann sich aber auch über mehrere Monate bzw. Jahre hinziehen.

Ein weiterer Schritt, der parallel zur Flächensicherung verläuft, ist die Sicherstellung der pla-

nungsrechtlichen Grundlagen. Dabei ist der erste Ansprechpartner die Gemeinde, da diese die Flächen im Rahmen der Bauleitplanung ausweist, aber auch bei Fortschreibungen von Regionalplänen mit Teilfortschreibungen im Bereich der Windenergie unterstützen kann. Dabei ist es jedoch nicht nur wichtig, Standortflächen auszuweisen, sondern auch Flächen, die für die Zulieferungen von Anlagenteilen oder zur Verlegung von Kabeltrassen benötigt werden.

Diese Schritte sind v.a. in Gebieten, die bisher nicht von Windkraftplanungen betroffen waren, sehr zeitintensiv, da wenige bis keine artenschutzrechtlichen Daten vorliegen. Daher müssen zeit- und kostenintensive Erhebungen durchgeführt werden.

(3) Genehmigung und Netzanschlussplanung

Im dritten Schritt müssen die standortbezogenen Gutachten eingeholt werden. Besonders das Artenschutzgutachten, das sich auf den Schutz von Vögeln und Fledermäusen bezieht, ist aufwendig. Nicht zuletzt müssen sich die ornithologischen Beobachtungen über einen Jahreszyklus erstrecken. Dies ist in Waldgebieten deutlich schwieriger, als im Offenland. Horstkartierungen werden daher meistens während der laubfreien Zeit durchgeführt.

(3a) Feinplanung und Parklayout

Die Planung des Windparklayouts findet zeitgleich mit der Erstellung der Gutachten statt, sodass mehrere potenzielle Layouts zu Schattenwurf, Schallemissionen, Parkwirkungsgrad und parkinternen Turbulenzen getestet werden können. Anhand dieser Informationen kann der Park in Bezug auf Topographie und natürliche Gegebenheiten optimiert werden. Das Parklayout hängt dabei maßgeblich von der Komplexität des Geländes und dem Zuschnitt des zu beplanenden Areals ab (vgl. Kapitel Windparklayout). Zur Abschätzung der Anlagenkonfiguration wird in dieser Phase bereits der Kontakt zu Windkraftanlagenherstellern aufgenommen, um geeignete Anlagen für den Standort ermitteln zu können.

(3b) Windparkinfrastruktur

Die Planung der Windparkinfrastruktur enthält die flächenhafte Festlegung von Trassen innerhalb des Areals und die Sicherung von Zufahrten innerhalb sowie außerhalb des Areals. In dieser Phase werden Streckenverläufe und Kurvenradien zum Transport der Windradkomponenten festgelegt. Dabei ist insbesondere auf serpentinreiche Strecken und enge Ortsdurchfahrten zu achten. Mittlerweile können diese Herausforderungen durch den aufgeständerten Transport von Windkraftanlagen bewältigt werden, was jedoch mit erhöhten Kosten verbunden ist.

(3c) Dingliche Flächensicherung

Die bisher nur zivilrechtlich vereinbarte Flächensicherung wird über einen Eintrag ins Baustellverzeichnis rechtlich bindend. Dies geschieht zumeist vor Beginn der Genehmigungsverfahren.

(3d) Genehmigungsverfahren

Das Genehmigungsverfahren beinhaltet Genehmigungen im Bereich der Interaktionen mit Natur und Umwelt (Genehmigung nach dem BImSchG). Dabei werden v.a. die Schallemissionen sowie die Auswirkungen auf Natur und Landschaft in Betracht gezogen. Diese Faktoren werden jedoch auch schon bei der vorangehenden Planung ins Kalkül miteinbezogen. Speziell bei der Rodung von Bäumen müssen schlüssige Pläne zur Schaffung von Ausgleichs- und Kom-

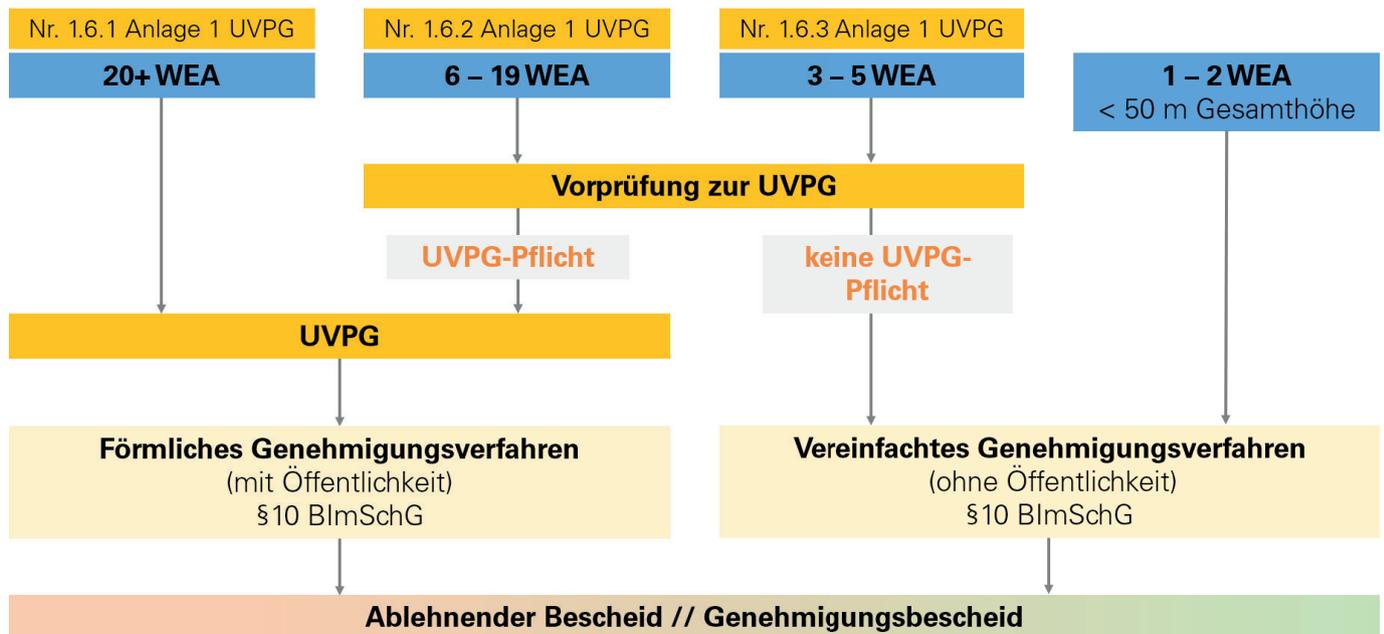
pensationsflächen vorliegen. Im Rahmen der Genehmigung bedarf es je nach Umfang des Projektes einer Umweltverträglichkeitsprüfung (vgl. Abbildung zur Umweltverträglichkeitsprüfung).

(3e) Netzanschlussplanung

Die Netzanschlussplanung findet zeitgleich zu den Genehmigungsverfahren statt. Dabei wird den Projektierenden ein Netzanschlusspunkt durch den zuständigen Netzbetreiber genannt. Die Trassenplanung und der Netzanschluss bedingen zusätzliche Flächen, die gesichert werden müssen. In Abhängigkeit von der Größe des Windparks wird dieser entweder an Übergabestationen oder Umspannwerken angeschlossen. Der dritte Schritt in der Windparkplanung kennzeichnet einen wichtigen Meilenstein. Wurde die Genehmigung sowie der zugehörige Netzanschluss mit einem vorgeschlagenen Layout erteilt, bedarf es im Anschluss einer gesicherten Finanzierung der genehmigten Anlagen.

(4) Finanzierung

Um die Finanzierung eines Windparks bewältigen zu können, sind Wind- und Ertragsgutachten von unabhängigen Gutachtern notwendig. Erst dadurch wird es möglich, Kredite bei Banken zu erhalten. In dieser Phase werden weitere Investoren gesucht, die den Bau der Windkraft-



anlagen unterstützen wollen. Dabei kann die finanzielle Partizipation von Bürgern festgeschrieben werden.

Die Prüfung durch die kreditgebenden Banken ist in diesem Kontext ein essenzieller Punkt, müssen doch die Vertragsgestaltung, Risiken, Windgutachten, Windkraftanlagen-Typen und Flächensicherung geprüft werden. Die Finanzierungspläne werden i.d.R. für 20 Jahre ausgestellt.

(5) Bau/Inbetriebnahme

Der Bau stellt den spektakulärsten Schritt in der Projektierung von Windparks dar. Dabei rücken v.a. logistische Fragestellungen in den Vordergrund. Es ist hierbei nicht nur wichtig, die angeforderten Anlagenkomponenten an den Standort zu transportieren, sondern vor allem deren zeitliche Koordination und Lagerung am Standort angemessen zu steuern. Der Projektierende stellt dabei einen Generalzeitplan auf, der mit dem gewählten Anlagenhersteller abgestimmt wird. Die wichtigen Bauabschnitte sind die Errichtung der Parkinfrastruktur, der Transport der Windkraftanlagen zum Standort sowie die Errichtung und Inbetriebnahme der Anlagen. Der Windpark ist offiziell fertiggestellt, wenn die Windkraftanlagen im Probebetrieb gelaufen sind und vom Anlagenhersteller abgenommen wurden.

(6) Betrieb

Der Betrieb erfolgt durch eine Betreiberformation, die meistens in Schritt (4), im Rahmen der Finanzierung, festgelegt wurde. Ein Beispiel für eine Betreiberform ist eine Gesellschaft mit einem Geschäftsführenden. Dabei gleicht kein Projekt dem anderen, da die Rechte und Befugnisse des Geschäftsführenden vertraglich festgelegt und durch eine Kommanditistenversammlung bestätigt wurden. Der Betrieb beinhaltet somit die buchhalterische Führung des Windparks sowie das Eingreifen bei technischen Problemen.

Zusammengefasst ist festzuhalten, dass die Genehmigungsfähigkeit, die Finanzierbarkeit, die Wirtschaftlichkeit und ein nachhaltiger Betrieb über mindestens 20 Jahre die zentralen Faktoren einer erfolgreichen Projektentwicklung darstellen.

Quelle: BWE 2013

Windparklayout

Die Festlegung einer Standortkonfiguration (Layout) eines Windparks ist eine essenzielle Entscheidung im Hinblick auf seine Wirtschaftlichkeit. Nach dem BWE bildet die Festlegung eines Layouts den vierten Schritt bei der Projektierung eines Windparks (vgl. Windenergie – Projektentwicklung). Bei der Auswahl eines passenden Layouts für einen Windpark müssen folgende Faktoren berücksichtigt werden: Netzzugang, Richtlinien, Umweltverträglichkeit, Ausgleichsmaßnahmen, visueller Einfluss, Anlagenart, Interferenzen, Lärm, Schattenwurf, Luftsicherheit, hydrologische und geologische Gegebenheiten, Verkehr und Zufahrt.

Damit sich ein Projektierer für das optimale Windparklayout entscheiden kann, wird ein standortbezogenes Micrositing durchgeführt. Dieses beschreibt einen Prozess, der die ganzheitliche Sichtung des Standortes umfasst. Dazu gehören die mikroskalige Windmessung, die Erfassung der topographischen Verhältnisse, hydrologische Messungen und Infrastrukturmaßnahmen. Aus diesen Faktoren ergibt sich die Standortkonfiguration, die festlegt, wie die Windkraftanlagen auf einer definierten Fläche verteilt werden müssen, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad des Parks zu erzielen. Diese Konfiguration ist ein wichtiger Bestandteil bei der Genehmigung und bei der Ertragsmaximierung.

Als Grundlage zur Bewertung eines Standortes wird die Windmessung genutzt. Hierüber kann abgeleitet werden, wie die windreichsten Standorte innerhalb eines Areals verteilt sind und wie die Hauptwindrichtung (HWR) liegt. Dazu werden Windhöffigkeitskarten und Windrosen erstellt. Darüber hinaus stellt die Sichtung der Infrastruktur einen grundlegenden Bestandteil dar. Dabei muss sichergestellt werden, dass die Windkraftanlagenteile vom Ort der Herstellung bis zum identifizierten Anlagenstandort transportiert werden können. Enge Kurven oder zu schmale Straßen müssen dabei für den Transport ausgeschlossen werden, so dass dieser reibungslos ablaufen kann. Mittlerweile ist dieser Aspekt jedoch von geringerer Bedeutung, da es die Möglichkeiten gibt, die langen Windkraftflügel (bei 3 MW Anlage beträgt die Länge ca. 45 m) durch Spezialfahrzeuge in einer aufgerichteten Positi-

on zu transportieren. Bei der standortinternen Infrastruktur sind nicht nur der Transport von Anlagenteilen zu berücksichtigen, sondern auch die Verkabelung und der Netzanschluss vor Ort. Hierbei müssen die geologischen und hydrologischen Eigenheiten des Areals geprüft werden. Das Layout wird zusätzlich durch rechtliche Vorgaben beeinflusst. Dabei sind das Bundesimmissionsschutzgesetz und die Umweltverträglichkeitsprüfung von übergeordneter Bedeutung. Für den Schattenwurf einer Anlage bestehen Richtlinien, die besagen, dass maximal 30 Minuten am Tag und maximal 30 Stunden im Jahr ein Schattenwurf an einem Wohnhaus bestehen darf. Bei den Prognosen wird dabei von der astronomisch maximalen Beschattungsdauer ausgegangen, um einen gesetzeskonformen Betrieb der Anlage zu gewährleisten und Abschaltzeiten wegen zu hoher Verschattung verhindern zu können. Gesetzlich vor Schattenwurf geschützt sind sog. schutzwürdige Räume. Dazu gehören Wohnräume, Schlafräume, Unterrichtsräume, Büro-, Praxis- und Arbeitsräume sowie Terrassen und Balkone von 6-22 Uhr. Auf unbebauten Flächen, auf denen schutzwürdige Bauten zulässig sind, wird die Verschattung in 2 m Höhe gemessen und muss ebenfalls die gesetzlichen Maximalwerte einhalten. Können diese nicht eingehalten werden, benötigt ein Windpark technische Reduktionsmaßnahmen und somit eine Sensorik, die reagiert, sobald die Grenzwerte überschritten werden. Dies ist jedoch mit Ertragsverlusten verbunden. Die Schallbelastung, die schutzwürdige Bauten durch Windkraftanlagen erfahren dürfen, ist

in §26-28 BImSchG geregelt. Auch hier werden in der Planungsphase Schallprognosen erstellt, bei denen die Schallausbreitung im Gelände modelliert wird. Die Schallemissionen einer Windkraftanlage unterscheiden sich aufgrund der Anlagenart, dem genutzten Generator, dem Getriebe (getriebelose Anlagen haben geringere Schallemissionen) und dem Umrichter. Dabei wird lediglich der störende Schall, nämlich der Lärm, untersucht. Zusätzlich wird der Schall im Windpark durch die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung, die Tageszeit, den Abstand, die Frequenz, die Einwirkungsdauer und subjektive Wahrnehmungen bestimmt. Durch Schallmessungen ergibt sich der Schallleistungspegel eines Windparks. Eine Zunahme des Schalls um 3,01 dB wird dabei wie eine Verdoppelung der Lautstärke wahrgenommen. Die Faustregel besagt, dass eine Zunahme der Windgeschwindigkeit um 1 m/s einer Zunahme des Schalls um 1 dB entspricht. Da die Schallwahrnehmung jedoch sehr subjektiv ist, bietet die DIN ISO Norm 9613-2 eine generelle Vergleichbarkeit. Dabei wird der Schall in einer Höhe von 10 m bei 95% Nennleistung der Anlage bzw. 10 m/s Windgeschwindigkeit angegeben. Auch beim Schall gibt es Grenzwerte, die sich aufgrund der Tageszeit in zwei Klassen, von 06-22 Uhr und von 22-06 Uhr, einteilen lassen. Diese orientieren sich an der TA Lärm, der Sechsten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz. Tagsüber ist die Einhaltung der Werte der Regelfall, nachts laufen viele Anlagen jedoch im gedrosselten Betrieb.

Schattenwurf	Schallemission		
	Ort	Tag (dB)	Nacht (dB)
am Tag max30 min	Industriegebiet	70	70
	Gewerbegebiet	65	50
	Mischgebiet	60	45
im Jahr max. 30 h	Wohnsiedlung	55	40
	Reine Wohngebiete	50	35
	Kurgebiete, Krankenhaus	45	35

Grenzwerte für Schattenwurf und Schallemissionen bei Windparks

Quelle: nach BWE 2013

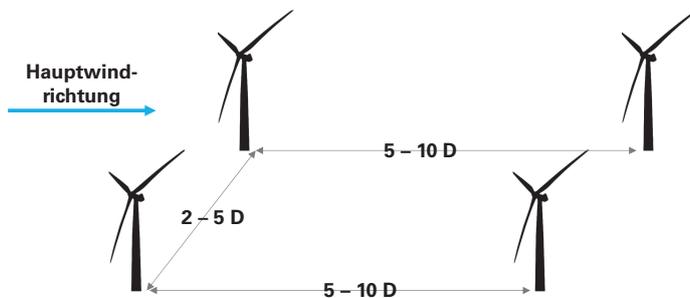
Um aufgrund der vielfältigen Restriktionen und Rahmenbedingungen ein optimales Layout wählen zu können, wird die bestehende Fläche mit der Zielvorgabe betrachtet, eine hohe Anlagenzahl, einen hohen Parkwirkungsgrad, einen hohen Energieertrag, viele Volllaststunden und keine parkinternen Anlageninteraktionen zu ermöglichen.

Windparks werden i.d.R. mit dem Ziel, einen Parkwirkungsgrad von 80% zu erreichen, geplant. Durch die Rotorbewegungen erzeugen die Windkraftanlagen auf der Lee-Seite starke Luftverwirbelungen. Diese wirken sich negativ auf den Ertrag und die Lebensdauer der windabwärts stehenden Anlagen aus. Daher gelten Faustregeln bezüglich der Abstände zwischen Windkraftanlagen in einem Windpark. In Hauptwindrichtung soll der Abstand den

5-10-fachen Rotordurchmesser und in Nebenwindrichtung den 2-5-fachen Rotordurchmesser betragen. Somit kann der sog. WAKE-Effekt verringert werden.

Bei Offshore-Windparks können alle Vorgaben durch geometrische Parklayouts umgesetzt werden. Dies ist auf die großen Flächen und die geringe Gelände Komplexität zurückzuführen. Bei Onshore-Windparks müssen die oben genannten Regeln jedoch an komplexere und kleinere Flächen angepasst werden. Dazu besteht eine Vielzahl an Programmen und Algorithmen, die das optimale Parklayout berechnen können. Eine Software, die hierfür genutzt wird, ist die WindPRO

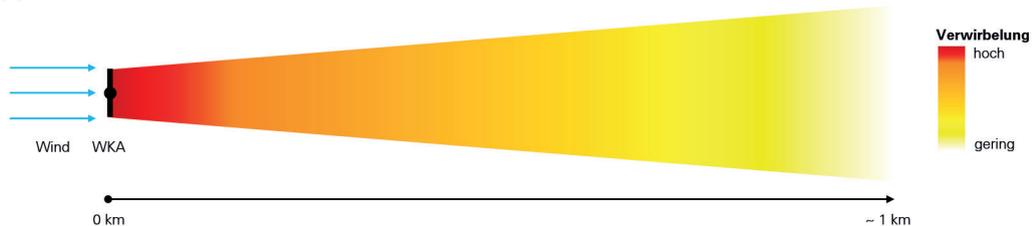
Quelle: Agatz 2016; BWE 2013; Johnsen 2016; Ntoka 2013; Vezyris 2012



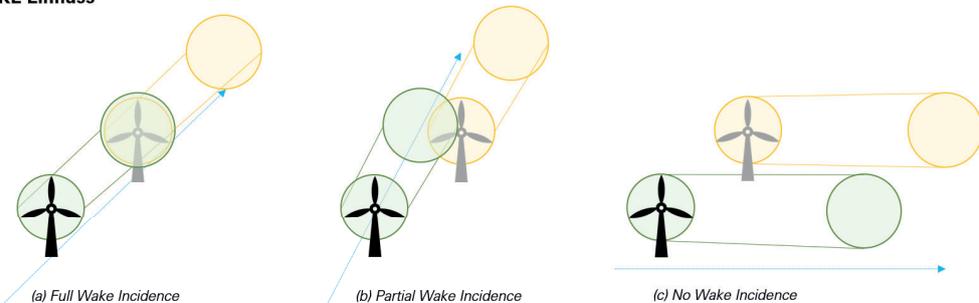
Abstände in Windparks

Quelle: nach Vezyris 2012

(1) WAKE-Effekt von oben



(2) WAKE Einfluss



Schematische Darstellung des WAKE-Effekts

Quelle: nach Ntoka 2013; Vezyris 2012

WindPRO

WindPRO ist eine dänische Software der Firma EMD International A/S, die weltweit führend bei der Projektierung und Layoutplanung von Windparks ist. Die Software vereint verschiedene Funktionen, die v.a. für die Genehmigungsplanung von elementarer Bedeutung sind. Dazu gehören die Layoutplanung, die Ertragsberechnung, die Erstellung von Schattenwurf- und Schallemissionsprognosen, die parkinterne Turbulenzberechnung und verschiedene Visualisierungstechniken. Um eine möglichst hohe

Genauigkeit der Prognosen zu erzielen, können folgende Standortfaktoren in das Programm geladen werden: Physische (Windgeschwindigkeiten, Lage, Topographie), räumliche (Untergrund, Hangneigung), Umwelt- (Flora, Fauna, Wald/Offenland, Bedeckung) und rechtliche Faktoren (Vorrang-, Vorbehalts-, Ausschlussgebiete und Abstandsmaße).

Quelle: EMD International A/S 2019

Power-to-X

Mit einem steigenden Anteil von erneuerbaren Energien im deutschen Energiesystem steigen auch die technischen Herausforderungen der Integration von volatilen Energien in die Strom- und Gasnetze. Dazu bestehen verschiedene Konzepte, um überschüssigen Strom zu nutzen, ohne dabei die Systemstabilität zu beeinträchtigen. Diese Möglichkeiten der flexiblen Stromnutzung werden unter dem Begriff Power-to-X zusammengefasst:

- **Power-to-Gas:** Umwandlung des Stroms in Gas (bspw. Wasserstoff, Methan)
- **Power-to-Liquid:** Umwandlung des Stroms in Flüssigkeit (bspw. Kraftstoffe)
- **Power-to-Chemicals:** Umwandlung des Stroms in Basischemikalien (bspw. für chemische Industrie)

Die Power-to-X-Konzepte stehen jedoch noch am Anfang ihrer Entwicklung. Die ökonomische Realisierbarkeit ist noch nicht hinreichend belegt. Dennoch ist der Ansatz vielversprechend.

Um den Markteintritt von Power-to-X-Systemen möglichst schnell realisieren zu können, wurde unter der Schirmherrschaft des Bundesministeriums für Bildung und Forschung das Kopernikus-Projekt *P2X* auf den Weg gebracht. Hierbei wird eine nationale Forschungsplattform bestehend aus 18 Forschungseinrichtungen, 27 Industrieunternehmen und drei zivilgesellschaftlichen Organisationen geschaffen, um die Dekarbonisierung des deutschen Energiesystems voranzutreiben.

Quelle: BMBF 2019

Z

Zentralität vs. Dezentralität

Die Konzepte der Zentralität und Dezentralität beziehen sich auf die Erzeugungsstruktur im Energiesystem. Hierbei hat, durch den Markteintritt der erneuerbaren Energien, ein starker Wandel stattgefunden:

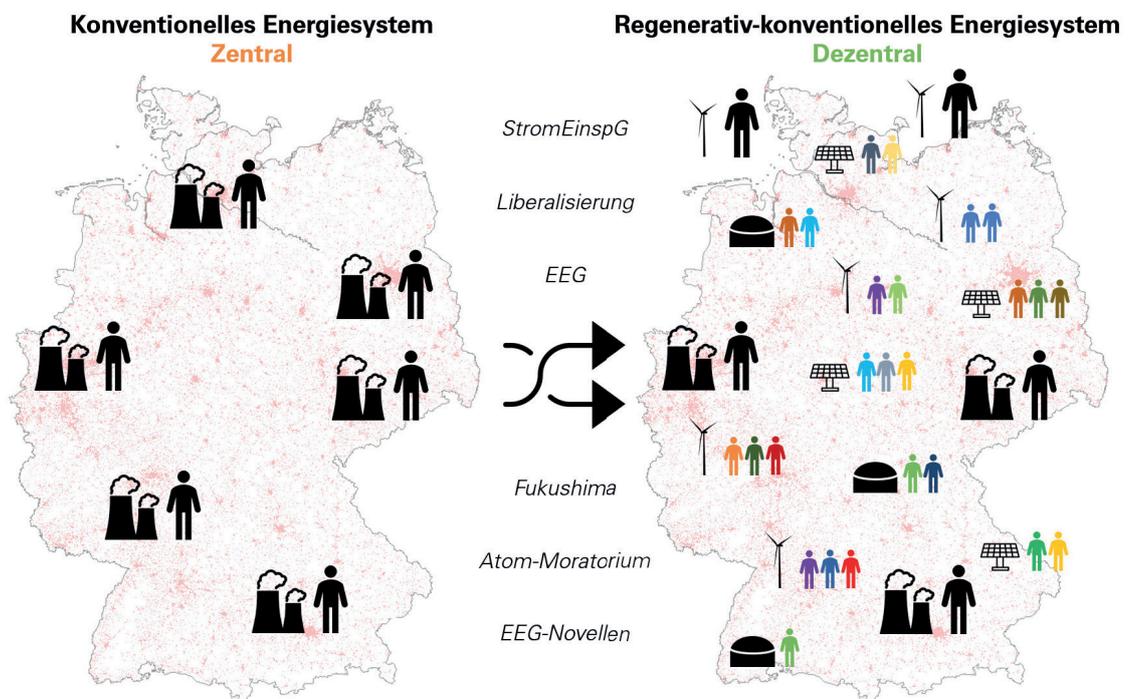
Im überkommenen fossil-nuklearen Energiesystem wurde die Energie in wenigen leistungsstarken, zentralen Kohle- oder Atomkraftwerken sowie in Verbrauchernähe produziert. Grundsätzlich war dabei die Energieproduktion an jedem Standort möglich, da keine Abhängigkeit von natürlichen Standortfaktoren bestand. Lediglich die Infrastruktur der Stromnetze und die Nähe zu Agglomerations- und Verbrauchsräumen schränkten die Standortwahl für Großkraftwerke ein.

Durch die verstärkte Nutzung der erneuerbaren Energien und den Wandel hin zu einem regenerativen Energiesystem hat sich der zentrale Charakter des Energiesystems abgeschwächt. Erneuerbare Energie-Anlagen sind aufgrund der Ubiquität ihrer zu Grunde liegenden Primärenergieträger prinzipiell an jedem Standort

möglich, durch deren geringe Energiedichte nimmt jedoch die Flächenintensität und Standortabhängigkeit zu. Erneuerbare Energie-Anlagen haben deutlich weniger Leistung als konventionelle Großkraftwerke und stellen daher eher kleinskalige Industrieprojekte dar. Sie müssen jedoch in wesentlich größerer Anzahl errichtet werden und verändern dadurch auch die ländlichen Räume in visueller Hinsicht. So wurden in Deutschland seit dem Jahr 2000 1,64 PV-Module, 29.844 Windenergieanlagen und 4.843 Biogasanlagen installiert. Ein Kennzeichen des regenerativ-konventionellen Energiesystems ist aufgrund der dispersen Verteilung dieser Anlagen daher die Dezentralität.

Die Verbrauchernähe des dezentralen Energiesystems eröffnet neue Möglichkeiten der Partizipation für die lokale Bevölkerung, geht aber auch mit neuen Herausforderungen (v.a. bzgl. Akzeptanz) einher.

Quelle: Becker et al. 2012; Bosch et al. 2016; BSW 2018; BWE 2019; Fachverband Biogas 2018; Fischer und Newig 2016; Gailing und Röhring 2015, Gailing 2017; Lutz et al. 2017



Wandel des Energiesystems in Deutschland

Quelle: nach Bosch et al. 2016; Fischer und Newig 2016; Gailing und Röhring 2015; Lutz et al. 2017

Ziele

Die Bundesregierung hat die Ziele für die Anpassung an den Klimawandel und den Ausbau der erneuerbaren Energien im EEG (BMWi 2019d) rechtsverbindlich festgeschrieben. Sie sind unter §1 – Zweck und Ziel des Gesetzes – zu finden. Die Ziele der Bundesregierung für die erneuerbare Energieproduktion lauten wie folgt:

Der Anteil der erneuerbaren Energien am **Bruttostromverbrauch** soll

- bis 2025 auf 40 bis 45 Prozent steigen.
- bis 2035 auf 55 bis 60 Prozent steigen.
- bis 2050 auf mindestens 80 Prozent steigen.

Der Anteil der erneuerbaren Energien am **Bruttoendenergieverbrauch** soll

- bis 2020 auf 19 Prozent steigen.
- bis 2030 auf 30 Prozent steigen.
- bis 2040 auf 45 Prozent steigen.
- bis 2050 auf 60 Prozent steigen.

Der **Stromverbrauch** soll

- bis 2020 um 10 Prozent gesenkt werden.
- bis 2050 um 25 Prozent gesenkt werden (Vergleichsjahr 2008).

Der **Primärenergieverbrauch** soll

- bis 2020 um 20 Prozent gesenkt werden.
- bis 2050 um 50 Prozent gesenkt werden.

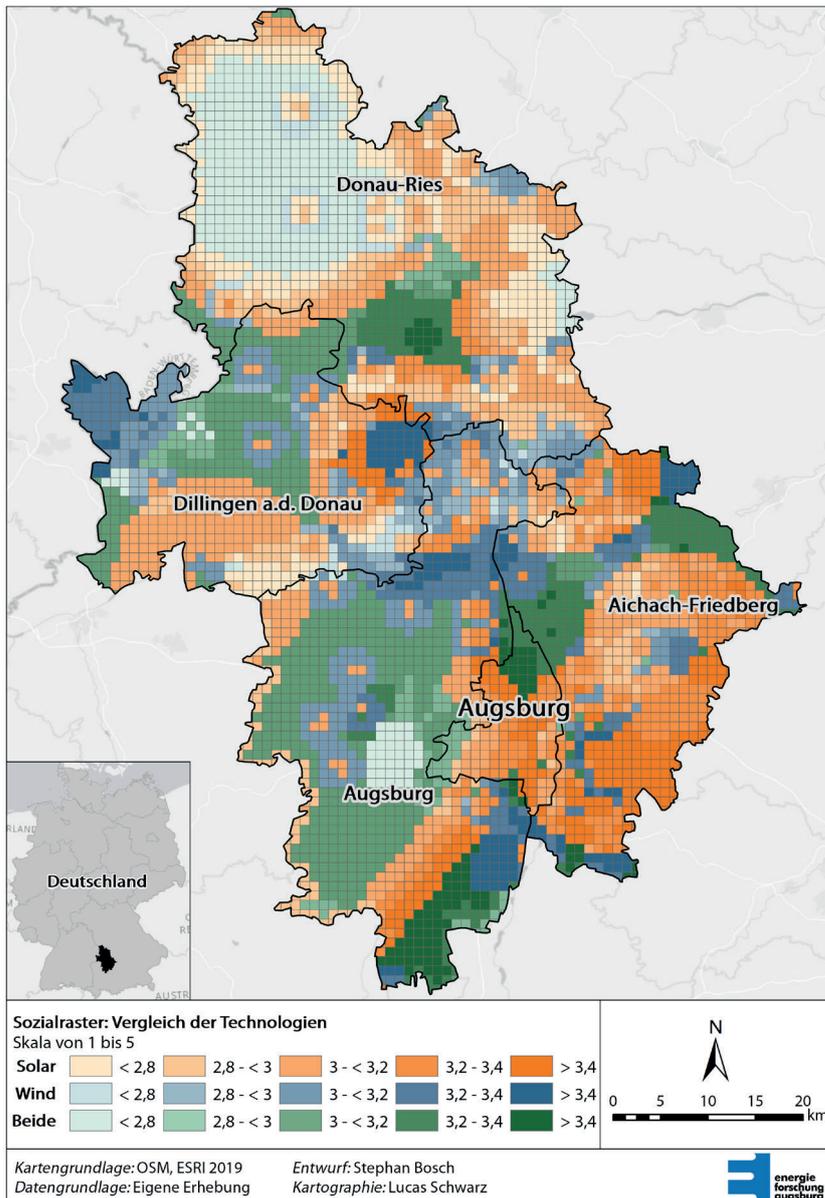
Die **Treibhausgasemissionen** sollen gegenüber dem Basisjahr 1990

- bis 2020 um 40 Prozent sinken.
- bis 2030 um 55 Prozent sinken.
- bis 2040 um 70 Prozent sinken.
- bis 2050 um 80 bis 95 Prozent sinken.

Quelle: BMWi 2019d; co2online mbH 2019



Quelle: pixabay.com



Sozial optimaler Ausbau von Wind- und Solarenergie

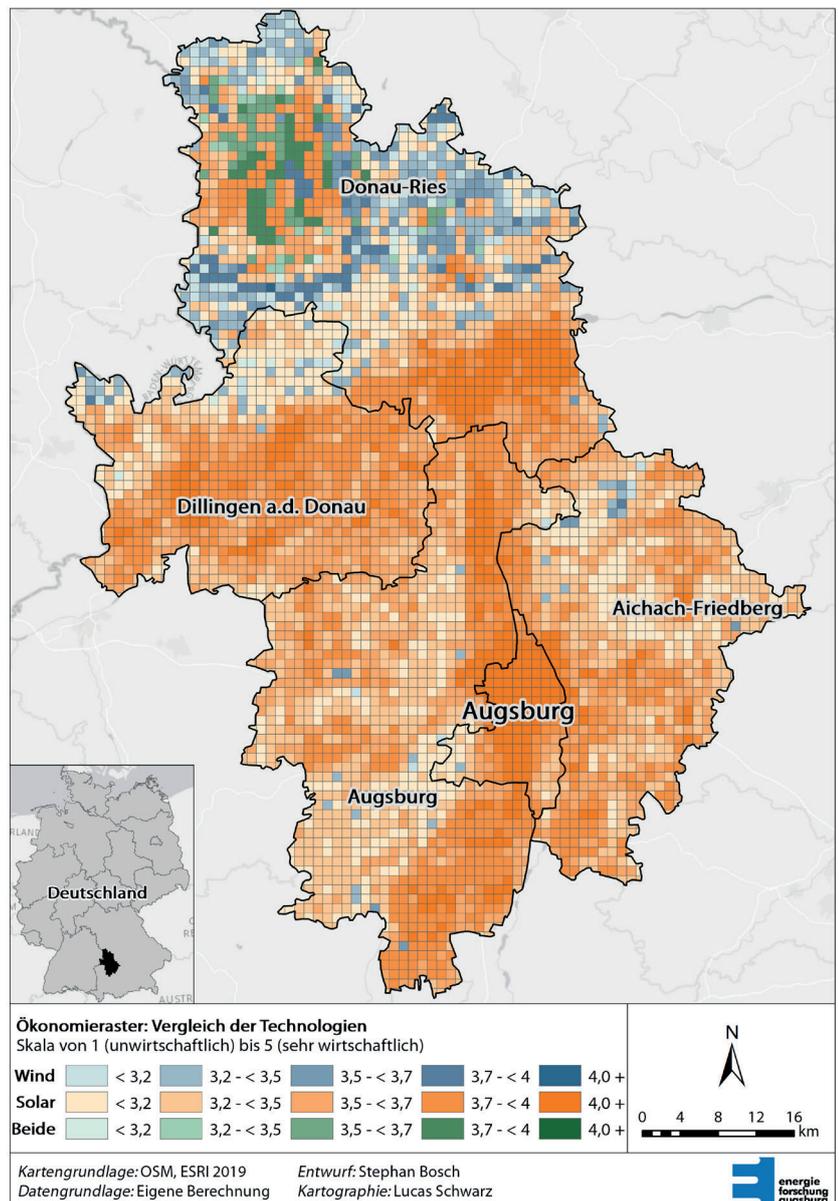
Ziel aktueller Forschung ist es, die räumlichen Muster eines verträglichen Ausbaus erneuerbarer Energien zu ermitteln und zu visualisieren. Folgende Parameter sind dabei von zentraler Bedeutung: landschaftliche Attraktivität, naturräumliche Einheit, Bürgerinitiativen, Erfahrung, Partizipation, Energie- und Klimaschutzkonzepte sowie soziodemographische Merkmale. Anhand dieser Parameter kann ein sog. Sozialraster (Auflösung 1 km) erstellt werden, der Auskunft über die kumulative soziale Qualität eines jeden Standortes gegenüber technologischen Eingriffen seitens erneuerbarer Energien geben kann. Die Entwicklung eines Sozialrasters setzt voraus, dass die einzelnen sozialen Parameter ihren Ausdruck zunächst in Form eigenständiger räumlicher Layer finden und anschließend normiert sowie mittels eines GIS-gestützten Verfahrens überlagert und miteinander verschnitten werden.

Nach der Operationalisierung und Normierung der einzelnen sozialen Parameter zu Layern werden diese überlagert und miteinander verschnitten, so dass an jedem Ort des Untersuchungsraumes die sozial verträglichste Energieform sowie ihre absolute Eignung für den jeweiligen Standort identifiziert werden kann. Dabei ist eine starke räumliche Differenzierung ersichtlich: So tritt die Photovoltaik v. a. im Landkreis Aichach-Friedberg überwiegend als sozial verträglichste Energieform in Erscheinung und erreicht dabei absolut gesehen sehr hohe soziale Eignungswerte (1 = geringster Wert, 5 = höchster Wert). Doch auch die Windenergie kann sich an einigen Standorten des Untersuchungsgebietes gegenüber der Photovoltaik durchsetzen und teilweise hohe soziale Eignungswerte erreichen. Gut erkennbar sind aber auch die technologieübergreifend geringen sozialen Eignungswerte in den besonderen naturräumlichen Einheiten Geopark Ries, Donauauen und Augsburg Westliche Wälder.

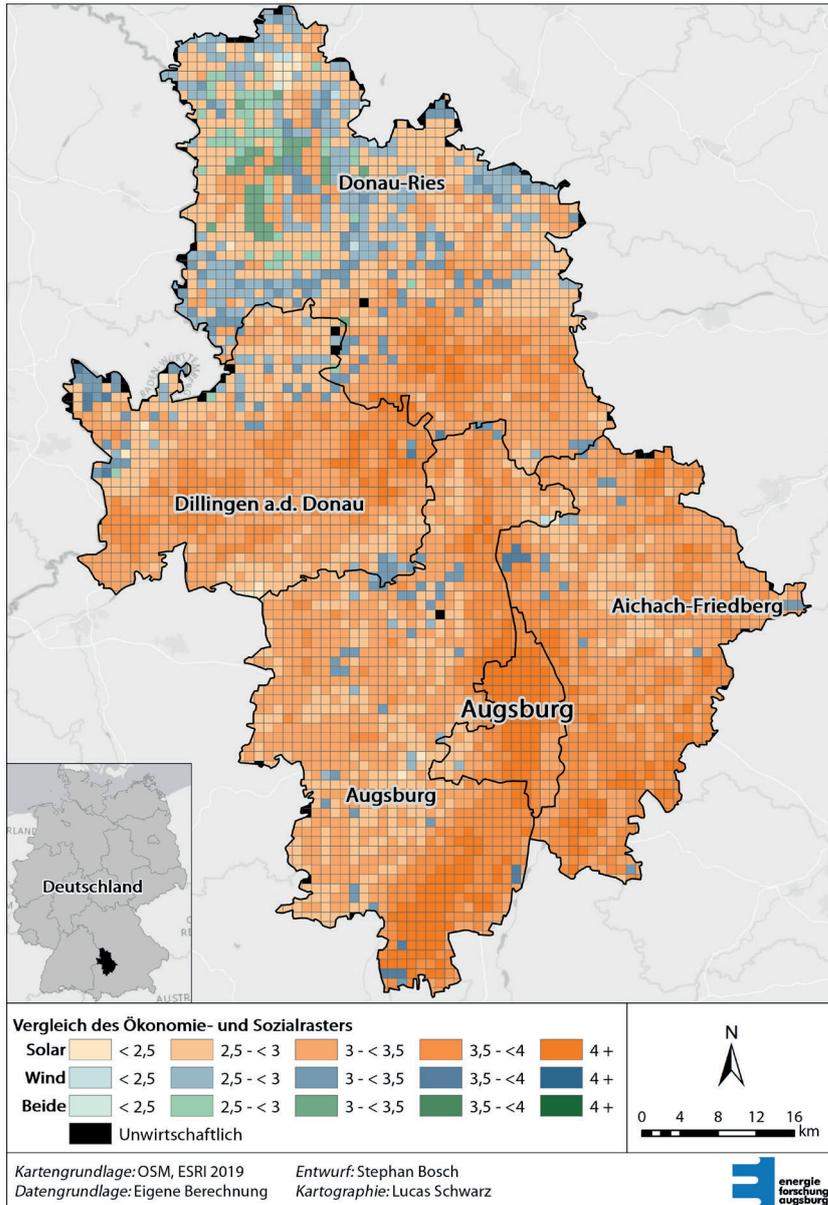
Der Stand der Forschung hat offenbart, dass die alleinige Berücksichtigung sozialer Parameter nicht ausreichend ist, da ein sozial verträglicher Standort keine Bedeutung erlangen wird, solange er nicht zugleich rentabel ist. Aus diesem Grund wird dem Sozialraster ein Ökonomieraster zur Seite gestellt, dass die Summe aller standortbezogenen Parameter eines wirtschaftlichen Ausbaus bildet. Die hier nicht explizit behandelten ökologische Faktoren fließen implizit einerseits in die auf der Meso-Ebene angesetzten Sozial- und Ökonomieraster mit ein, andererseits sichern Genehmigungsverfahren, Bundesimmissionsschutz und Umweltverträglichkeitsprüfungen die ökologischen Belange auf der hier nicht berücksichtigten Mikro-Ebene der Standortplanung ab.

Der Ökonomieraster setzt sich entsprechend des Forschungsstandes aus den Parametern natürliches Potenzial, Zufahrt, Hangneigung, Landnutzung und Siedlungsdichte zusammen. Im Fokus der Analyse stand deshalb in einem ersten Schritt die räumliche Erfassung des natürlichen Potenzials von Sonne und Wind, denn die Realisierbarkeit einer Energieanlage hängt aus Sicht der Projektentwicklung primär vom Standortangebot an regenerativer Primärenergie ab. Würde man nur diesen Faktor anwenden, so würde die Photovoltaik an allen Standorten des Untersuchungsgebietes die beste Lösung darstellen. Die Windenergie ist diesbezüglich hier nicht konkurrenzfähig. Sie kann im Wettbewerb um die Ressource Raum folglich nur über die bereits beschriebenen sozialen Faktoren oder aber über die im Folgenden noch dargelegten, restlichen ökonomischen Faktoren bestehen.

Nach der Operationalisierung und Normierung der einzelnen ökonomischen Parameter zu Layern wurden diese überlagert und miteinander verschnitten, so dass an jedem Ort des Untersuchungsraumes der Grad der ökonomischen Realisierbarkeit ersichtlich ist. Dabei offenbart der Ökonomieraster im Gegensatz zum Sozialraster eine geringere räumliche Differenzierung. Die Photovoltaik ist im Großteil des Untersuchungsgebietes ökonomisch verträglicher als die Windenergie und erreicht speziell in den Flussniederungen von Lech und Donau hohe absolute Eignungswerte. Die Windenergie hat gegenüber der Photovoltaik in nennenswertem Umfang nur im Norden der Region höhere Eignungswerte, die dort aber nur gering ausfallen.



Ökonomisch optimaler Ausbau von Wind- und Solarenergie



In einem letzten Schritt werden der Sozial- und Ökonomieraster überlagert und miteinander verschnitten, um das räumliche Muster eines umfassend verträglichen Ausbaus erneuerbarer Energien ermitteln zu können. Auch hier zeigt sich die große regionale Durchsetzungskraft der Photovoltaik, wobei die Windenergie sich aufgrund sozialer Parameter auch an einigen Standorten in der Mitte der Untersuchungsregion durchsetzen kann, die aus ökonomischer Perspektive eigentlich für die Photovoltaik sprechen würden. Demgegenüber verliert die Windenergie Standorte im Nordosten der Region aufgrund sozialer Parameter an die dort verträglichere Option Photovoltaik.

Beim Vergleich des tatsächlichen Ausbaus von Wind- und Photovoltaikanlagen mit der Karte des verträglichen Ausbaus fällt zunächst auf, dass die stark ausgebaute Photovoltaik in den meisten Gebieten der Region auch die verträglichste Lösung darstellt. Darüber hinaus wurde die Photovoltaik häufig auf Standorten projektiert, auf denen sie auch absolut gesehen eine sehr gute Eignung besitzt. Nichtsdestotrotz gibt es auch Anlagen, die sich an eher ungeeigneten Standorten befinden. Im Rahmen weiterführender Forschung wäre diesbezüglich zu klären, inwieweit es an diesen Standorten tatsächlich zu sozialen Konflikten gekommen ist, bzw. kommen kann.

Verträglicher Ausbau von Wind- und Solarenergie

Weiterführende Literatur

- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2010): Erneuerbare Energien – Potenzialatlas Deutschland. Berlin.
- Bosch S., Rathmann J., Simetsreiter F. (2016): Raumverträglicher Ausbau von erneuerbaren Energien – ein alternativer Standortplanungsansatz für eine nachhaltige Energiewende. In: *Geographica Helvetica* 71 (1), 29 – 45.
- Bosch S., Schmidt M. (2019): Auswirkungen neuer Energiesysteme auf die wirtschaftliche Entwicklung – Möglichkeiten eines grünen Kapitalismus. In: *NachhaltigkeitsManagementForum*. <https://doi.org/10.1007/s00550-019-00486-w>
- Bouzarovski S., Pasqualetti M. Castan Broto V. (2017): *The Routledge Research Companion to Energy Geographies*. Abingdon-on-Thames, New York.
- Bridge G., Bouzarovski S., Bradshaw M., Eyre N. (2013): Geographies of Energy Transition: Space, Place and the Low-Carbon Economy. In: *Energy Policy* 53, 331 – 340.
- Brücher W. (2009): *Energiegeographie – Wechselwirkung zwischen Ressourcen, Raum und Politik*. Berlin, Stuttgart.
- Brunnengräber A., Di Nucci M.R. (2014): *Im Hürdenlauf zur Energiewende – Von Transformationen, Reformen und Innovationen*. Wiesbaden.
- Bundesverband Windenergie (2013): *Windenergie im Binnenland – Handbuch der Wirtschaftlichkeit und Projektplanung an Binnenlandstandorten*. Berlin.
- Gailing L., Röhring A. (2015): Was ist dezentral an der Energiewende? Infrastrukturen erneuerbarer Energien als Herausforderungen und Chancen für ländliche Räume. In: *Raumforschung und Raumordnung* 73 (1), 31 – 43.
- Heier S. (2009): *Windkraftanlagen – Systemauslegung, Netzintegration und Regelung*. Wiesbaden.
- Huber M. (2015): Theorizing Energy Geographies. In: *Geography Compass* 9 (6), 327 – 338.
- Kaltschmitt M., Streicher W., Wiese A. (2006): *Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Berlin, Heidelberg.
- Kirby C. (2016): From ‘Energy Geography’ to ‘Energy Geographies’: Perspectives on a Fertile Academic Borderland. In: *Progress in Human Geography* 40 (1), 105 – 125.
- Kühne O., Weber F. (2018): *Bausteine der Energiewende*. Wiesbaden.
- Meadows D., Randers J., Meadows D. (2015): *Grenzen des Wachstums – Das 30-Jahre-Update: Signal zum Kurswechsel*. Stuttgart.
- Quaschnig V. (2013): *Regenerative Energiesysteme – Technologie, Berechnung, Simulation*. München.
- Radtke J., Hennig B. (2013): Die deutsche „Energiewende“ nach Fukushima – Der wissenschaftliche Diskurs zwischen Atomausstieg und Wachstumsdebatte. In: *Beiträge zur sozialwissenschaftlichen Nachhaltigkeitsforschung* 8. Marburg.
- Schaffarczyk A. (2016): *Einführung in die Windenergietechnik*. München.
- Schöbel S. (2012): *Windenergie und Landschaftsästhetik*. Berlin.
- Sovacool B.K. (2014): What Are We Doing Here? Analyzing Fifteen Years of Energy Scholarship and Proposing a Social Science Research Agenda. In: *Energy Research & Social Science* 1, 1 – 29.
- Wesselak V., Schabbach T., Link T., Fischer J. (2017): *Handbuch Regenerative Energietechnik*. Berlin.
- Wolsink M. (2000): Wind power and the NIMBY-myth: institutional capacity and the limited significance of public support. In: *Renewable Energy* 21 (1), 49 – 64.
- Zahoransky R. (2015): *Energietechnik – Systeme zur Energieumwandlung – Kompaktwissen für Studium und Beruf*. Wiesbaden.
- Zimmerer K.S. (2011): New Geographies of Energy: Introduction to the Special Issue. In: *Annals of the Association of American Geographers* 101 (4), 705 – 711.

Quellenverzeichnis

- Agatz M. (2016): Windenergie Handbuch. Gelsenkirchen.
- AGEE Stat, UBA (2018): Erneuerbare Energien in Deutschland – Daten zur Entwicklung im Jahr 2017. Dessau-Roßlau.
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2010): Erneuerbare Energien 2020 – Potenzialatlas Deutschland. Berlin.
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2012): “Smart Grids” für die Stromversorgung der Zukunft – Optimale Verknüpfung von Stromerzeugern, -speichern und -verbrauchern. In: Renewes Spezial 58.
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2018a): Klares Bekenntnis der deutschen Bevölkerung zu Erneuerbaren Energien. (zuletzt abgerufen am 25.11.2018: <https://www.unendlich-viel-energie.de/themen/akzeptanz-erneuerbarer/akzeptanz-umfrage/klares-bekenntnis-der-deutschen-bevoelkerung-zu-erneuerbaren-energien>).
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2018b): Erneuerbare Energien in Bürgerhand. (zuletzt abgerufen am 01.12.2018: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/grafik-dossier-erneuerbare-energien-in-buergerhand>).
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2018c): Glossar – S. (zuletzt abgerufen am 03.12.2018: <https://www.unendlich-viel-energie.de/glossar?letter=S>).
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2018d): Glossar – E. (zuletzt abgerufen am 03.12.2018: <https://www.unendlich-viel-energie.de/glossar?letter=E>).
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2018e): Bürgerenergie bleibt Schlüssel für erfolgreiche Energiewende. (zuletzt abgerufen am 15.01.2019: <https://www.unendlich-viel-energie.de/buergerenergie-bleibt-schluessel-fuer-erfolgreiche-energiewende>).
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2018f): Glossar – N. (zuletzt abgerufen am 03.12.2018: <https://www.unendlich-viel-energie.de/glossar?letter=N>).
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2018g): Liberalisierung des Strommarktes: Befreiung für neue Anbieter und die Erneuerbaren. (zuletzt abgerufen am 19.02.2019: <https://www.unendlich-viel-energie.de/liberalisierung-des-strommarktes-befreiung-fuer-neue-anbieter-und-die-erneuerbaren>).
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2019a): Das regenerative Kombikraftwerk. (zuletzt abgerufen am 15.01.2019: <http://www.kombikraftwerk.de>).
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2019b): So funktioniert ein Smart Grid. (zuletzt abgerufen am 15.02.2019: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/so-funktioniert-ein-smart-grid>).
- Altvater E (2007): The social and natural environment of fossil capitalism. In: Socialist Register 43, 37 – 58.
- Amprion, Tennet, TransNetBW, 50 Hertz (2018): EEG-Anlagenstammdaten. (zuletzt abgerufen am 05.02.2019: <https://www.netztransparenz.de/EEG/Anlagenstammdaten>).
- Amprion, Tennet, TransNetBW, 50 Hertz (2019): Übertragungsnetzbetreiber. (zuletzt abgerufen am 05.02.2019: <https://www.netzentwicklungsplan.de/de/wissen/uebertragungsnetz-betreiber>).
- Anagnostopoulos JS, Papantonis DE (2008) Simulation and size optimization of a pumped-storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy. In: Renewable Energy 33, 1685 – 1694.
- Aretz A., Bost M., Gährs S., Hirschl B. (2016): Prosumer für die Energiewende. In: Ökologisches Wirtschaften 31 (2), 14 – 15.
- Assheuer T. (2017): Die linke Lust am Untergang. (zuletzt abgerufen am 11.12.2018: <http://www.zeit.de/2017/28/kapitalismus-kritik-g20-proteste-linke-marxismus>).
- Bardi U. (2009): Peak oil: The four stages of a new idea. In: Energy 34 (3), 323 – 326.
- Becker S., Gailing L., Naumann M. (2012): Neue Energielandschaften – neue Akteurslandschaften – Eine Bestandsaufnahme im Land Brandenburg. Berlin.

- Bettini G., Karaliotas L. (2013): Exploring the limits of peak oil: naturalising the political, de-politicising energy. In: *The Geographical Journal* 179 (4), 331 – 341.
- Bocken N.M.P., De Pauw I., Bakker C., Van d. Grieten B. (2016): Product design and business model strategies for a circular economy. In: *Journal of Industrial and Production Engineering* 33 (5), 308 – 320.
- Böhm S., Misoczky M.C., Moog S. (2012): Greening capitalism? A marxist critique of carbon markets. In: *Organization Studies* 33 (11), 1617 – 1638.
- Bosch S., Rathmann J., Simetsreiter F. (2016): Raumverträglicher Ausbau von erneuerbaren Energien – ein alternativer Standortplanungsansatz für eine nachhaltige Energiewende. In: *Geographica Helvetica* 71 (1), 29 – 45.
- Bosch S. (2017): Wie unser Energiekonsum unsere Umgebung verändert. In: *Praxis Geographie* 1, 16-20.
- Bosch S. (2018): Technologie- und Standortwahl beim Ausbau erneuerbarer Energien – Eine empirische Analyse zum unternehmerischen Verhalten von Anlagenbetreibern. In: *Sustainability Management Forum* 27 (1), 31 – 52.
- Bosch S. (2019): Meere als regenerative Energiequellen. In: *Geographische Rundschau* 71 (4), 28 – 33.
- Bosch S., Schmidt M. (2019): Is the post-fossil era necessarily post-capitalistic? – The robustness and capabilities of green capitalism. In: *Ecological Economics* 161, 270 – 279.
- Brand U. (2016a): Beyond green capitalism: Social-ecological transformation and perspectives of a global green-left. In: *Fudan Journal of Humanities and Social Sciences* 9 (1), 91 – 105.
- Brand U. (2016b): Green economy, green capitalism and the imperial mode of living: Limits to a prominent strategy, contours of a possible new capitalist formation. In: *Fudan Journal of Humanities and Social Sciences* 9 (1), 107 – 121.
- Braungart M., McDonough W. (2009): *Cradle to Cradle*. Vintage Books, London.
- Bridge G. (2010): Geographies of peak oil: The other carbon problem. In: *Geoforum* 41 (4), 523 – 530.
- Bridge G., Bouzarovski S., Bradshaw M., Eyre N. (2013): Geographies of energy transition: Space, place and the low-carbon economy. In: *Energy Policy* 53, 331 – 340.
- Buch-Hansen H. (2018): The prerequisites for a degrowth paradigm shift: Insights from critical political economy. In: *Ecological Economics* 146, 157 – 163.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMVJ) (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2017). Berlin.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2018): Daten. (zuletzt abgerufen am 22.02.2019: https://www.bsh.de/DE/DATEN/daten_node.html;jsessionid=065A5161F235CB327CE5621F645BCCFC.live21304).
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2019): Power-to-X. (zuletzt abgerufen am 22.02.2019: <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/power-to-x>).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015a): Das deutsche Stromnetz. Berlin. (zuletzt abgerufen am 25.11.2018: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/abbildung-das-deutsche-stromnetz.html>).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015b): Zwei Konzepte, zwei Meinungen: Windenergieanlagen – mit oder ohne Getriebe. In: *Energiewende direkt*, 12. (zuletzt abgerufen am 20.02.2019: <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2015/12/Meldung/kontrovers-klinger-jacobs.html>).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016): Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2015. Berlin.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2018a): Was bedeutet “Bruttostromverbrauch”? (zuletzt abgerufen am 01.12.2018: <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2016/01/Meldung/direkt-erklaert.html>).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2018b): Die Digitalisierung der Energiewende. (zuletzt abgerufen am 03.12.2018: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/digitalisierung-der->

- energiewende.html*).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2018c): Elektromobilität in Deutschland. (zuletzt abgerufen am 03.12.2018: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/elektromobilitaet.html>).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2018d): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland – unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistiken (AGEE-Stat). Berlin.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019a): Der Strompreis. (zuletzt abgerufen am 05.06.2019: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/strompreise-bestandteile.html>).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019b): Erneuerbare Energien. (zuletzt abgerufen am 08.01.2019: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019c): Wasserkraft. (zuletzt abgerufen am 22.02.2019: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/wasserkraft.html?cms_docId=61946).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019d): Das Erneuerbare-Energien-Gesetz. (zuletzt abgerufen am 15.02.2019: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/eeg.html?cms_docId=72462).
- Bundesnetzagentur (2017) Leitungsvorhaben. <https://www.netzausbau.de/leitungsvorhaben/de.html>. Zugegriffen: 14. Jun. 2018
- Bundesnetzagentur (2019): SMARD – Strommarktdaten. (zuletzt abgerufen am 15.02.2019: <https://www.smard.de/home>).
- Bundesnetzagentur (2019): Stromnetze zukunftssicher gestalten. (zuletzt abgerufen am 05.02.2019: <https://www.netzausbau.de/home/de.html>).
- Bundesregierung (2018): CO2-Emission. (zuletzt abgerufen am 01.12.2018: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/co2-kohlenstoffdioxid-oder-kohlendioxid-emission-614692>).
- Bundesverband Bioenergie e.V. (BBE): Branchenzahlen Bioenergie 2018. (zuletzt abgerufen am 01.12.2018: <https://www.bioenergie.de/downloads/branchenzahlen>).
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (2018): Jahresvolllaststunden 2010 bis 2017 – Gesamte Elektrizitätswirtschaft. (zuletzt abgerufen am 19.02.2019: https://www.bdew.de/media/documents/Jahresvolllaststunden-2010_2017_o_online_jaehrlich_Ba_26042018.pdf).
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) (2018): Infrastruktur verbinden – Die Bedeutung der Gasinfrastruktur und von Power-to-Gas für die Energiewende. Bonn, Berlin.
- Bundesverband Geothermie (2019): Sequestrierung von CO2. (zuletzt abgerufen am 13.02.2019: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/s/sequestrierung-von-co2.html>).
- Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW): Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik). Berlin.
- Bundesverband Wind Energie (2018): Statistiken. Berlin. (zuletzt abgerufen am 31.07.2018: <https://www.wind-energie.de/themen/statistiken>).
- Bundesverband Windenergie (2013): Windenergie im Binnenland – Handbuch der Wirtschaftlichkeit und Projektplanung an Binnenlandstandorten. Berlin.
- Bundesverband Windenergie (BWE) (2013): Windenergie im Binnenland – Handbuch der Wirtschaftlichkeit und Projektplanung an Binnenlandstandorten. Berlin.
- Bundesverband Windenergie (BWE) (2015): A bis Z – Fakten zur Windenergie. Berlin.
- Bundesverband Windenergie (BWE) (2019): Jahrbuch Windenergie 2018. Berlin.
- Castree N. (2010) Crisis, continuity and change: Neoliberalism, the left and the future of capitalism. In: *Antipode* 41 (S1), 185 – 213.
- ChemgaPedia (2018): Brutto-Stromerzeugung. (zuletzt abgerufen am 01.12.2018: http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/brutto_00045stromerzeugung.glos.html).
- Chisholm M. (1990): The increasing separation of production and consumption. In: *Tur-*

- ner B.L., Clark W.C., Kates R.W., Richards J.F., Mathews J.T., Meyer W.B. (Hrsg.): The earth as transformed by human action. Global and regional changes in the biosphere over the past 300 years. Cambridge University Press, Cambridge, 87 – 1.
- Clausius R. (1850) Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. In: Poggendorffs Annalen 79, 368 – 397.
- Cludius J., Hermann H., Matthes F.C., Graichen V. (2014): The merit order effect of wind and photovoltaic electricity generation in Germany 2008-2016 estimation and distribution implications. In: Energy Economics 44, 302 – 313.
- co2online mbH (2019): Energiewende: Definition & Ziele – die Übersicht. (zuletzt abgerufen am 20.02.2019: <https://www.co2online.de/klima-schuetzen/energiewende/energiewende-definition-ziele-uebersicht/>).
- Daly H.E. (1991) Steady-state economics. Second Edition. Island Press, Washington DC.
- Daly H.E. (1995) On Nicholas Georgescu-Roegen's contributions to economics: An obituary essay. In: Ecological Economics 13, 149 – 154.
- DESERTEC Foundation (2018): The Vision. (zuletzt abgerufen am 01.12.2018: <http://www.desertec.org/>).
- Deutsche Energie-Agentur (dena) (2016): Potenzialatlas Power to Gas – Klimaschutz umsetzen, Erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen. Berlin.
- Deutsche Energie-Agentur (dena) (2019): Strategieplattform Power to Gas – Pilotprojekte. (zuletzt abgerufen am 14.02.2019: http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/?no_cache=1).
- Deutsche Energie-Agentur (dena) (2019b): Liberalisierung des Strommarktes. (zuletzt abgerufen am 19.02.2019: <https://www.dena.de/themen-projekte/energiesysteme/strommarkt/>).
- Deutscher Rat für Landespflege (DRL) (2006): Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft. In: Deutscher Rat für Landespflege (Hrsg.), Schriftenreihe des deutschen Rates für Landespflege, Heft 79. (zuletzt abgerufen am 03.06.2019: https://www.landespflege.de/schriften/DRL_SR79.pdf).
- Deutsches Clean Tech Institute (DCTI) (2010): Bioenergie – CleanTech-Branche in Deutschland – Treiber im Fokus. CleanTech Studienreihe, Band 3. Bonn.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2019): Der Solarturm Jülich: Testanlage für kommerzielle Turmkraftwerke. (zuletzt abgerufen am 19.02.2019: https://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-8560/15527_read-44867/).
- Devine-Wright P. (2005): Beyond NIMBYism: towards an integrated framework for understanding public perceptions of wind energy. In: Wind Energy 8, 125 – 139.
- Döring S. (2015): Energieerzeugung nach Novelisierung des EEG – Konsequenzen für regenerative und nicht regenerative Energieerzeugungsanlagen. Berlin, Heidelberg.
- Ebeling W., Freund J., Schweitzer F. (1998): Komplexe Strukturen: Entropie und Information. BG Teubner, Leipzig.
- EEX (2018a): Pressemitteilung – 2017: EEX Group erzielt zweistelliges Wachstum bei Erdgas, Emissionen und Agrarprodukten. Leipzig, London.
- EEX (2018b): EEX. (zuletzt abgerufen am 03.12.2018: <https://www.eex.com/de/>).
- EID GmbH (2018): Untertage-Gasspeicherung in Deutschland – Underground Storage in Germany. In: Erdöl Erdgas Kohle 134 (11), 410 – 417.
- Eiselt J. (2012): Dezentrale Energiewende – Chancen und Energiewende. Wiesbaden.
- Electrive (2018): KBA: Knapp 100.000 E-Fahrzeuge auf deutschen Straßen. (zuletzt abgerufen am 03.12.2018: <https://www.electrive.net/2018/03/05/53-861-elektro-pkw-in-deutschland-bis-ende-2017/>).
- Embshoff D., Giegold S. (Hrsg.) (2008): Solidarische Ökonomie im globalisierten Kapitalismus. VSA, Hamburg.
- EMD International A/S (2019): windPRO – The World's Leading Software for Wind Energy Project Design and Planning. (zuletzt abgerufen am 20.02.2019: <https://www.emd.dk/windpro/>).
- Emodnet (2018): Wind Farms. (zuletzt abgerufen am 22.02.2019: <http://www.emodnet-humanactivities.eu/search-results.php?dataname=Wind+Farms+%28Points%29>).
- Environmental Systems Research Institute (ESRI) (2018): Global Offshore Renewab-

- le Map. (zuletzt abgerufen am 22.08.2018: <https://www.4coffshore.com/offshorewind/index.aspx?lat=53.333&lon=7.211&wfid=DE77>).
- Europäische Kommission (2019): Pariser Übereinkommen. (zuletzt abgerufen am 12.02.2019: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de).
- Eurostat (2018): Energieimporte in der EU. (zuletzt abgerufen am 03.12.2018: https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=t2020_rd320&language=de).
- Ewers H.-J., Rennings K. (1992): Abschätzung der Schäden durch einen sogenannten „Supergau“. Prognos Schriftenreihe, Identifizierung und Internalisierung externer Kosten der Energieversorgung. (zuletzt abgerufen am 04.06.2019: <http://zukunftslobby.de/Texte1/prognstud.html>).
- EWI, GWS, Prognos AG (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose – Endbericht. Basel, Köln, Osnabrück.
- ExxonMobil (2018): Energieprognose Deutschland 2018 – 2040. Hamburg.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (2019): Basisdaten Nachwachsende Rohstoffe. (zuletzt abgerufen am 05.02.2019: <https://basisdaten.fnr.de/rohstoffbereitstellung/>).
- Fachverband Biogas (2018): Branchenzahlen. (zuletzt abgerufen am 22.02.2019: https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/de_branchenzahlen).
- Falcão, A.F.O. und J.C.C. Henriques (2016): Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. In: Renewable Energy 85, 1391 – 1424.
- Fares R. (2015): Renewable energy intermittency explained: Challenges, solutions, and opportunities. (zuletzt abgerufen am 08.02.2018: <https://blogs.scientificamerican.com/plugged-in/renewable-energy-intermittency-explained-challenges-solutions-and-opportunities/>).
- Fischer L., Newig J. (2016): Importance of Actors and Agency in Sustainability Transitions: A Systematic Exploration of the Literature. In: Sustainability 8 (5), 1 – 21.
- Fligstein N., McAdam D. (2012): A theory of fields. Oxford.
- Forum Synergiewende (Deutsche Umwelthilfe e.V. und Agentur für Erneuerbare Energien e.V.) (2018): Sektorenkopplung in der Praxis. Berlin.
- Fraunhofer Institut (2019): Energy Charts. (zuletzt abgerufen am 08.01.2018: https://www.energy-charts.de/index_de.htm).
- Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) (2019): Volllaststunden. (zuletzt abgerufen am 05.06.2019: http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_de/3_Onshore/5_betriebsergebnisse/1_volllaststunden/).
- Gailing L. (2017): Die neuen ländlichen Energieräume: Kulturlandschaften der Energiewende. In: Ländlicher Raum 68 (1), 43 – 45.
- Gailing L., Röhring A. (2015): Was ist dezentral an der Energiewende? Infrastrukturen erneuerbarer Energien als Herausforderungen und Chancen für ländliche Räume. In: Raumforschung und Raumordnung 73 (7), 31 – 43.
- Garcia-Olivares A., Sole J. (2015): End of growth and the structural instability of capitalism – From capitalism to a Symbiotic Economy. In: Futures 68, 31 – 43.
- Gawel E., Strunz S., Lehmann P. (2012): The German Energiewende under attack: Is there an irrational Sonderweg? (zuletzt abgerufen am 23.05.2018: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/64555/1/726590568.pdf>).
- GE Renewable Energy (2019): Haliade-X 12 MW: Die zurzeit größte und leistungsstärkste Offshore-Windenergieanlage der Welt. (zuletzt abgerufen am 20.02.2019: <https://www.gerenewableenergy.com/de/wind/windenergieanlagen/haliade-x-12mw-offshore#0>).
- Geels F. (2011): The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. In: Environmental Innovation and Societal Transitions 1, 24 – 40.
- Georgescu-Roegen N. (1971): The entropy law and the economic process. Harvard University Press, Harvard.
- Georgescu-Roegen N. (1986): The entropy law and the economic process in retrospect. In: Eastern Economic Journal 7 (1), 3 – 25.
- German Aerospace Center (DLR) (2007) Concentrating solar power for seawater desalination. (zuletzt abgerufen am 08.06.2018: <http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/>

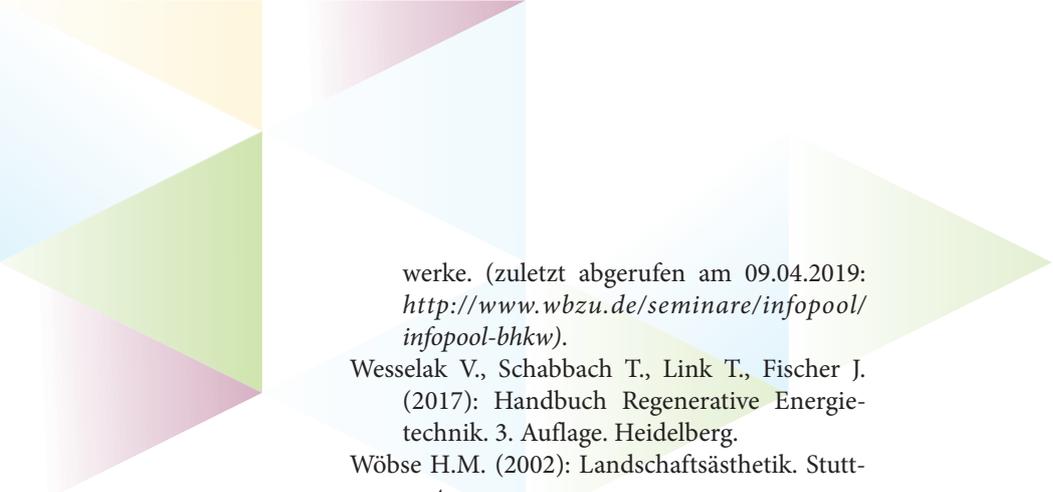
- Resources/dokumente/institut/system/projects/aqua-csp/AQUA-CSP-Full-Report-Final.pdf*).
- Giesecke J., Heimerl S., Mosonyi E. (2014): Wasserkraftanlagen – Planung, Bau und Betrieb. Berlin, Heidelberg.
- Gold R. (2014): Why peak-oil predictions haven't come true. More experts now believe technology will continue to unlock new sources. (zuletzt abgerufen am 08.08.2018: <https://www.wsj.com/articles/why-peak-oil-predictions-haven-t-come-true-1411937788>).
- Graw, K.-U. (2012): Energiereservoir Ozean. In: T. Bührke und R. Wengenmayr (Hrsg.): Erneuerbare Energie. Konzepte für die Energiewende. 3. Aufl., 100 – 106.
- Grossmann W.D., Grossmann I., Steininger K.W. (2013): Distributed solar electricity generation across large geographic areas. Part I: A method to optimize site selection, generation and storage. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 25, 831 – 843.
- Grossmann W.D., Grossmann I., Steininger K.W. (2014): Solar electricity generation across large geographic areas. Part II: A Pan-American energy system based on solar. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 32, 983 – 993.
- Grotz B. (2019): Die Hauptsätze der Wärmelehre. (zuletzt abgerufen am 14.02.2019: <https://www.grund-wissen.de/physik/waermelehre/hauptsatze-der-waermelehre.html>).
- Gugler GmbH (2018): Cradle to Cradle Druckprodukte: Innovation aus Österreich. (zuletzt abgerufen am 25.09.2018: <https://www.gugler.at/print/nachhaltigkeit/cradle-to-cradle-druckprodukte-innovation-aus-oesterreich.html>).
- Hadjipaschalis I., Poullikkas A., Efthimiou V. (2009): Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 1513 – 1522.
- Harper R. (2003): Inside the Smart Home: Ideas, Possibilities and Methods. In: Harper R. [Hrsg.]: Inside the Smart Home. 1 – 13. London.
- Harris J. (2010): Going green to stay in the black: transnational capitalism and renewable energy. In: Race & Class 52 (2), 62 – 78.
- Harris J. (2013): Can Green Capitalism build a sustainable society? In: International Critical Thought 3 (4), 468 – 479.
- Harriss-White B., Harriss E. (2007): Unsustainable capitalism: the politics of renewable energy in the UK. In: Social Register 43, 72 – 101.
- Harvey D. (1996): Justice, nature and the geography of difference. Blackwell Publishers Inc, Malden
- Heinberg R. (2005) The party's over. Oil, war and the fate of industrial societies. New Society Publishers, Gabriola Island.
- Hoffmann K. (2013): Die Gänsebratenspitze gibt es nicht mehr. In: Der Tagesspiegel (zuletzt abgerufen am 08.01.2019: <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/energieverbrauch-an-weihnachten-die-gaensebratenspitze-gibt-es-nicht-mehr/9259672.html>).
- Holstenkamp L. (2018): Einleitende Anmerkungen zum Ländervergleich: Definition von Bürgerenergie, Länderauswahl und Überblick von Fördermechanismen. In: Holstenkamp L., Radtke J. (Hrsg.): Handbuch Energiewende und Partizipation. 897 – 920. Wiesbaden.
- Huber M.T. (2009): Energizing historical materialism: Fossil fuels, space and the capitalist mode of production. In: Geoforum 40 (1), 105 – 115.
- Illing F. (2016): Energiepolitik in Deutschland – die energiepolitischen Maßnahmen der Bundesregierung 1949 – 2015. Baden-Baden.
- International Energy Agency (IEA) (2018): Electricity. (zuletzt abgerufen am 23.08.2018: <http://www.iea.org/topics/electricity/>).
- International Energy Agency (IEA) (2018): World Energy Outlook 2018. Paris.
- Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR) (2019): Windenergie-Markt in Deutschland. (zuletzt abgerufen am 20.02.2019: <https://www.windbranche.de/windenergie-ausbau/deutschland>).
- Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR) (2018): Windparks in Deutschland. (zuletzt abgerufen am 23.08.2018: <https://www.offshore-windindustrie.de/windparks>).
- Jensen S.H., Larsen P.H., Mogensen M. (2007): Hydrogen and synthetic fuel production from renewable energy sources. In: Interna-

- tional Journal of Hydrogen Energy 32 (15), 3253 – 3257.
- Joachim Herz Stiftung (JHS) (2019): LEIFI Physik. (zuletzt abgerufen am 22.02.2019: <https://www.leifiphysik.de/>).
- Johanning R. (2018): Fester Stand im Meer für Windmühlen. Süddeutsche Zeitung, vom 20.09.2018, 27.
- Johnsen B. (2016): “Geh mir aus dem Wind”. In: Durstewitz M., Lange B. [Hrsg.]: Meer – Wind – Strom. Wiesbaden.
- juwi AG (2019): Solarpark Lieberose. (zuletzt abgerufen am 15.01.2019: <https://www.juwi.de/aktuelles/artikel/artikelansicht/solarpark-lieberose/>).
- Kaberger T., Mansson B. (2001): Entropy and economic processes – physics perspectives. In: Ecological Economics 36 (1), 165 – 179.
- Kallis G. (2011): In defence of degrowth. In: Ecological Economics 70 (5), 873 – 880.
- Kallis G., Martinez-Alier J., Norgaard R.B. (2009): Paper assets, real debts: an ecological-economic exploration of the global economic crisis. In: Critical Perspectives on International Business 5 (1 – 2), 14 – 25.
- Kaltschmitt M., Streicher W., Wiese A. (2006): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 4. Aufl., Berlin.
- Karakaya E., Hidalgo A., Nuur C. (2015): Motivators for adoption of photovoltaic systems at grid parity: A case study from Southern Germany. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 43, 1090 – 1098.
- Karle A. (2015): Elektromobilität – Grundlagen und Praxis. München.
- Kenis A., Lievens M. (2016): Greening the economy or economizing the green project? When environmental concerns are turned into a means to save the market. In: Review of Radical Political Economics 48 (2), 217 – 234.
- Kirchhoff T. (2014): Energiewende und Landschaftsästhetik – Versachlichung ästhetischer Bewertungen von Energieanlagen durch Bezugnahme auf drei intersubjektive Landschaftsideale. In: Naturschutz und Landschaftsplanung 46 (1), 10 – 16.
- Kost C., Shammugam S., Jülch V., Nguyen H.-T., Schlegl T. (2018): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Fraunhofer Institut. Freiburg.
- Kraftfahrtbundesamt (KBA) (2018): Verkehr in Zahlen 2017/2018. Hamburg.
- Kranert M., Cord-Landwehr K. (2010): Einführung in die Abfallwirtschaft. Springer, Heidelberg.
- Krewitt W., Schlomann B. (2006): Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern – Gutachten im Rahmen von Beratungsleistungen für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. o.O.
- Kristen Y. (2019): Die Hauptsätze. (zuletzt abgerufen am 14.02.2019: https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nawi.inst.251/Didactics/thermodynamik/INHALT/INHALT.HTM).
- Kühne O., Weber F. (2016): Zur sozialen Akzeptanz der Energiewende. In: UmweltWirtschaftsForum 24 (2 – 3), 207 – 213.
- Kuttler W. (2009): Klimatologie. Paderborn. Landesentwicklungsprogramm Mecklenburg-Vorpommern (LEP MV): LEP. Schwerin. Landesentwicklungsprogramm Niedersachsen (LEP NS): LEP. Hannover. Landesentwicklungsprogramm Schleswig-Holstein (LEP SH): LEP. Kiel.
- Landeszentrale für politische Bildung Baden-Württemberg (LPB BW) (2019): Pariser Klimaschutzkonferenz COP21. (zuletzt abgerufen am 12.02.2019: https://www.lpb-bw.de/pariser_klimaabkommen.html).
- Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH (FIZ) (2004): Seaflow – Strom aus Meeresströmungen. BINE Informationsdienst: Energieforschung für die Praxis. (zuletzt abgerufen am 04.09.2018: <http://www.bine.info/publikationen/publikation/seaflow-strom-aus-meeresstroemungen/>).
- Linke S. (2018): Ästhetik der neuen Energielandschaften – oder: “Was Schönheit ist, das weiß ich nicht”. In: Kühne O., Weber F. (Hrsg.): Bausteine der Energiewende, 409 – 429. Springer VS, Wiesbaden.
- Lutz L., Fischer L., Newig J., Lang D. (2017): Driving factors for the regional implementation of renewable energy – A case study on the German energy transitions. In: Energy Policy 105 (6), 136 – 147.
- Martinez-Alier J. (2012): Environmental justice and economic degrowth: an alliance between two movements. In: Capitalism Nature Socialism 23 (1), 51 – 73.

- Matek B., Gawell K. (2015): The Benefits of Base-load Renewables: A Misunderstood Energy Technology. In: *The Electricity Journal* 28 (2), 101 – 112.
- Mathews J. (2011): Naturalizing capitalism: The next great transformation. In: *Futures* 43 (8), 868 – 879.
- McCarthy J. (2015): A socioecological fix to capitalist crisis and climate change? The possibilities and limits of renewable energy. In: *Environment and Planning A* 47, 2485 – 2502.
- McKenna R., Herbes C., Fichtner W. (2015): Energieautarkie: Definitionen, Für- bzw. Gegenargumente, und entstehende Forschungsbedarfe. In: *Working Paper Series in Production and Energy* 6.
- Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. (2006): Grenzen des Wachstums – Das 30-Jahre-Update. Signal zum Kurswechsel. Hirzel, Stuttgart.
- Mejia-Olivares C.J., Haigh I.D., Wells N.C., Coles D.S., Lewis M.J., Neill S.P. (2018): Tidal-stream energy resource characterization for the Gulf of California, México. In: *Energy* 156, 481 – 491.
- Mossig I., Fornahl D., Schröder H. (2010): Heureka oder Phoenix aus der Asche? Der Entwicklungspfad der Offshore-Windenergieindustrie in Nordwestdeutschland. In: *Zeitschrift für Wirtschaftsgeographie* 54 (3 – 4), 222 – 237.
- Mulhall D., Braungart M. (2010): Cradle to Cradle. Criteria for the built environment. Nunspeet: Duurzaam Gebouwd.
- Murphy D.J., Hall C.A.S. (2011): Energy return on investment, peak oil, and the end of economic growth. In: *Annals of the New York Academy of Sciences* 1219 (1), 52 – 72.
- Musall F., Kuik O. (2011): Local acceptance of renewable energy – A case study from southeast Germany. In: *Energy Policy* 39, 3252 – 3260.
- Naturspeicher GmbH (2018): Aktuelles. Sengethal. (zuletzt abgerufen am 31.07.2018: <https://www.naturspeicher.de/de/aktuelles/aktuelles.php>).
- Naturstromspeicher GmbH (2016): Der Naturstromspeicher – Wir speichern Strom mit Wasser. Ulm.
- Next Kraftwerke GmbH (2019): Was sind Nennleistung, installierte Leistung und Bemessungsleistung? (zuletzt abgerufen am 05.02.2019: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/nennleistung>).
- North P (2010) Eco-localization as a progressive response to peak oil and climate change – a sympathetic critique. In: *Geoforum* 41 (4), 585 – 594.
- Ntoka C. (2013): Offshore Wind Park Siting and Micro-Siting in Patlloi Gulf, Greece. Aalborg.
- Nuklearforum Schweiz (2018): Kernkraftwerke der Welt – Les centrales nucléaires dans le monde. Olten.
- O'Regan B., Grätzel M. (1991): A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. In: *Nature* 353, 737 – 740.
- Oeding D., Oswald B. (2016): Elektrische Kraftwerke und Netze. Berlin.
- Ohlhorst D. (2016): Akteursvielfalt und Bürgerbeteiligung im Kontext der Energiewende in Deutschland – das EEG und seine Reformen. In: Radtke J., Holstenkamp L. (Hrsg.): *Energiewende und Partizipation – Transformationen von Gesellschaft und Technik*. Wiesbaden.
- Ohlhorst D. (2016): Akteursvielfalt und Bürgerbeteiligung im Kontext der Energiewende in Deutschland – das EEG und seine Reformen. In: Radtke J., Holstenkamp L. (Hrsg.): *Energiewende und Partizipation – Transformationen von Gesellschaft und Technik*. Wiesbaden.
- Orkustofnun (2018): Data Repository – Energy Data Iceland (zuletzt abgerufen am 25.11.2018: <https://nea.is/the-national-energy-authority/energy-data/data-repository/>).
- OSPAR (2018): OSPAR's Data & Information Management System. (zuletzt abgerufen am 22.02.2019: <https://odims.ospar.org/>).
- Ostwald W. (1909): *Energetische Grundlagen der Kulturwissenschaft*. Klinkhardt, Leipzig.
- OWC Wave Energy (2019): Wells Turbine Demonstration. (zuletzt abgerufen am 01.03.2019: <https://owcwaveenergy.weebly.com/our-demonstrations.html>).
- Palensky P., Dietrich D. (2011): Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. In: *Transactions on Industrial Informatics* 7 (3), 381 – 388.

- Paschotta G. (2018): Netzparität. (zuletzt abgerufen am 19.02.2019: <https://www.energielexikon.info/netzparitaet.html>).
- Peters J. (2010): Erneuerbare Energien – Flächenbedarfe und Landschaftsauswirkungen. In: Demuth B., Heiland S., Wojtkiewicz W., Wiersbinski N., Finck P. (Hrsg.): Landschaften in Deutschland 2030 – Der große Wandel. Bonn.
- Peyke G., Bosch S., Färber K., Tatu D., Walter K. (2013): Erneuerbare Energien von A bis Z – Geographica Augustana 13. Augsburg.
- Photovoltaik.org (2019): Photovoltaik. (zuletzt abgerufen am 13.02.2019: <https://www.photovoltaik.org/>).
- Polanyi K. (1973): The Great Transformation: Politische und ökonomische Ursprünge von Gesellschaften und Wirtschaftssystemen. Suhrkamp, Berlin.
- Pulczynski J. (1991): Die große Windenergieanlage GROWIAN: Eine Fallstudie. In: Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, 263. Kiel.
- Quaschnig V. (2014): Regenerative Energiesysteme. Technologien, Berechnung, Simulation. Hanser, München.
- Quaschnig V. (2013): Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung – Simulation. 8., aktualisierte und erweiterte Aufl., München.
- Quaschnig V. (2016): Sektorenkopplung durch die Energiewende – Anforderungen an den Ausbau der erneuerbaren Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorenkopplung. Berlin.
- Quaschnig V. (2018a): Statistiken – Energieaufwand zur Herstellung regenerativer Anlagen. (zuletzt abgerufen am 25.11.2018: <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/kev/index.php>).
- Ramchurn S.D., Vytelingum P., Rogers A., Jennings N. (2011): Agent-based control for decentralised demand side management in the smart grid. (zuletzt abgerufen am 07.02.2019: https://eprints.soton.ac.uk/271985/2/___userfiles.soton.ac.uk/Users_nsc_mydesktop_271985ramchurn.pdf).
- Ried J., Braun M., Dabrock P. (2017): Energiewende: Alles eine Frage der Partizipation? Governance-Herausforderungen zwischen Zentralität und Dezentralität. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 41, 203 – 212.
- Rifkin J. (2013): The third industrial revolution. How lateral power is transforming energy, the economy, and the world. Pallgrave Macmillan, New York.
- R.O.E. GmbH (ROE) (2019): Anlagenbetreiber (ANLB). (zuletzt abgerufen am 03.06.2019: <http://www.roe-gmbh.de/anlagenbetreiber.html>).
- Ruprecht A., Weilepp J. (2012): Mond, Erde und Sonne als Antrieb. In: Bührke T., Wengenmayr R. (Hrsg.): Erneuerbare Energie. Konzepte für die Energiewende. 3. Aufl., 95 – 99.
- Rutschmann P. (2012): Licca Liber – Der freie Lech. Donauwörth.
- Santarius T. (2014): Der Rebound-Effekt: ein blinder Fleck der sozial-ökologischen Gesellschaftstransformation. In: Gaia 23 (2), 109 – 117.
- Sarkar S., Kern B. (2008): Ökosozialismus oder Barbarei. Eine zeitgemäße Kapitalismuskritik. (zuletzt abgerufen am 22.05.2018: <https://kritisches-netzwerk.de/forum/oekosozialismus-oder-barbarei-eine-zeitgemae-se-kapitalismuskritik>).
- Schaffarczyk A. (2016): Einführung in die Windenergietechnik. München.
- Schmitt T. (2012): Postfordistische Energiepolitiken? Das Desertec-Konzept als Szenario zur Restrukturierung der Energieversorgung in der EUMENA-Region. In: Zeitschrift für Wirtschaftsgeographie 56 (4), 244 – 263.
- Schneider D., Boenigk N. (2012): Planungsrecht & Erneuerbare Energien. In: Renew's Spezial 62.
- Schumpeter J.A. (1954): History of economic analysis. Oxford University Press, New York.
- Schwartzman D. (2008): The limits to entropy: Continuing misuse of thermodynamics in environmental and Marxist theory. In: Science and Society 72 (1), 43 – 62.
- Schwarzer K., Faber C., Anthrakidis A., Müller C. (2016): Angepasste solarthermische Energien für Entwicklungs- und Schwellenländer – Ein Erfahrungsbericht aus 25 Jahren Projektarbeit des Vereins Solar Global e.V.

- Solarify (2018): 1,1 Milliarden Menschen ohne Zugang zu elektrischer Energie. (zuletzt abgerufen am 08.12.2018: <https://www.solarify.eu/2017/10/22/421-11-milliarden-menschen-ohne-zugang-zu-elektrischer-energie/>).
- Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie Bayern (StMWi Bayern) (2019): Energie-Atlas Bayern. (zuletzt abgerufen am 05.02.2019: <https://geoportal.bayern.de/energieatlas-karten/?wicket-crypt=RykKRp8c3Rw>).
- Sterner M., Stadler I. (2014): Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration. Berlin, Heidelberg.
- TenneT TSO GmbH (2019): Projektportrait – SuedLink. (zuletzt abgerufen am 19.02.2019: <https://www.tennet.eu/de/unser-netz/onshore-projekte-deutschland/suedlink/ueber-suedlink/projektportrait/>).
- TenneT, TransnetBW, ILF Consulting Engineers (2019): SÜEDLINK Planungsbeteiligung. (zuletzt abgerufen am 05.02.2019: <https://gis.ilf.com/K509/synserver?project=K509&client=core&language=de>).
- Umweltbundesamt (2018): Bioenergie. (zuletzt abgerufen am 01.12.2018: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/bioenergie#textpart-1>).
- Umweltbundesamt (2018b): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. (zuletzt abgerufen am 01.12.2018: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-1>).
- Umweltbundesamt (2018c): Erneuerbare Energien – Vermiedene Treibhausgase. (zuletzt abgerufen am 01.12.2018: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/erneuerbare-energien-vermiedene-treibhausgase>).
- Umweltbundesamt (2018d): Erneuerbare Energien in Zahlen. (zuletzt abgerufen am 03.12.2018: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#statusquo>).
- Umweltbundesamt (2018e): Primärenergiegewinnung und -importe. (zuletzt abgerufen am 08.12.2018: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaenergiegewinnung-importe>).
- Umweltbundesamt (2018f): Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). (zuletzt abgerufen am 15.01.2019: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/kraft-waerme-kopplung-kwk#textpart-1>).
- Umweltbundesamt (2019a): Stromerzeugung erneuerbar und konventionell. (zuletzt abgerufen am 08.01.2019: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromerzeugung-erneuerbar-konventionell#textpart-3>).
- Umweltbundesamt Österreich (UBA AT) (2018): Was ist Energie. (zuletzt abgerufen am 08.12.2018: <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/energie/wasistenergie/>).
- UNICEF (2017): 2,1 Milliarden Menschen haben keinen Zugang zu sicherem Trinkwasser. (zuletzt abgerufen am 08.12.2018: <https://www.unicef.ch/de/ueber-unicef/aktuell/medienmitteilungen/2017-07-12/21-milliarden-menschen-haben-keinen-zugang-zu>).
- Van den Bergh J.C.J.M. (2011): Environment versus growth – A criticism of “degrowth” and a plea for “a-growth”. In: Ecological Economics 70 (5), 881 – 890.
- Van d. Horst D. (2007): NIMBY or not? Exploring the relevance of location and the politics of voiced opinions in renewable energy siting controversies. In: Energy Policy 35 (5), 2705 – 2714.
- Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. – Forum Netztechnik/Netzbetrieb (VDE FNN) (2018): Deutsches Höchstspannungsnetz. (zuletzt abgerufen am 22.02.2019: <https://www.vde.com/de/fnn/dokumente/karte-deutsches-hoehchstspannungsnetz>).
- Vezyris C. (2012): Offshore wind farm optimization – Investigation of unconventional & random layouts. Delft.
- Walk H. (2014): Energiegenossenschaften: neue Akteure einer nachhaltigen und demokratischen Energiewende? In: Brunnengräber A., Di Nucci M. (Hrsg.): Im Hürdenlauf zur Energiewende – Von Transformationen, Reformen und Innovationen. 451 – 464. Wiesbaden.
- Weber M. (1922): Gesammelte Aufsätze zur Wissenschaftslehre. JCB Mohr, Tübingen.
- Weiterbildungszentrum für innovative Energietechnologien der Handwerkskammer Ulm (WBZU) (2019): Infopool: Blockheizkraft-

- 
- werke. (zuletzt abgerufen am 09.04.2019: <http://www.wbzu.de/seminare/infopool/infopool-bhkw>).
- Wesselak V., Schabbach T., Link T., Fischer J. (2017): Handbuch Regenerative Energietechnik. 3. Auflage. Heidelberg.
- Wöbse H.M. (2002): Landschaftsästhetik. Stuttgart.
- Wolsink M. (2000): Wind power and the NIMBY-myth: institutional capacity and the limited significance of public support. In: Renewable Energy 21 (1), 49 – 64.
- World Nuclear Association (2019): Nuclear share figures, 2007-2017. (zuletzt abgerufen am 08.01.2019: <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/nuclear-generation-by-country.aspx>).
- Yildiz Ö. (2014): Financing renewable energy infrastructure via financial citizen participation – The case of Germany. In: Renewable Energy, 68 (8), 677 – 685.
- Zahoransky R. (2015): Energietechnik – Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf. 7. Auflage. Wiesbaden.

GEOGRAPHICA AUGUSTANA

Energiegeographie von A bis Z

In Zeiten von Fake News müssen die Universitäten noch mehr darauf bedacht sein, Wissen und Wissensbildung tiefer in die Gesellschaft hineinzutragen. Wissen ist Macht, wie einst Francis Bacon formulierte, und diese Macht kann dazu eingesetzt werden, Klimaskeptikern und Verschwörungstheoretikern kraftvoll entgegenzutreten. Das vorliegende Heft leistet hierzu einen wichtigen Beitrag, werden doch die zentralen Begriffe der Energiewende definiert sowie wesentliche Zusammenhänge im Kontext von Energieforschung erläutert und veranschaulicht.



Herausgeber: Institut für Geographie / Universität Augsburg

ISSN 1862-8680 ISBN 3-948283-01-8