

FVEE-Themen



Energy Research for Future – Forschung für die Herausforderungen der Energiewende

Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2019



Veranstalter

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



FVEE • Themen 2019

Energy Research for Future – Forschung für die Herausforderungen der Energiewende

Jahrestagung 2019

des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien
22. und 23. Oktober 2019

Umweltforum Berlin • Pufendorfstr. 11 • 10249 Berlin

Wissenschaftliche Leitung

Prof. Dr. Hans-Martin Henning • Fraunhofer ISE
Prof. Dr. Joachim Knebel • KIT

Programmkomitee

DBFZ	• Dr. Nora Szarka
DLR	• Dr. Sarina Keller
Fraunhofer IEE	• Prof. Dr. Kurt Rohrig
Fraunhofer ISE	• Prof. Dr. Hans-Martin Henning
	• Dr. Simon Philipps
Fraunhofer IWES	• Prof. Dr. Jan Wenske
GFZ	• Daniel Acksel
	• Prof. Dr. Ernst Huenges
HZB	• Dr. Klaus Jäger
	• Prof. Dr. Rutger Schlatmann
ISFH	• Dr. Bianca Lim
IZES gGmbH	• Juri Horst
FZ Jülich	• Prof. Dr. Harald Bolt
	• Dr. Stefan Haas
KIT	• Prof. Dr. Joachim Knebel
	• Prof. Dr. Thomas Wetzel
UFZ	• Prof. Dr. Bruno Bühler
Wuppertal Institut	• Prof. Dr. Manfred Fishedick
ZAE Bayern	• Dr. Hans-Peter Ebert
ZSW	• Maike Schmidt



Veranstalter

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

■ Einführung

5 Energy Research for Future – Forschung für die Herausforderungen der Energiewende

Prof. Dr. Hans-Martin Henning • Fraunhofer ISE

Prof. Dr. Joachim Knebel • KIT

■ Zentrale Herausforderungen und Chancen der Energiesystemtransformation

6 Globale und nationale Herausforderungen bei der Umsetzung der Energiesystemtransformation

Dr. Sascha Samadi • Wuppertal Institut

Prof. Dr. Manfred Fischedick • Wuppertal Institut

11 Transdisziplinäre Ansätze zur Erforschung gesellschaftlicher Akzeptanz

Dr. Christine Rösch • KIT

Dr. Sebastian Gözl • Fraunhofer ISE

■ Lösungsbeiträge zur Energiesystemtransformation

15 Der Stromsektor als Rückgrat der zukünftigen Energieversorgung

Dr. Diana Böttger • Fraunhofer IEE

Prof. Dr. Christof Wittwer • Fraunhofer ISE

19 Die Verkehrswende erreichen: vermeiden, verlagern, verbessern

Dr. Martin Robinius • FZ Jülich

24 Lösungspfade aus der Systemforschung – Pfade für das Gesamtsystem und Modellierungsansätze

Dr. Sonja Simon • DLR

28 Wärmebereitstellung in Privathaushalten – Lösungen für eine CO₂-freie Energiebereitstellung

Bernhard Wern • IZES

33 Was leisten Forschungsinfrastrukturen als Inkubator für die Energiewende?

Prof. Dr. Joachim Knebel • KIT

■ Aktuelle Forschungsfragen

- 37 Integrierte Photovoltaik – Aktive Flächen für die Energiewende**
Dr. Harry Wirth • Fraunhofer ISE
- 42 Tandemsolarzellen mit Perowskiten – Die neuen Stars der Photovoltaik**
Prof. Dr. Christiane Becker • HZB
- 47 Wege zur Industrialisierung von c-Si/Perowskit-Tandemsolarzellen**
Dr. Bianca Lim • ISFH
- 51 Windenergie vom Anfang bis zum Ende gedacht**
Dr. Sarina Keller • DLR
- 56 Bioenergie – intelligenter Baustein für ein nachhaltiges Energiesystem**
Dr. Nora Szarka • DBFZ
Martin Dotzauer • DBFZ

■ Energiespeicherung und -wandlung

- 61 Herausforderungen und Perspektiven bei Lithium-Ionen-Batterien**
Dr. Nina Kevlishvili • Fraunhofer ISE
- 67 Breitbandnetzausbau & Wärmewende:
Synergien für die geothermische Exploration urbaner Räume**
Dr. Sven Fuchs • GFZ
- 70 Thermische Energiespeicher für Elektrizitätserzeugung und industrielle Anwendungen**
Dr. Andreas Hauer • ZAE
- 74 Chemische Energiespeicher als Wegbereiter zur Treibhausgasneutralität –
Herausforderungen und Chancen**
Dr. Heidi U. Heinrichs • FZ Jülich

■ Effiziente Energieverteilung und Nutzung

- 82 Flexibilisierungspotenziale in der Industrie**
Dennis Bauer • Fraunhofer IPA / Universität Stuttgart
- 87 Potenziale im Gebäudesektor für effiziente Energieverwendung**
Dr. Bastian Büttner • ZAE

Einführung

Energy Research for Future – Forschung für die Herausforderungen der Energiewende

Die schleppende Umsetzung der Energiewende verursacht eine deutliche Klimaschutzlücke, so dass der Handlungsdruck für die Entwicklung und den Aufbau eines klimaneutralen Energiesystems weiter steigt. Die bisher formulierten Maßnahmen der Bundesregierung reichen nicht aus, um einen adäquaten nationalen Beitrag für die Klimabeschlüsse von Paris zu leisten. Auch der Fortschrittsbericht 2019 des Bundeswirtschaftsministeriums zeigt auf vielen Ebenen eine Zielverfehlung.

Daher diskutierte der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien auf seiner Jahrestagung, wo die zentralen technologischen und sozio-ökonomischen Herausforderungen liegen und was die Energieforschung beitragen kann, um die Transformationsgeschwindigkeit deutlich zu erhöhen.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zeigen in den hier gesammelten Vorträgen, welche Schritte notwendig sind, um neben der Stromversorgung auch die Sektoren Mobilität sowie Wärme-/Kälteversorgung für Gebäude und Industrie auf nachhaltige Technologien umzustellen. Dabei wurden auch die Chancen der Digitalisierung und Akzeptanzfragen in der Bevölkerung thematisiert.

Der vorliegende Tagungsband fasst die Ergebnisse der Konferenz zusammen.

Dank

Wir danken allen Autorinnen und Autoren für ihre Beiträge und dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft für die Förderung der Tagung.



*Prof. Dr.
Hans-Martin Henning*
Wissenschaftliche Tagungsleitung
Fraunhofer ISE
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de



Prof. Dr. Joachim Knebel
Wissenschaftliche Tagungsleitung
KIT
joachim.knebel@kit.edu

Globale und nationale Herausforderungen bei der Umsetzung der Energiesystemtransformation



Wuppertal Institut
Dr. Sascha Samadi
sascha.samadi@wupperinst.org



Wuppertal Institut
Prof. Dr. Manfred Fischedick
manfred.fischedick@wupperinst.org

DLR
Dr. Thomas Pregger
thomas.pregger@dlr.de

Dr. Thomas Vogt
t.vogt@dlr.de

Fraunhofer ISE
Prof. Dr. Hans-Martin Henning
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer IEE
Prof. Dr. Clemens Hoffmann
clemens.hoffmann@iee.fraunhofer.de

Prof. Dr. Kurt Rohrig
kurt.rohrig@iee.fraunhofer.de

IZES
Juri Horst
horst@izes.de

Eva Hauser
hauser@izes.de

KIT
Prof. Dr. Veit Hagenmeyer
veit.hagenmeyer@kit.edu

Dr. Witold-Roger Pogonietz
pogonietz@kit.edu

Steigender globaler Handlungsdruck

Die Erkenntnisse der Klimaforschung sind eindeutig: Um das im Pariser Klimaabkommen vereinbarte Ziel der Begrenzung der Erderwärmung auf „deutlich unter 2°C“ noch einhalten zu können, müssen die globalen Treibhausgasemissionen umgehend ihren Scheitelpunkt erreichen und anschließend kontinuierlich und steil zurückgehen (UNEP 2019, Figueres et al. 2017). Dies gilt umso mehr für die ebenfalls im Pariser Klimaabkommen vereinbarte Absicht, die Erwärmung möglichst sogar unter 1,5 °C zu halten. Durch eine entsprechende Begrenzung der Erderwärmung kann nach aktuellem Wissensstand die Gefahr des Auslösens gefährlicher Kippunkte (Lenton et al. 2019) und einer sich selbst verstärkenden Erwärmung (Steffen et al. 2018) deutlich vermindert werden.

Bisher jedoch steigen die globalen Treibhausgasemissionen weiter (► *Abbildung 1*). Zwischen 1990 und 2017 sind sie im Durchschnitt um jährlich 1,5% gestiegen (PBL 2018, Friedlingstein et al. 2019), von 2017 bis 2018 nach ersten Schätzungen sogar um 2% (UNEP 2019). Auch bei ausschließlicher Betrachtung der CO₂-Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger im Energiesystem und der Industrie zeigt sich in den letzten Jahren ein weiterer Anstieg. Diese CO₂-Emissionen machen mit rund zwei Dritteln den größten Teil der globalen Treibhausgasemissionen aus. Nach Berechnungen der UNEP (2019) müssten die globalen Treibhausgasemissionen zwischen 2020 und 2030 um durchschnittlich 2,7% pro Jahr sinken, um die Erderwärmung wahrscheinlich unter 2°C zu halten, und sogar um 7,6% pro Jahr, um wahrscheinlich eine Begrenzung unter 1,5 °C erreichen zu können.

Sowohl vielversprechende als auch ernüchternde Entwicklungen zu beobachten

In den vergangenen Monaten und Jahren hat es hinsichtlich der Perspektiven für den dringend benötigten Trendwechsel im internationalen Klimaschutz weltweit sowohl vielversprechende als auch ernüchternde Entwicklungen gegeben.

Vielversprechend waren und sind unter anderem die folgenden Entwicklungen:

- Das Bewusstsein um die Gefahren des Klimawandels und die Notwendigkeit von ambitioniertem Klimaschutz hat in vielen Gesellschaften der Welt in den letzten Jahren zugenommen (siehe u.a. Europäische Kommission 2019, Leiserowitz et al. 2018). Insbesondere die junge Generation fordert zum Beispiel im Rahmen der „Fridays for Future“-Bewegung ein deutlich entschiedeneres politisches Handeln beim Klimaschutz.
- Einige große Unternehmen haben in den vergangenen Monaten Strategien formuliert, wie und bis wann sie Klimaneutralität erreichen wollen (siehe u.a. thyssenkrupp 2019, Daimler 2019, Bosch 2019).
- In den vergangenen Jahren haben Dutzende global agierende Banken und Versicherer eine immer restriktivere Politik rund um Kohlekraftwerke und Kohleförderung betrieben (siehe u.a. Norges Bank 2016, Allianz 2018, Munich Re 2018).
- In den letzten Jahren haben mehrere europäische Länder jeweils für sich konkrete Zeitpunkte zum Erreichen von Klimaneutralität gesetzlich festgelegt (Darby 2019). So soll Norwegen dieses Ziel bereits bis 2030 erreichen, Schweden bis 2045 und Frankreich und Großbritannien bis 2050. Ebenfalls haben viele europäische Länder den Ausstieg aus der Kohleverstromung bis spätestens 2030 angekündigt (u.a. Frankreich, Großbritannien, Niederlande) (Europe Beyond Coal 2019) und mehrere Länder haben sich für ein Verbot des Verkaufs von Autos mit Benzin- oder Dieselmotoren bis ebenfalls spätestens 2030 ausgesprochen (Hampel 2019).
- Im Dezember 2019 hat die neue EU-Kommission ihren „European Green Deal“ vorgestellt und darin das Ziel formuliert, die EU bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu machen. Zudem werden zentrale Strategien und Maßnahmen zur Zielerreichung dargestellt und die baldige Vorlage eines Klimaschutzgesetzes angekündigt. Auf dem Treffen des Europäischen Rats im gleichen Monat haben die Staats- und Regierungschefs der EU – zunächst noch mit Ausnahme Polens – ihre Unterstützung für das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 bekundet
- Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien hat in den letzten Jahren ihren langfristigen Trend der deutlichen Kostensenkung weiter fortgesetzt und stellt mittlerweile in vielen Regionen die günstigste Art der Stromerzeugung dar (IRENA 2019).

Gleichzeitig gibt es eine Reihe gegenläufiger Entwicklungen, die globalem Klimaschutz entgegenwirken:

- Die USA, als derzeit zweitgrößte Emittenten von Treibhausgasemissionen, haben ihren Ausstieg aus dem Pariser Klimaschutzabkommen eingeleitet (DW 2019).
- In zentralen Schwellenländern (z.B. in China und Indien) findet nach wie vor ein deutlicher Zubau von Kohlekraftwerken statt, wenn auch langsamer als noch vor einigen Jahren erwartet (Shearer et al. 2019).
- Der globale Flugverkehr erfährt weiterhin starke Wachstumsraten (ICAO 2018) und seine Klimawirkung wird nach wie vor nicht oder nur unzureichend eingepreist (Bannon 2018).
- Weltweit findet nach wie vor eine Subventionierung fossiler Energieträger statt, die in den letzten Jahren nicht umfassend reduziert werden konnte (Coady et al. 2019).

Unzureichende Fortschritte in Deutschland

In Deutschland hat das Thema „Klimaschutz“ seit etwa 2018 im öffentlichen Diskurs wieder eine deutlich prominentere Rolle eingenommen. Dies hängt sicherlich unter anderem mit den zwei ungewöhnlich trockenen Jahren 2018 und 2019 zusammen (DWD 2019), aber auch mit der in Deutschland besonders stark mobilisierenden „Fridays for Future“-Bewegung. Diese Bewegung wiederum erhält in Deutschland auch deshalb Zulauf, weil es in den letzten Jahren immer deutlicher wurde, dass Deutschland sein selbst gestecktes THG-Minderungsziel für das Jahr 2020 (Minderung um 40% gegenüber 1990) voraussichtlich deutlich

verfehlen wird (BMU 2019). Zudem drohen Deutschland zusätzliche Kosten in zweistelliger Milliardenhöhe (Agora Energiewende/Agora Verkehrswende 2018), da nach aktuellen Projektionen das auf EU-Ebene vereinbarte Minderungsziel in den nicht-ETS-Sektoren für die Periode 2021 bis 2030 sehr wahrscheinlich verfehlt wird.

Diese (absehbaren) Zielverfehlungen sind Folge der unzureichenden Fortschritte bei der Umsetzung der Energiewende. Die „Stellungnahme zum zweiten Fortschrittsbericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2017“ der Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ (Löschel et al. 2019) hat diesen mangelnden Fortschritt zuletzt noch einmal deutlich aufgezeigt. Auf Grundlage der bisherigen Entwicklungen schätzen die Experten nicht nur die Erfüllung des 2020-Minderungsziels bei den Treibhausgasemissionen als „unwahrscheinlich“ ein, sondern auch die 2020-Ziele zur Reduktion des Primärenergieverbrauchs und zum Ausbau der Übertragungsnetze. Wie weit die Maßnahmen des im Herbst 2019 beschlossenen „Klimapakets“ Deutschland in den nächsten Jahren näher in Richtung der Erfüllung der mittel- bis langfristigen Energiewende-Ziele bringen werden, soll eine von der Bundesregierung in Auftrag gegebene wissenschaftliche Untersuchung ergeben, die Anfang 2020 vorliegen soll. In diesem Zusammenhang sollte nicht unerwähnt bleiben, dass die derzeitigen THG-Minderungsziele der Bundesregierung offenbar nicht ausreichend ambitioniert sind, um einen angemessenen Beitrag Deutschlands zum Erreichen des im Pariser Klimaschutzabkommen formulierten 1,5-Grad-Ziels zu beschreiben (Höhne et al. 2019, du Pont et al. 2017). Bei dem Ziel der Erhöhung des Anteils Erneuerbarer am Bruttoendenergieverbrauch befindet sich Deutschland der Analyse von Löschel et al. (2019) zufolge

Jülich

Dr. Martin Robinius
m.robinius@fz-juelich.de

UFZ

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

Martin Rojas Arboleda
martin.rojas@ufz.de

ZSW

Maike Schmidt
maike.schmidt@zsw-bw.de

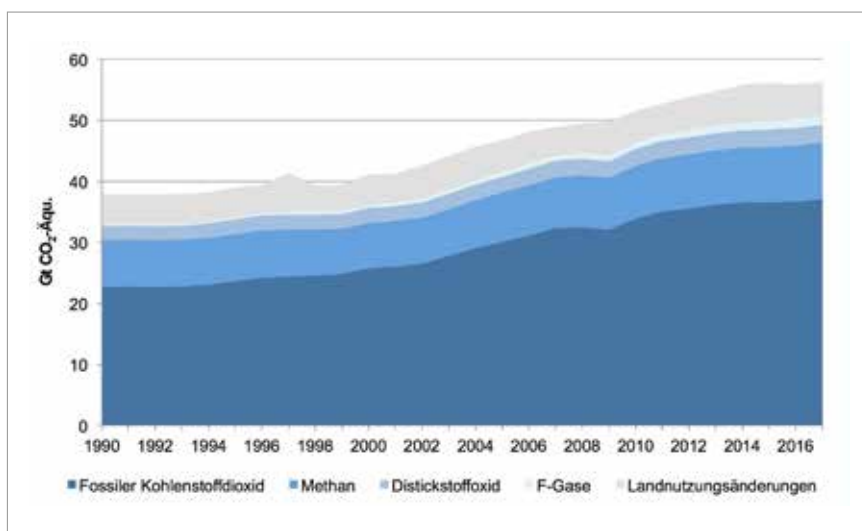


Abbildung 1
Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen von 1990 bis 2017
 (in CO₂-Äquivalent mit einem Treibhauspotenzial von 100 Jahren).
 Datenquellen: PBL (2018) und Friedlingstein et al. (2019, für Emissionen der Landnutzungsänderungen).

zwar „wahrscheinlich“ noch auf einem Zielerfüllungspfad, die aktuellen Zubauzahlen bei der Onshore-Windenergie (Fachagentur Windenergie an Land 2019) lassen aber befürchten, dass ein ausreichender weiterer Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsystem in den kommenden Jahren möglicherweise nicht stattfinden wird.

Deutliche Fortschritte in verschiedenen Handlungsfeldern nötig

Ein Vergleich der bisherigen Fortschritte bei der Realisierung der Energiewende in Deutschland mit den in vorliegenden Klimaschutzszenarien (z.B. BDI 2018, dena 2018, UBA 2019) beschriebenen Entwicklungen der nächsten Jahre und Jahrzehnte führt zu der Erkenntnis, dass in verschiedenen Handlungsfeldern (weiterhin) dringender Handlungsbedarf besteht, um die Energiewende mindestens in der von der Bundesregierung derzeit geplanten Geschwindigkeit erfolgreich umsetzen zu können. Zu diesen Handlungsfeldern gehören unter anderem die folgenden:

• Stromwende energisch fortsetzen:

Der Ausbau der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung muss fortgesetzt und gegenüber den letzten Jahren noch beschleunigt werden (► **Abbildung 2** in Hinblick auf Onshore-Windenergie und Photovoltaik), auch weil CO₂-frei erzeugter Strom in bedeutenden Mengen für Klimaschutz im Verkehrssektor, bei der Raumwärmebereitstellung und für Industrieprozesse benötigt wird. Ein entsprechender Ausbau der erneuerbaren Energien muss einhergehen mit einem zügigen Ausstieg aus der besonders CO₂-intensiven Kohle-Verstromung, flankiert durch Maßnahmen zur Vermeidung strukturpolitischer und sozialer Verwerfungen.

• Umfassende Mobilitätswende einleiten:

Die bisherige Fokussierung auf Elektromobilität bei der Diskussion in Gesellschaft und Politik um eine Mobilitätswende greift zu kurz. Neben der Förderung der Elektromobilität sind weitere Maßnahmen notwendig, um den Verkehrssektor bis spätestens Mitte des Jahrhunderts klimaneutral gestalten zu können. Unter anderem bestehen erhebliche Klimaschutzpotenziale durch Verkehrsvermeidung und -verlagerung (UBA 2019). So sollten beispielsweise die Attraktivität des öffentlichen Personenverkehrs sowie auch der Fuß- und Radverkehr gestärkt werden. Da zudem voraussichtlich auch langfristig bestimmte Verkehre nicht direkt mit Strom betrieben werden können (v.a. der Schwerlastverkehr und der Schiffs- und Flugverkehr), sollte gleichzeitig an der Erforschung und Einführung alternativer Kraftstoffe gearbeitet werden.

• Umsetzungsdefizit bei der Wärmewende überwinden:

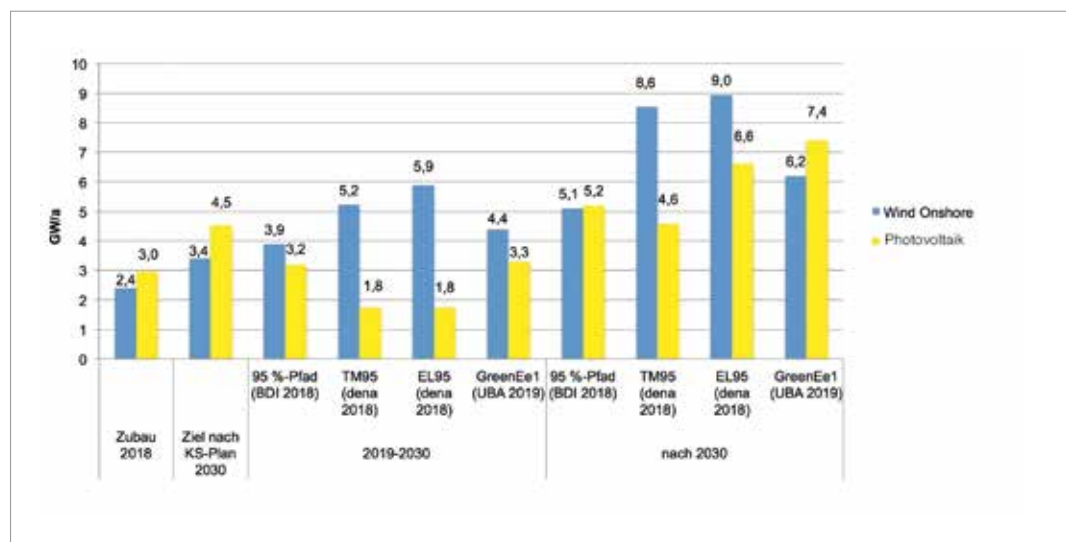
Vorliegende Klimaschutzszenarien gehen durchgängig davon aus, dass die energetischen Sanierungsraten des deutschen Gebäudebestands in den kommenden Jahren und Jahrzehnten deutlich erhöht werden müssen, von derzeit geschätzten rund 1% pro Jahr (Cischinsky/Diefenbach 2018) auf mindestens rund 2% und bis zu 3%. Neben einer so erreichbaren deutlichen Minderung des Energiebedarfs für Raumwärme können zudem gut durchdachte Versorgungskonzepte u.a. für Quartiere sowohl die Nutzung erneuerbarer Energien als auch die Nutzung von Abwärmequellen maximieren. Insbesondere in diesem Bereich der (Raum-) Wärmewende liegen die notwendigen Technologien und Konzepte grundsätzlich vor. Es bedarf in den nächsten Jahren endlich einer Überwindung des lange bestehenden Umsetzungsdefizits.

Abbildung 2:

Jährlicher Bruttozubau von Onshore-Windenergieanlagen und Photovoltaikanlagen (in GW):

- tatsächlicher Zubau 2018
- derzeitige Ausbauziele der Bundesregierung
- laut verschiedenen Klimaschutzszenarien notwendiger durchschnittlicher jährlicher Bruttozubau (bis bzw. nach 2030)

Datenquellen: Bundesregierung (2019), UBA (2019) und eigene Berechnungen auf Grundlage von BDI (2018) und dena (2018) sowie angenommenen technischen Lebensdauern von 20 (Windenergieanlagen) beziehungsweise 25 Jahren (Photovoltaikanlagen)



• Bedingungen für weitgehende Elektrifizierung schaffen:

Der Anteil von Strom am gesamten Endenergieverbrauch steigt vorliegenden Szenarien zufolge von 21% im Jahr 2018 (AG Energiebilanzen 2019) auf mindestens 34% und bis zu 63% im Jahr 2050 in einem CO₂-neutralen Energiesystem (► *Tabelle 1*). Zusätzlich wird in diesen Szenarien eine inländische elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff unterstellt, welcher dann in den Endenergiesektoren und/oder im Umwandlungssektor Verwendung findet. Um diese direkte und indirekte Elektrifizierung realisieren zu können, bedarf es einer stärkeren Kopplung des Stromsystems mit dem Verkehr und dem Raum- sowie Prozesswärmeverbrauch. Hierfür sind neben neuen Technologien (z.B. Elektrolyseure, Elektroautos, Wärmepumpen) und Infrastrukturen (z.B. Wasserstoffspeicher und -pipelines) auch neue Rahmenbedingungen notwendig, die eine baldige Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen zur Sektorenkopplung unterstützen.

Zentrale Baustellen für die Energieforschung

Die Energieforschung kann durch die Weiterentwicklung von Technologien, das Aufzeigen von Lösungsoptionen und die Erforschung von Potenzialen zur Überwindung bestehender Hindernisse wichtige Beiträge zur notwendigen Beschleunigung der Energiewende liefern. Konkret sind für die Unterstützung einer solchen Beschleunigung Fortschritte in den folgenden Feldern der Energieforschung von hoher Relevanz:

- Weiterentwicklung der Technologien für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Zu den wichtigen Zielen gehören dabei eine weitere Kostensenkung, längere Lebensdauern sowie das Erreichen geschlossener Wertstoffkreisläufe.
- Weiterentwicklung des Energie- und Strommarktdesigns, um optimale Bedingungen für fluktuierende erneuerbare Energien als zentrale Säule zu schaffen
- Weiterentwicklung von Technologien für die Sektorenkopplung, Netze und Speicher sowie Maßnahmen zur Flexibilisierung der Nachfrage
- Weiterentwicklung neuartiger Technologien und Prozesse für eine THG-neutrale energieintensive Industrie und Gestaltung einer Kreislaufwirtschaft

- Digitalisierung als Schlüsseltechnologie für das intelligente Management des zukünftigen Energiesystems
- Überwindung des NIMBY-Effektes und Lösen von Zielkonflikten mit dem Naturschutz

In dem vorliegenden Tagungsband werden viele aktuelle Forschungsprojekte vorgestellt, die unser Verständnis dieser zentralen Forschungsfelder verbessern.

Quellen:

- AG Energiebilanzen (2019): Auswertungstabellen, <https://ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>
- Agora Energiewende/Agora Verkehrswende (2018): Die Kosten von unterlassenem Klimaschutz für den Bundeshaushalt – Die Klimaschutzverpflichtungen Deutschlands bei Verkehr, Gebäuden und Landwirtschaft nach der EU-E ort-Sharing-Entscheidung und der EU-Climate- Action-Verordnung, https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Non-ETS/142_Nicht-ETS-Papier_WEB.pdf
- Allianz (2018): Allianz treibt den Wandel zur kohlenstoffarmen Wirtschaft mit ambitioniertem Klimaschutzpaket voran, <https://www.allianz.com/de/presse/news/geschaeftsfelder/versicherung/180504-klimaschutz-wandel-zur-kohlenstoffarmen-wirtschaft.html>
- Bannon, E. (2018): Aviation: 2 to 3 times more damaging to the climate than industry claims, <https://www.transportenvironment.org/news/aviation-2-3-times-more-damaging-climate-industry-claims>
- BDI – Bundesverband der Deutschen Industrie (2018): Klimapfade für Deutschland, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2019): Projektionsbericht 2019 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013, https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/projections/envxnw7wq/Projektionsbericht-der-Bundesregierung-2019.pdf
- Bosch (2019): Klimaschutz: Bosch ab 2020 weltweit CO₂-neutral, <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/klimaschutz-bosch-ab-2020-weltweit-co2-neutral-188800.html>
- Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>
- Cischinsky, H./Diefenbach, N. (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 – Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und

Tabelle 1:
Stromanteil am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2018 und nach verschiedenen Szenarien im Jahr 2050
Datenquellen: AG Energiebilanzen (2019), BDI (2018), dena (2018) und UBA (2019).

2018	2050			
Statistik	95%-Pfad (BDI 2018)	EL95 (dena 2018)	TM95 (dena 2018)	GreenEe1 (UBA 2019)
21%	34%	63%	35%	51%

- hessischen Wohngebäudebestand, https://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/gebäudebestand/prj/Endbericht_Datenerhebung_Wohngeb%C3%A4udebestand_2016.pdf
- Coady, D.; Parry, I; Le, N.-P., Shang, B. (2019): Global Fossil Fuel Subsidies Remain Large: An Update Based on Country-Level Estimates, IMF Working Paper, <https://www.imf.org/~media/Files/Publications/WP/2019/WPIEA2019089.ashx>
 - Daimler (2019): „Ambition2039“: Unser Weg zu nachhaltiger Mobilität, <https://www.daimler.com/investoren/berichte-news/finanznachrichten/20190513-ambition-2039.html>
 - Darby, M. (2019): Which countries have a net zero carbon goal?, <https://www.climatechangenews.com/2019/06/14/countries-net-zero-climate-goal/>
 - dena – Deutsche Energie-Agentur (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende – Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf
 - du Pont, Y. R., Jeffery, M. L., Gütschow, J., Rogelij, J., Christoff, P., Meinshausen, M. (2017): Equitable mitigation to achieve the Paris Agreement goals, in: Nature Climate Change 7, 38-43.
 - DW – Deutsche Welle (2019): US begins withdrawal from Paris climate accord, <https://p.dw.com/p/3SSqx>
 - DWD – Deutscher Wetterdienst (2019): Trockenheit – Die Schattenseite des Hochdruckwetters, https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2019/9/20.html
 - Europäische Kommission (2019): Special Eurobarometer 490, April 2019, “Climate Change”, <https://ec.europa.eu/commfrontoffice/publicopinion/index.cfm/ResultDoc/download/DocumentKy/87643>
 - Europe Beyond Coal (2019): Overview: National coal phase-out announcements in Europe, Status – October 2019, <https://beyond-coal.eu/wp-content/uploads/2019/10/Overview-of-national-coal-phase-out-announcements-October-2019.pdf>
 - Fachagentur Windenergie an Land (2019): Ausbausituation der Windenergie an Land im Herbst 2019 – Auswertung windenergiespezifischer Daten im Marktstammdatenregister für den Zeitraum Januar bis September 2019, https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Analysen/FA_Wind_Zubauanalyse_Wind-an-Land_Herbst_2019.pdf
 - Figueres, C.; Schellnhuber, H. J., Whiteman, G., Rockström, J., Hobley, A., Rahmstorf, S. (2017): Three years to safeguard our climate, in: Nature 546, 593-595.
 - Friedlingstein, P., Jones, M. W., O’Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J. et al. (2019): Global Carbon Budget 2019, in: Earth System Science Data 11, 1783-1838.
 - Hampel, C. (2019): Sweden to ban sales of fossil-fuel powered cars by 2030, <https://www.electrive.com/2019/01/22/sweden-joins-nations-dropping-combustion-engines-target-2030/>
 - Höhne, N., Emmrich, J., Fekete, H., Kuramochi, T. (2019): 1,5°C: Was Deutschland tun muss, https://newclimate.org/wp-content/uploads/2019/03/Deutschland_1.5_Web.pdf
 - ICAO – International Civil Aviation Organization (2018): Solid passenger traffic growth and moderate air cargo demand in 2018, <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/Solid-passenger-traffic-growth-and-moderate-air-cargo-demand-in-2018.aspx>
 - IRENA – International Renewable Energy Agency (2019): Renewable Power Generation Costs in 2018, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf
 - Leiserowitz, A., Maibach, E., Rosenthal, S., Kotcher, J., Ballew, M., Goldberg, M., Gustafson, A. (2018): Climate change in the American mind: December 2018. Yale University and George Mason University. New Haven, CT: Yale Program on Climate Change Communication.
 - Lenton, T. M., Rockström, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W., Schellnhuber, H. J. (2019): Climate tipping points – too risky to bet against – The growing threat of abrupt and irreversible climate changes must compel political and economic action on emissions, in: Nature 575, 592-595.
 - Löschel, A., Erdmann, G., Staiß, F., Ziesing, H.-J. (2019): Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ – Stellungnahme zum zweiten Fortschrittsbericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2017, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/ewk-stellungnahme.pdf?blob=publicationFile&v=4>
 - Munich RE (2018): Munich Re erklärt Klimastrategie und Umgang mit dem Kohle-Sektor, <https://www.munichre.com/de/unternehmen/corporate-responsibility/news/2018/2018-11-29-news.html>
 - Norges Bank (2016): Exclusion of coal companies from the fund, <https://www.nbim.no/en/the-fund/news-list/2016/exclusion-of-coal-companies-from-the-fund/>
 - Olivier, J. G. J., Peters, J. A. H. W. (2018): Trends in Global CO2 and Total Greenhouse Gas Emissions, https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2018-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2018-report_3125_0.pdf
 - Shearer, C., Yu, A., Nace, T. (2019): Out of Step – China is Driving the Continued Growth of the Global Coal Fleet, <https://endcoal.org/wp-content/uploads/2019/11/Out-of-Step-English-final.pdf>
 - Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C. P., Barnosky, A., et al. (2018): Trajectories of the Earth System in the Anthropocene, in: PNAS 115 (33), 8252-8259.
 - thyssenkrupp (2019): thyssenkrupp gibt sich klare Ziele: Konzern will bis 2050 klimaneutral sein – für 2030 bereits 30 Prozent weniger Emissionen geplant, <https://www.thyssenkrupp.com/de/newsroom/pressemeldungen/thyssenkrupp-gibt-sich-klare-ziele--konzern-will-bis-2050-klimaneutral-sein---fuer-2030-bereits-30-prozent-weniger-emissionen-geplant-12803.html>
 - UBA – Umweltbundesamt (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE-Studie, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf
 - UNEP – United Nations Environmental Programme (2019): Emissions Gap Report 2019, <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30797/EGR2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Transdisziplinäre Ansätze zur Erforschung gesellschaftlicher Akzeptanz

Das Ziel der Pariser Klimaschutzkonferenz 2015, die Erderwärmung auf unter 2°C zu begrenzen, kann nur erreicht werden, wenn die Energiewende rasch umgesetzt und die Ziele (Abschaltung der Kohlekraftwerke bis 2038 und Klimaneutralität bis 2050) konsequent verfolgt werden. Modell- und Szenarienberechnungen kommen zu dem Schluss, dass eine vollständige Energiewende nicht nur technisch machbar und möglich ist, sondern langfristig auch betriebswirtschaftlich rentabel sein kann (Ram et al. 2019).

Aktuelle Meinsumfragen und Jugendbewegungen wie Fridays for Future zeigen, dass der Ausbau der erneuerbaren Energiegewinnung generell breite Zustimmung in allen Bevölkerungsschichten findet (Rinscheid & Wüstenhagen 2019). Dennoch stockt der Ausbau der erneuerbaren Energieversorgung, wenn es darum geht, geeignete Standorte für den Bau von Anlagen für die Nutzung von Windkraft, Solarenergie oder Geothermie zu finden und konkrete Projekte zu realisieren, auch wenn sie auf planungsrechtlich oder kommunalpolitisch korrekte Weise zustande gekommen sind.

Die Gründe für das Auseinanderklaffen zwischen abstrakter und konkreter gesellschaftlicher Akzeptanz sind im Wesentlichen Befürchtungen über mögliche finanzielle, gesundheitliche, ökologische oder ästhetische Nachteile, die entscheidend mit lokalen Veränderungen der Umwelt, insbesondere der Flächennutzung und des Landschaftsbildes einhergehen. Ein Blick auf gesellschaftlich kontrovers diskutierte technische Pfade zur Substitution fossiler Energieträger und Verringerung des Ausstoßes klimaschädlicher Gase, wie die Abscheidung und unterirdische Speicherung von CO₂ aus fossil betriebenen Kraftwerken (CCS-Technologie) oder die Einführung von Biokraftstoffen (E10) zeigt, dass eine Änderung des Energiesystems gegen den Widerstand großer Bevölkerungsteile nicht möglich ist, denn die Energiewende ist eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Um die Gründe für die Ablehnung oder Akzeptanz besser zu verstehen, die Konfliktlinien zu identifizieren, die Gelingensbedingungen zu analysieren und praxisnahe Lösungsvorschläge zu erarbeiten, bedarf es sowohl eines verstärkten und verstetigten gesellschaftlichen Diskurses als auch transdisziplinärer Forschung.

Was ist transdisziplinäre Forschung?

Transdisziplinäre Forschung greift gesellschaftliche Probleme und wissenschaftliche Fragestellungen auf und bearbeitet diese mit einem Team aus Ingenieur- und Sozialwissenschaftler*innen und Akteur*innen außerhalb der Wissenschaft (Stakeholder, Bürger) (WBGU 2011). Durch die Zusammenführung unterschiedlicher gesellschaftlicher Wissensbestände und Perspektiven wird praxisnahes und handlungsorientierte Wissen erzeugt und können Transformationsprozesse beschleunigt werden. Im Vordergrund steht hierbei die inter- und transdisziplinäre Wissensproduktion in einem experimentellen Umfeld zur Bereitstellung von Antworten und Lösungen für gesellschaftliche relevante Zukunftsfragen. Im Kern ist dieser Forschungstyp darauf ausgelegt, die Wissensbestände, Perspektiven und Präferenzen der Akteure zu erfassen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Einschätzungen zu Technologien und Transformationspfaden zu analysieren und mögliche Diskrepanzen in der Wahrnehmung und Bewertung oder gar Konfliktlinien frühzeitig zu erkennen.

Welche Forschungsfragen eignen sich für transdisziplinäre Forschung?

Transdisziplinäre Forschung ist nicht auf alle Forschungsfragen anwendbar, denn sie ist voraussetzungsvoll. Das Forschungsthema muss eine lebensweltliche Problemorientierung adressieren und die Forschungsfrage gesellschaftlich relevant sein. Die Anwendungsfelder sind breit gefächert und reichen vom Co-Design von Technologien bis zur Transformation von Regionen und Stadtquartieren. Hier einige Beispiele:

- Technologische Innovation oder Weiterentwicklung, z.B. Co-Design der Agro-Photovoltaik zur gekoppelten Erzeugung von Nahrungsmitteln und Strom auf einer Fläche (KIT-ITAS) oder proaktives Akzeptanzscreening für die Technologie Power-to-X (IZES).
- Entwicklung von Narrativen oder Szenarien zur Identifizierung von Konfliktlinien beim Ausbau erneuerbarer Energien, z.B. Kopernikusprojekt ENavi (ISE).
- Transformation von Regionen, z.B. die Kohleabbaugebiet Rheinisches Revier zur Bioökonomie-



KIT
Dr. Christine Rösch
christine.roesch@kit.edu



Fraunhofer ISE
Dr. Sebastian Gözl
sebastian.goelz@ise.fraunhofer.de

IZES
Jan Hildebrand
hildebrand@izes.de

FZ Jülich
Dr. Sandra Venghaus
s.venghaus@fz-juelich.de

Wuppertal Institut
Katja Witte
katja.witte@wupperinst.org

Region (Transform2Bio) unterstützt durch einen Stakeholder-Dialog zur Identifizierung wünschenswerter nachhaltiger, techno-ökonomisch machbarer und akzeptabler Bioökonomie-Implementierungsoptionen und zur Erprobung bio-basierter Produkte und Prozesse (FZ Jülich).

- Transformation von Stadtteilen zu nachhaltigen klimaneutralen Quartieren, z.B. Reallabor Karlsruhe, EnStadt-Pfaff und DoNupart (KIT-ITAS, Fraunhofer ISE, Wuppertal Institut).

Wie funktioniert und gelingt transdisziplinäre Forschung?

Transdisziplinäre Forschung kann gelingen, wenn es eine klare Rahmung der Beteiligung, ein gemeinsam entwickeltes Problemverständnis und eine transparente Kommunikation der Forschungsziele und Bedarfe der Akteure gibt. Ansonsten kann es zu Missverständnissen aufgrund unterschiedlicher (nicht erfüllter) Erwartungen kommen. Neben der gezielten Orientierung an Akteuren mit unterschiedlichen Interessen und Wertvorstellungen ist es wichtig, ein Vertrauensverhältnis aufzubauen und ein adäquates Forscherteam mit fachlichen und praxisbezogenen Kompetenzen zusammenzustellen.

Um die verschiedenen Wissensbestände der Disziplinen und Akteure zu vereinen, bedarf es einer methodischen Aufbereitung der Ergebnisse damit sowohl die Wissenschaftler als auch die Akteure außerhalb der akademischen Forschung diese für ihre unterschiedlichen Bedarfe nutzen können. Hier müssen die Eigenlogiken und Eigeninteressen der Beteiligten überwunden werden: zum einen die der Wissenschaft, die nach skalierbaren Lösungen sucht und an hochrangigen Veröffentlichungen interessiert ist, und zum anderen der Praxis, die nach maßgeschneiderten, wirksamen und marktfähigen Lösungen sucht. Dazu kommt, dass auch die Forschungspolitik und -administration, welche durch Ausschreibungen und finanzielle Förderungen transdisziplinäre Forschung ermöglicht und unterstützt, an Erfolgsgeschichten interessiert sind. Konkret bedeutet dies, dass transdisziplinäre Ansätze dazu beitragen sollen, die Nutzung von mit Steuergeldern entwickelten Energietechnologien zur Verringerung der Treibhausgase zu ermöglichen (Stichwort Akzeptanzbeschaffung).

Welche Ansätze und Methoden werden angewandt?

Die transdisziplinäre Forschung kann auf Methoden aus den Sozialwissenschaften aufbauen und nutzt je

nach Problem- und Fragestellung ein breites Spektrum von Ansätzen, das vom leitfadengestützten Interview über Online-Umfragen und Gruppen-Delphi bis hin zu Stakeholder-Workshops und Bürgerforen reicht.

Ein stark nachgefragtes, aber noch wenig erprobtes transdisziplinäres Forschungsformat sind die Living Labs und Reallabore, in denen Wissenschaft und Gesellschaft zusammen Fragestellungen bearbeiten und Veränderungsprozesse initiieren und untersuchen (Parodi et al. 2018). In Reallaboren können "Vor-Ort-Maßnahmen" und Interventionen im kleinen Maßstab getestet, Konfliktlinien identifiziert und die Bereitschaft zur Akzeptanz von neuen Technologien und Investitionsentscheidungen ausgelotet werden.

Welche Erkenntnisse und welcher Nutzen werden erwartet?

Transdisziplinäre Forschung kann neues und praxisrelevantes Wissen bereitstellen und durch die Integration gesellschaftlicher Wissensbestände, Perspektiven, Erwartungen und Präferenzen sowohl zur Veränderung von wissenschaftlichen Innovationen als auch der Praxis gesellschaftlicher Akteure beitragen. Die Erkenntnisse, die auf diesem praxisnahen und handlungsorientierten Wissen aufbauen, können die Entwicklung konsensfähiger und gesellschaftlich akzeptanzfähiger Strategien der Energiewende unterstützen. Darauf aufbauend können Handlungsempfehlungen abgeleitet und planerische, gestalterische, partizipative oder kommunikative Maßnahmen zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende ergriffen werden.

Die Erhebung von Erwartungen und Präferenzen von Akteuren sowie die Entwicklung von Maßnahmen und Interventionen finden oftmals auf disaggregierter Ebene anhand granularer, kontextspezifischer Fragestellungen, beispielsweise zum Ausbau der Energieinfrastruktur, statt. Diese Forschungsergebnisse auf Mikroebene werden bislang nur ansatzweise für die Entwicklung großskaliger sozio-technischer Modelle und Szenarien herangezogen. Eine Integration und Nutzbarmachung der Ergebnisse und Ereignisse transdisziplinärer Forschung auf regionaler Ebene in eine übergeordnete Gesamtstrategie der Energiewende ist möglich, wenn diese transferierbar sind und als "Kern" gesetzt werden können. Auf diese Weise können die Ergebnisse transdisziplinärer Forschung die Entwicklung narrativer Ansätze (Erzählungen), gemeinschaftlicher Visionen und plausibler sozio-technischer Szenarien und Transformationspfade unterstützen.

Beispiele transdisziplinäre Forschungsprojekte

Transdisziplinäre Forschung adressiert verschiedene Problem- und Fragestellungen von der Technikentwicklung bis zur Transformation von Regionen und Stadtquartieren. Wie dies konkret erfolgt und welche Formate angewandt werden, soll anhand ausgewählter Beispiele transdisziplinärer Forschung illustriert werden. Generell ist dabei anzumerken, dass es sich um zeitlich befristete Projekte handelt, die immer wieder von Neuem ein funktionsfähiges transdisziplinäres Forschungsnetzwerk aufbauen müssen.

- Um den transdisziplinären Dialog zu verstetigen und Erfahrungen mit dem Dauerbetrieb eines Reallabors zu sammeln, wurde in Karlsruhe ein Reallabor etabliert. Dort können transformative Realexperimente durchgeführt und nachhaltige Lebens- und Wirtschaftsweisen in engem Austausch mit den Bürgern entwickelt und erprobt werden. Ein Beispiel ist das Realexperiment „Klimaschutz im Alltag“ zur Identifizierung der Klimaschutzpotenziale im Alltagshandeln bei Ernährung, Mobilität, Konsum und Entwicklung klimafreundlicher Alternativhandlungen und Alltagsroutinen.
- Eine ähnliche Zielsetzung hat das Forschungsprojekt DoNaPart bei dem das Zusammenspiel von Beteiligungsmöglichkeiten und psychologischen und kommunalen Empowerment-Prozessen in der Bevölkerung untersucht und nach dem Vorbild eines Reallabors partizipative Maßnahmen entlang der Lebensbereiche „nachhaltige Energienutzung“, „multimodale Mobilität“ und „kollaborativer Konsum“ konzipiert und umgesetzt werden (Fachhochschule Dortmund, Wuppertal Institut, Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung, Stadt Dortmund).
- Im Reallabor EnStadt: Pfaff in Kaiserslautern wird untersucht, wie professionelle Akteure innovative Technologie-Lösungen zur Entwicklung eines klimaneutralen Stadtquartiers trotz fehlender gesetzlicher und ökonomischer Rahmenbedingungen in die Umsetzung bringen (Fraunhofer ISE). Ziel ist die Erarbeitung von übertragbarem Orientierungswissen, um anderen Kommunen die Machbarkeit und konkrete Vorgehensweise zu veranschaulichen und diese im Transformationsprozess zu unterstützen.
- Im Forschungsschwerpunkt „Energiesystem-Stadt“ soll am Fraunhofer IEE ein Kompetenzfeld Akzeptanzforschung entstehen, beispielsweise um Kommunen bei der Umsetzung der Wärmewende zu begleiten und mögliche Hemmnisse und Hürden frühzeitig zu identifizieren und zu analysieren.

- Das Co-Design Projekt Agro-Photovoltaik zeigt, wie transdisziplinäre Forschung bei der Technikentwicklung funktioniert und wie in einem mehrstufigen Prozess die Perspektiven, Erwartungen und Bedenken von Stakeholdern und Bürger*innen integriert werden können. Die Ergebnisse tragen dazu bei, die wesentlichen Faktoren für eine Akzeptanz einer neuen Technologie zu identifizieren, zu denen u.a. die Verteilungsgerechtigkeit (Chancen/Gewinne versus Lasten), umfassende Umweltverträglichkeit, Nachhaltigkeit und Beteiligungsmöglichkeiten gehören. (Ketzner et al. 2019)
- Die systematische Identifizierung von Stakeholderpositionen zur Energiewende und deren Integration in nationale Transformationspfade ist u.a. Ziel in den Kopernikus-Projekten zum Energiewende-Navigationssystem (ENavi und ENSURE). Insbesondere im Projekt ENavi wurde ein transdisziplinärer Forschungsansatz entwickelt und umgesetzt (Gölz et al., 2019), in dem die gesellschaftliche Akzeptanz regionaler Energiewendeprojekte als Ausdruck sozialer Dynamik durch Kommunikation und sozial geteilte Repräsentation wie beispielsweise Narrativen verstanden wird und auf Basis dieses Analyserahmens konkrete Konfliktlinien zwischen verschiedenen Stakeholder beschrieben werden können, für die regional oder bundesweit Lösungen gesucht werden müssen.

Ergebnisse transdisziplinärer Forschung

Die Ergebnisse transdisziplinärer Forschungsprojekte tragen zum einen dazu bei, die Herausforderungen, Hemmnisse und Konfliktlinien bei der Realisierung der Energiewende zu identifizieren, analysieren und



Abbildung 1:
Mehrstufiger transdisziplinärer Ansatz im Co-Design Projekt Agro-Photovoltaik

kontextualisieren. Zum anderen kann transdisziplinäre Forschung den Wissenstransfer in die Praxis verbessern, weil die Ergebnisse praxisrelevanter und handlungsorientierter sind. Zudem kann dieser Forschungstyp Transformationsprozesse unterstützen oder initiieren und zur Entwicklung nachhaltiger und klimaneutraler Städte und Regionen beitragen. Transdisziplinäre Forschung ermöglicht auch, die Divergenz zwischen den Perspektiven von Investoren und Entscheidungsträgern einerseits und Betroffenen andererseits in Bezug auf Chancen- und Lasten-/Risikoerwartungen transparent zu machen. Die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse können auch dazu beitragen, die in techno-ökonomischen Modellen und Szenarien hinterlegten Annahmen und Entscheidungsalgorithmen praxisrelevanter zu gestalten und diese so zu verändern, dass Potenzialberechnungen nicht ausschließlich auf techno-ökonomischen Kriterien basieren, sondern auch soziale und gesellschaftliche Aspekte in den Optimierungslogiken berücksichtigt werden.

Denn ausschließlich wirtschaftliche Bewertungen von Investitionen in neue Anlagen führen zu Entscheidungen, die vor allem in der lokalen Bevölkerung und bei Anwohnern nicht unbedingt akzeptiert werden und zu Verzögerungen beim Bau der Anlagen bis hin zum Widerstand führen können, weil diese als massive Interventionen in ihre unmittelbare Lebenswelt und Beeinträchtigung ihrer persönlichen Lebensqualität wahrgenommen werden.

Wenn die Perspektiven, Erwartungen, Sorgen und lebensweltlichen Anliegen der Akteure und Bürger*innen Teil wissenschaftlicher Modelle und Szenarien werden, kann die Wissenschaft praxisrelevantes Orientierungswissen für gesellschafts- und bürgerverträgliche Politikentscheidungen bereitstellen und dazu beitragen, dass die Energiewende wieder Fahrt aufnimmt und die Pariser Ziele vielleicht doch noch erreicht werden.

Quellen

- Gölz, S., Becker, K., Langer, A., Götte, S., Marxen, T., Berneiser, J. 2019: Akzeptanz und Konflikte als Zustände regionaler sozialer Prozesse. Anwendung eines transdisziplinären Analyserahmens. In: Fraune C. et al. (Hrsg.): Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation: Gesellschaftliche Herausforderungen jenseits von Technik und Ressourcenausstattung, Springer-Verlag, S. 85-109.
- Ketzer, D.; Weinberger, N.; Rösch, C.; Seitz, S. Land use conflicts between biomass and power production – Citizens' participation in the technology development of Agrophotovoltaics. 2019. Journal of responsible innovation. <https://doi.org/10.1080/23299460.2019.1647085>
- Parodi, O.; Seebacher, A.; Albiez, M.; Beecroft, R.; Fricke, A.; Herfs, L.; Meyer-Soylu, S.; Stelzer, V.; Trenks, H.; Wagner, F.; Waitz, C. Das Format „Real-labor“ weiterentwickeln: Best-Practice-Beispiel Karlsruher Transformationszentrum. 2019. Gaia, 28 (3), 322 -323. <https://doi.org/10.14512/gaia.28.3.17>
- Ram M., Bogdanov D., Aghahosseini A., Gulagi A., Oyewo A.S., Child M., Caldera U., Sadovskaia K., Farfan, J., Barbosa LSNS., Fasihi M., Khalili S., Dalheimer B., Gruber G., Traber T., De Caluwe F., Fell H.-J., Breyer, C. Global Energy System based on 100% Renewable Energy – Power, Heat, Transport and Desalination Sectors. Study by Lappeenranta University of Technology and Energy Watch Group, Lappeenranta, Berlin, March 2019.
- Rinscheid, A., Wüstenhagen, R. Germany's decision to phase out coal by 2038 lags behind citizens' timing preferences. Nat Energy 4, 856 -863 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0460-9>
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) 2011. Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. (<https://www.wbgu.de>)

Der Stromsektor als Rückgrat der zukünftigen Energieversorgung

Klimaziele und Status Quo

Um die notwendige Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95% gegenüber 1990 zu erreichen, muss die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas mittelfristig komplett durch erneuerbare Energien (EE) oder CO₂-freie Brennstoffe ersetzt werden.

In Deutschland ist der Anteil der erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2017 zwar bereits auf 36% am Bruttostromverbrauch gestiegen, jedoch beträgt der Anteil von EE am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte erst 13,2% und im Verkehrssektor sogar erst 5,2% [1].

Direkte versus indirekte Elektrifizierung

Bereits heute existieren Technologien, die eine Dekarbonisierung auch im Wärme- und Verkehrssektor ermöglichen. Dazu zählen insbesondere Wärmepumpen und die Elektromobilität, die bei Vorhandensein von ausreichend Strom aus erneuerbaren Quellen eine sehr effiziente und CO₂-freie Versorgung ermöglichen (vgl. oberer Bereich in ► *Abbildung 1*). Die Herstellung von synthetischen, speicherbaren Brennstoffen (sogenanntes P2X) kann ebenfalls einen

wichtigen Bestandteil im zukünftigen Energiesystem einnehmen. Dabei wird in einem ersten Schritt über die Elektrolyse Wasserstoff hergestellt, der bei Bedarf unter Nutzung einer CO₂-Quelle noch weiter zu Brenn- und Kraftstoffen wie Methan, Benzin oder Kerosin konvertiert werden kann (vgl. unterer Bereich in ► *Abbildung 1*).

Die Herstellung synthetischer Brennstoffe hat dabei den Vorteil, dass die Brennstoffe speicherbar sind und in verschiedensten Anwendungen überwiegend unter Nutzung der heutigen Infrastruktur eingesetzt werden können.

Als mögliche CO₂-Quellen sollten dabei vor allem solche zuerst genutzt werden, bei denen eine möglichst hohe CO₂-Konzentration vorliegt, um nicht noch zusätzlich Energie für die CO₂-Abtrennung zu benötigen. Idealerweise bieten sich hier Bioethanol- oder Biomethaneinspeiseanlagen an, bei denen der biogene Kohlenstoff im Kreislauf geführt werden kann und CO₂ als hochkonzentriertes Nebenprodukt anfällt. Das aktuelle Produktionsniveau beider Konversionstechnologien erbringt aktuell 1.360Mt CO₂, womit über den Sabatier-Prozess ca. 10TWh Elektrolysestrom absorbierbar wären, aus dem sich 7TWh zusätzliches Bio-P2G-Methan erzeugen ließe.



Fraunhofer IEE
Dr. Diana Böttger
diana.boettger@iee.fraunhofer.de



Fraunhofer ISE
Prof. Dr. Christof Wittwer
christof.wittwer@ise.fraunhofer.de

DBFZ
Martin Dotzauer
martin.dotzauer@dbfz.de

DLR
Dr. Hans Christian Gils
hans-christian.gils@dlr.de

ISFH
Prof. Dr. Rolf Brendel
rolf.brendel@isfh.de

Dr. Raphael Niepelt
niepelt@isfh.de

Jülich
Dr. Jochen Linßen
j.linssen@fz-juelich.de

Dr. Martin Robinus
m.robinus@fz-juelich.de

KIT
Maryegli Fuss
maryegli.fuss@kit.edu

Dr. Thomas Brown
tom.brown@kit.edu

Abbildung 1:
Anwendungsbereiche von Strom
in Verbindung mit Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern [2]

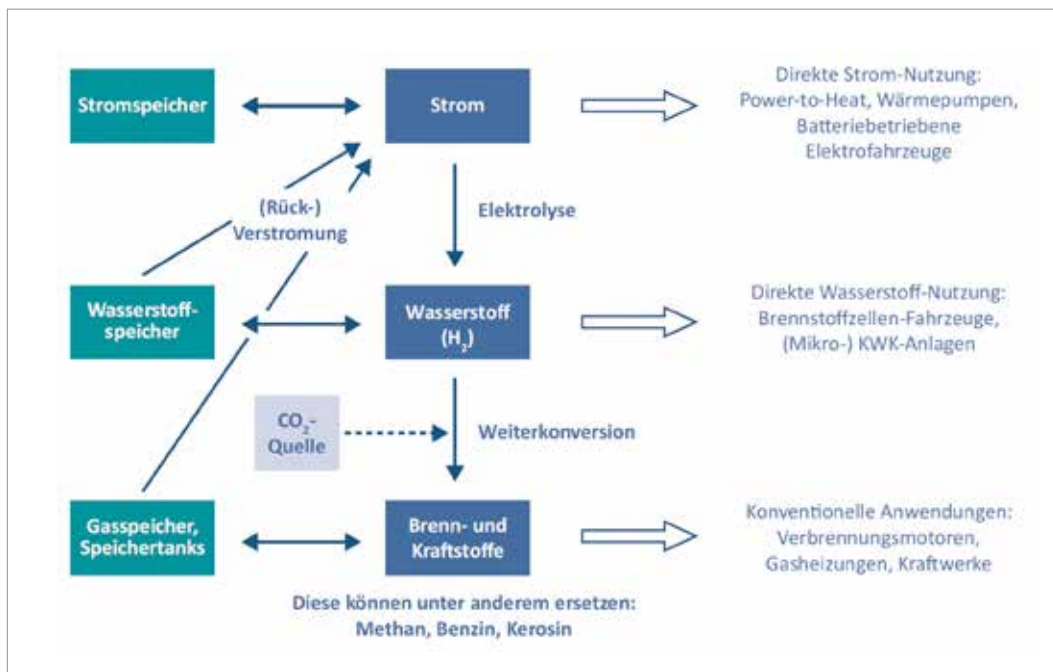


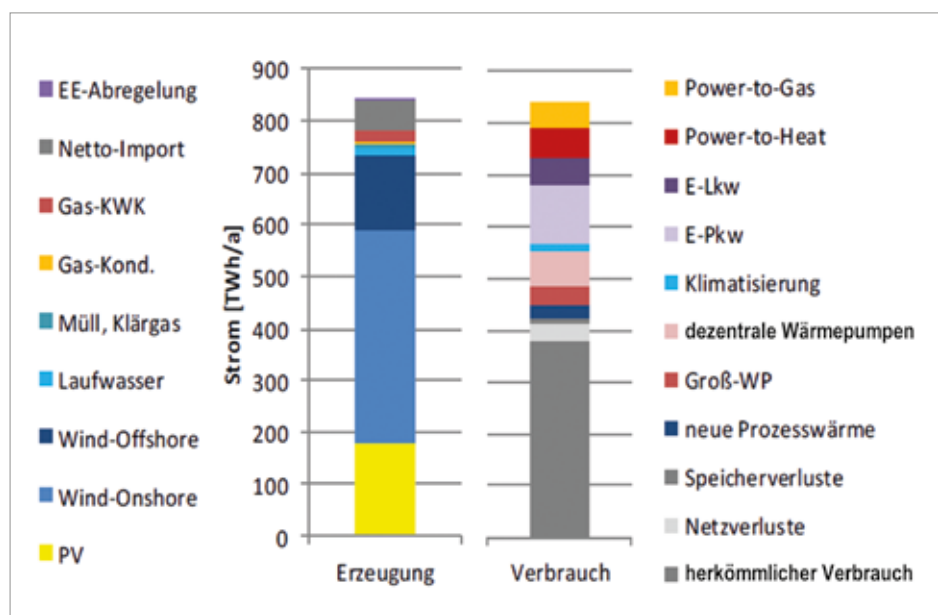
Abbildung 2:
Gesamt-Energieeffizienz von Pkw mit verschiedenen Antriebskonzepten, die alle auf Strom aus erneuerbaren Energien basieren [2]



Der Nachteil dieser indirekten Elektrifizierung gegenüber einer direkten Elektrifizierung besteht jedoch in den erheblichen Wirkungsgradverlusten, die exemplarisch für den Pkw-Bereich in ► **Abbildung 2** dargestellt sind. So erreicht ein batteriebetriebenes Elektrofahrzeug einen Gesamtwirkungsgrad von 69%, während ein brennstoffzellenbetriebenes Elektrofahrzeug nur auf einen Gesamtwirkungsgrad von 26% kommt. Noch schlechter sieht dies bei einem Auto mit Ver-

brennungsmotor aus, das mit einem synthetischen Kraftstoff betrieben wird. Dieses erreicht einen Gesamtwirkungsgrad von nur 13%. Im Wärmesektor sind die Verhältnisse ähnlich. Der Kettenwirkungsgrad liegt bei der direkten Elektrifizierung der Wärmeerzeugung über die Wärmepumpe um ein Vielfaches höher als bei der Wärmeerzeugung mit synthetischen Gasen.

Abbildung 3
Mögliche Energiebilanz für Deutschland im Jahr 2050 [3]



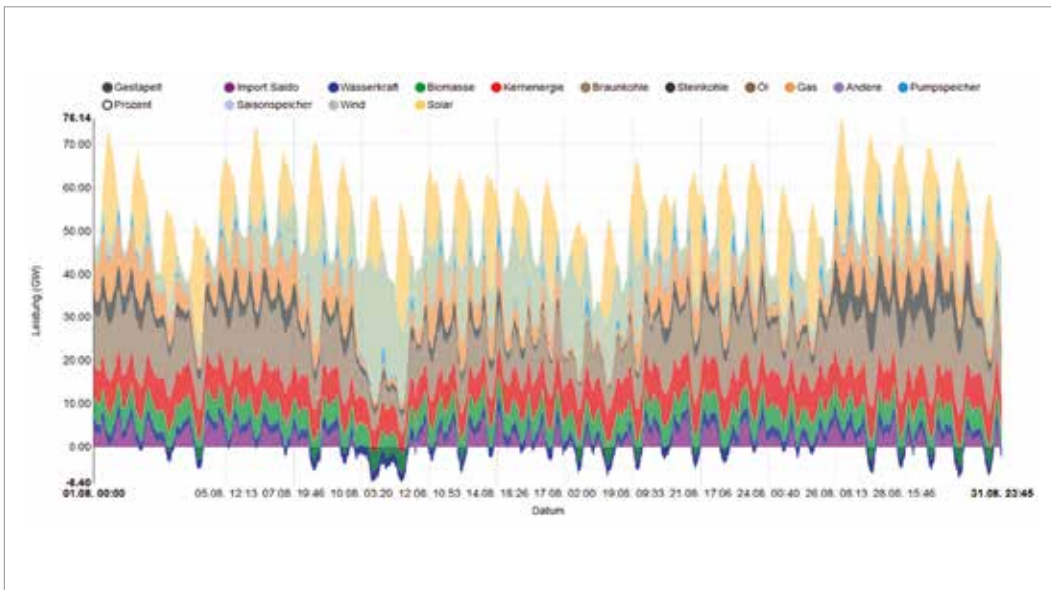


Abbildung 4
Betrieb des Stromsystems heute (August 2019) [4]:
Ausgleich über die Stromerzeugungsseite

Aus diesem Beispiel wird ersichtlich, dass eine indirekte Elektrifizierung aufgrund der deutlich schlechteren Gesamtwirkungsgrade einen entsprechend höheren Ausbau von erneuerbaren Energien erfordert. In beiden Fällen wird der Strombedarf im Vergleich zu heute deutlich zunehmen, sodass der Stromsektor zukünftig das Rückgrat der Energieversorgung darstellen wird.

Beispielhaft ist für ein Szenario mit 95% CO₂-Minderung die Jahresbilanz der Stromerzeugung und des Stromverbrauchs in Deutschland in ► **Abbildung 3** zu sehen. In diesem Szenario beträgt der Nettostromverbrauch rund 840 TWh und liegt damit um rund 60% über dem heutigen Stromverbrauch. In diesem Szenario kommt dabei die eine Hälfte der Netto-

stromnachfrage aus heutigen Anwendungen und die andere Hälfte aus neuen Sektorkopplungsanwendungen aus dem Wärme- und Verkehrsbereich sowie von Power-to-Gas. Im Vergleich dazu kann bei noch stärkerer indirekter Elektrifizierung die Stromnachfrage auch bis auf 1.000 TWh ansteigen.

Ausgleich von Stromangebot und Stromnachfrage heute über die Stromerzeugungsseite

Die Integration der wetterabhängigen Stromeinspeisung von Windkraft und Photovoltaik erfolgt heute überwiegend über die Nutzung der Flexibilität der

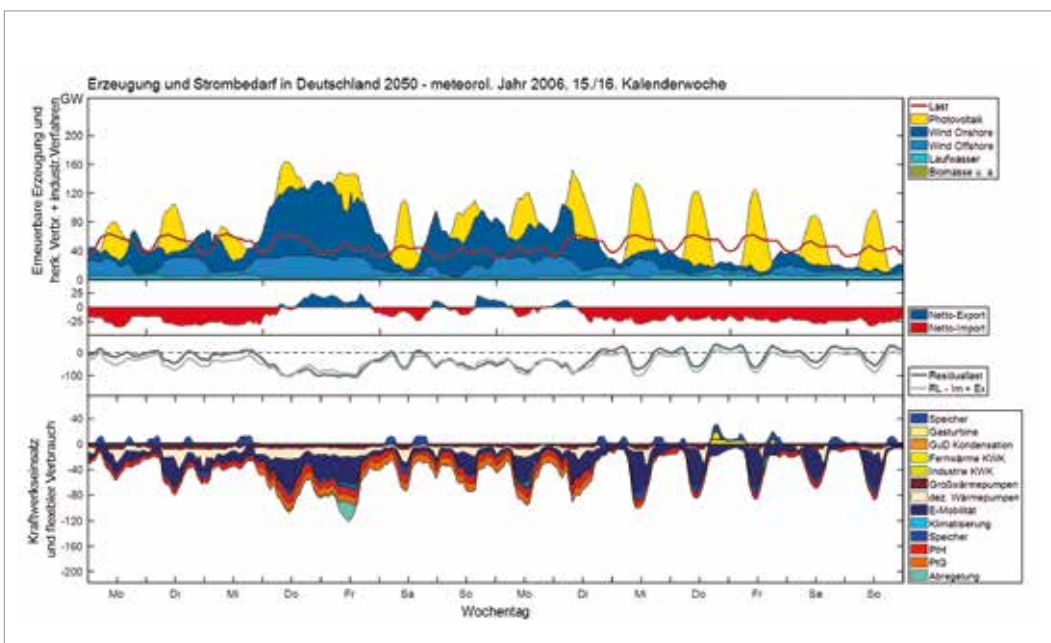


Abbildung 5
Möglicher Betrieb des Stromsystems im Jahr 2050 [5]:
Ausgleich zukünftig verstärkt über die Stromverbrauchsseite

Stromerzeugungsseite wie ► *Abbildung 4* zeigt. So werden im Fall von einem hohen Dargebot von Strom aus EE Gas- und Kohlekraftwerke gedrosselt oder teilweise auch ganz abgeschaltet. Darüber hinaus sieht man an der beispielhaften Situation in ► *Abbildung 4* auch, dass am Wochenende des 10./11. August 2019 auch die deutschen Kernkraftwerke gedrosselt wurden und ein hoher Stromexport in das europäische Ausland stattfand.

Ausgleich von Stromangebot und Stromnachfrage zukünftig verstärkt über die Stromverbrauchsseite

Da zukünftig die Anzahl thermischer Kraftwerke abnehmen und sich die Stromerzeugung in immer größerem Umfang auf die wetterabhängigen Quellen Windkraft und Photovoltaik fokussieren wird, ist eine stärkere Flexibilisierung der Stromnachfrage-seite notwendig, um jederzeit einen Ausgleich zwischen Stromangebot und -nachfrage herzustellen. ► *Abbildung 5* zeigt hierzu ein Szenario mit einer starken Flexibilität der Stromverbrauchsseite. In Zeiten, in denen ein hohes Stromangebot den heutigen herkömmlichen Stromverbrauch (rote Linie in oberer Grafik) übersteigt, werden zunächst Großwärmepumpen und dezentrale Wärmepumpen betrieben. Weiterhin werden Elektrofahrzeuge flexibel geladen, wenn ausreichend Strom zur Verfügung steht. Wenn keine weitere direkte Nachfrage aus dem Wärme- oder Verkehrssektor besteht, werden zusätzlich Power-to-Gas-Anlagen (orange Fläche in unterer Abbildung) betrieben. Aufgrund der hohen Flexibilität in diesem Szenario tritt eine marktbedingte Abregelung von EE (türkise Fläche in unterer Abbildung) nur in vergleichsweise wenigen Fällen auf. Um gleichzeitig eine netzbedingte Abregelung zu vermeiden, ist ein gut ausgebautes Stromnetz bei möglichst erzeugungsnahe Verbrauch notwendig.

Fazit

Unabhängig von der Frage der direkten oder indirekten Stromnutzung wird der Stromsektor zukünftig eine immer wichtigere Rolle bei der Energieversorgung spielen. Wenn die Effizienzvorteile der direkten Stromnutzung gehoben werden können, kann der Ausbau von erneuerbaren Energien deutlich geringer ausfallen als bei indirekter Elektrifizierung über P2X-Brennstoffe. Dies ist jedoch nur mit einer starken Flexibilisierung der Stromnachfrage im Wärme- und Verkehrssektor möglich. Es werden dafür hocheffiziente Speicher (Batterien) benötigt, aber auch thermische und chemische Speicher (Wärme und Wasserstoff).

Quellenangaben

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2018): „Erneuerbare Energien in Zahlen: Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2017“, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2017.html> (abgerufen am 07.10.2019)
- [2] acatech et al. (2017): „Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende“
- [3] Fraunhofer IWES (2017): „Analyse eines Europäischen – 95%-Klimazielszenarios über mehrere Wetterjahre – Teilbericht im Rahmen des Projektes: KLIMAWIRKSAMKEIT ELEKTROMOBILITÄT Entwicklungsoptionen des Straßenverkehrs unter Berücksichtigung der Rückkopplung des Energieversorgungssystems in Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele“, Kassel.
- [4] Fraunhofer ISE (2019): Energy Charts, https://www.energy-charts.de/power_de.htm?source=all-sources&year=2019&month=8
- [5] Fraunhofer IEE (2016): <http://www.energieversorgung-elektromobilitaet.de/SzenarienGenerator.html>

Die Verkehrswende erreichen: vermeiden, verlagern, verbessern

1. Einleitung

Trotz eines steigenden Bewusstseins in der Bevölkerung für den Klimawandel und die dafür notwendige Umsetzung entsprechender Maßnahmen, sinken die CO₂-Emissionen in Deutschland [1] nicht ausreichend stark, um die Ziele der Bundesregierung für 2020 [2] zu erreichen. Ein Blick auf die Entwicklung der sektoralen CO₂-Emissionen Deutschlands (► *Abbildung 1*) zeigt weiterhin unterschiedliche Trends in den letzten Jahren auf [1].

In den Sektoren Industrie, Strom und Haushalte wurde bis 2017 bereits eine Reduktion der CO₂-Emissionen um mehr als 25% gegenüber dem Referenzjahr 1990 erreicht [1].

Dementgegen lagen die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors im Jahr 2017 auf einem ähnlichen Niveau wie in 1990. Seit 2010 ist sogar ein Anstieg der Emissionen erkennbar [1].

2. Optionen

Um die Emissionen des Verkehrssektors in der erforderlichen Höhe zu reduzieren, ist aus heutiger Sicht eine Kombination unterschiedlicher Maßnahmen erforderlich. Die Optionen lassen sich in drei zentrale Blöcke der Verkehrswende einteilen: vermeiden, verlagern, verbessern.

vermeiden

Eine Vermeidung von Verkehr kann z.B. durch einen zunehmenden Anteil von Heimarbeit erfolgen, der zu einer sinkenden Anzahl Arbeitswege führt. Ebenso könnte Verkehr durch geeignete Maßnahmen der Stadt- und Regionalplanung durch eine Verkürzung der Wege dazu beitragen Verkehr zu vermeiden. Im Güterverkehr ist eine erhöhte Auslastung der Fahrzeuge durch eine verbesserte Logistik zu nennen.

verlagern

Die im Herbst 2019 geplante Gesetzesänderung zur Reduktion der Mehrwertsteuer für Fernverkehrstickets der Bahn [4] zielt auf eine zunehmende Verlagerung des Verkehrs von CO₂-intensiveren (z.B. motorisierter Individualverkehr – MIV) auf CO₂-ärmere Verkehrsmodi (z.B. Schiene) ab.

verbessern

Der letzte Block umfasst die Senkung der spezifischen Emissionen der verschiedenen Modi. In diesem Bereich sind vor allem solche Maßnahmen konzentriert, die auf einen verringerten Endenergiebedarf sowie einen Kraftstoffwechsel hin zu solchen auf Basis erneuerbarer Primärenergien zielen. Dazu gehören insbesondere reduzierte Fahrwiderstände, beispielsweise durch verbesserte Aerodynamik und Gewichtsreduktion, die Erhöhung der Antriebs-effizienz und die Markteinführung alternativer Antriebskonzepte.

3. Herausforderungen der Verkehrswende

Obwohl diverse Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen des Verkehrssektors verfügbar sind, weisen die in den letzten Jahren trotzdem steigenden Emissionen auf Schwierigkeiten bei der Umsetzung hin.

verbessern

Um die Entwicklung von Verbesserungsoptionen voranzutreiben, wurden sowohl für Pkw- [5] als auch für Lkw-Hersteller [6] Flottengrenzwerte auf EU-Ebene eingeführt. Bis 2014 führte diese Regulierung zu der gewünschten Senkung des spezifischen CO₂-Ausstoßes von neuen Pkw. Doch seit 2015 hat sich dieser Trend wieder umgekehrt, sodass aktuell eine erneute Erhöhung des spezifischen CO₂-Ausstoßes zu erkennen ist.

Diese negative Entwicklung entgegen dem Zielkorridor ist vor allem auf die veränderte Zusammensetzung der Neufahrzeugflotte zurückzuführen. So steigt insbesondere der Anteil der SUV seit 2010 kontinuierlich an. In Europa hat sich deren Anteil von 2010 bis 2018 mehr als verdreifacht. Welches Ausmaß die Auswirkungen dieser Entwicklung auf die CO₂-Emissionen haben zeigt ► *Abbildung 2*. Weltweit betrachtet führte die wachsende Flotte der SUV von 2010 bis 2018 zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen um 544 Mio. t. Dies ist zwar noch ein geringer Anteil an den Gesamtemissionen, aber schon mehr als der durch die Schwerindustrie im gleichen Zeitraum verursachte Anstieg. [7]



FZ Jülich

Dr. Martin Robinius
m.robinius@fz-juelich.de

Dr. Thomas Grube
th.grube@fz-juelich.de

Prof. Dr. Detlef Stolten
d.stolten@fz-juelich.de

DBFZ

Dr. Franziska Müller-Langer
franziska.mueller-langer@dbfz.de

DLR

Carsten Hoyer-Klick
carsten.hoyer-klick@dlr.de

Dr. Ralph-Uwe Dietrich
ralph-uwe.dietrich@dlr.de

Fraunhofer IEE

Philip Gauglitz
philip.gauglitz@ee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE

Dr. Christoph Kost
christoph.kost@ise.fraunhofer.de

IZES

Dr. Bodo Groß
gross@izes.de

KIT

Dr. Frank Graf
frank.graf@kit.edu

Sascha Ott
sascha.ott@kit.edu

UFZ

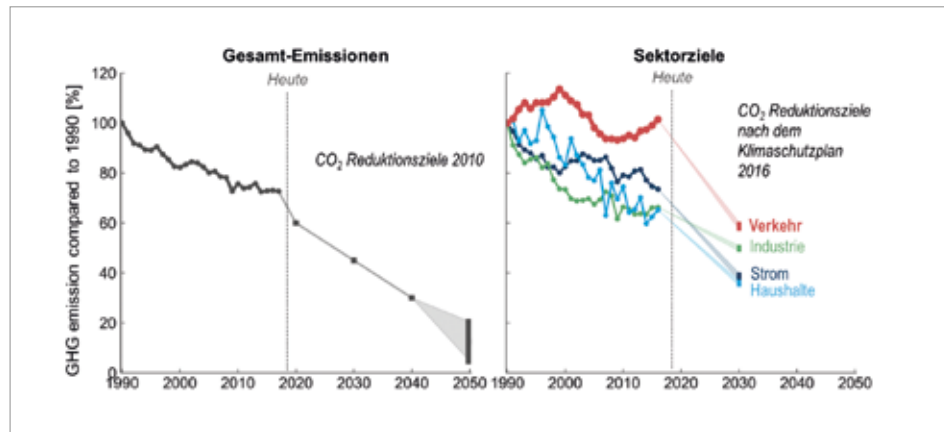
Prof. Dr. Paul Lehmann
paul.lehmann@ufz.de

Dr. Markus Millinger
markus.millinger@ufz.de

ZSW

Maike Schmidt
maike.schmidt@zsw-bw.de

Abbildung 1
Entwicklung der gesamten und sektoralen CO₂-Emissionen in Deutschland inklusive zukünftiger Ziele [1-3]



Demnach sind die bereits umgesetzten Effizienzverbesserungen sowie der langsam wachsende Anteil alternativer Antriebe im Pkw-Bereich [8] bisher nicht ausreichend, um die gegenläufigen Auswirkungen des wachsenden Bestands schwerer PKW auf die spezifischen CO₂-Emissionen auszugleichen [9].

vermeiden

Entgegen der gewünschten Verkehrsvermeidung steigen die Verkehrsleistungen sämtlicher Modi an [10]. Gründe für den Anstieg im Personenverkehr sind unter anderem eine stetig wachsende Entfernung zwischen Wohn- und Arbeitsort [11] sowie die verstärkte Reisetätigkeit [12]. Im Güterverkehr liegen die Ursachen in der zunehmenden Globalisierung und dem steigenden E-Commerce [13].

verlagern

Der Wunsch nach einer flexiblen und schnellen Logistik führt nicht nur zu einer steigenden Verkehrsleistung, sondern auch zu einer Verlagerung des Verkehrs vom Wasser auf die Schiene und Straße [10]. Auch dies widerspricht der gewünschten Verlagerung zur Reduktion der CO₂-Emissionen. Weiterhin ist im Personenverkehr bisher keine bedeutsame Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs auf CO₂-ärmere Verkehrsmittel erkennbar [10].

4. Forschungsergebnisse und Beiträge aus der Forschung

Um trotz der im vorherigen Kapitel aufgezeigten Herausforderungen die Klimaschutzziele bis 2030 und 2050 im Verkehrssektor zu erreichen, werden in diesem Bereich erhebliche Forschungsaktivitäten geleistet. Diese haben bereits ausreichende Handlungsoptionen für die Verkehrswende herausgestellt. Des Weiteren sind die Hauptpfade (Elektromobilität mit Batterie und Wasserstoff, Power-to-Fuel und Biomasse) bekannt. In diesen Bereichen konnten durch Forschung bereits bedeutsame technologische Erfolge erzielt werden. Deren Umsetzung ist jedoch mit einer enormen Unsicherheit behaftet.

4.1 Verkehrsleistungsszenarien

Um mögliche Pfade der Verkehrswende zu bestimmen, bedarf es zunächst einer Abschätzung zukünftiger Verkehrsleistungen. ► *Abbildung 3* gibt einen Überblick zu diversen Szenarien der Verkehrsleistungen in Deutschland im Jahr 2030 und 2050.

Die Übersicht verdeutlicht, dass die Verkehrsleistungen der verschiedenen Modi in den meisten Szenarien auf einem ähnlichen Niveau prognostiziert werden. Zudem ist erkennbar, dass im Güterverkehr

Abbildung 2a
Anteil der SUV an verkauften Pkw

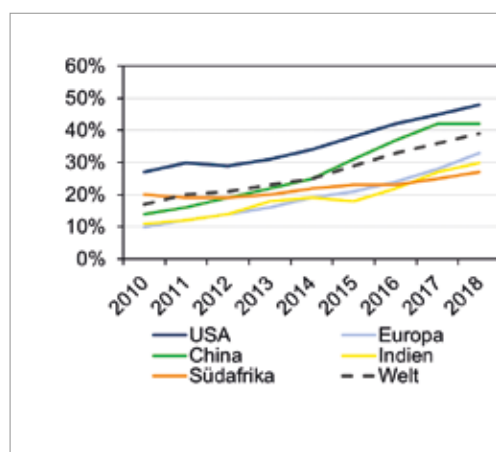
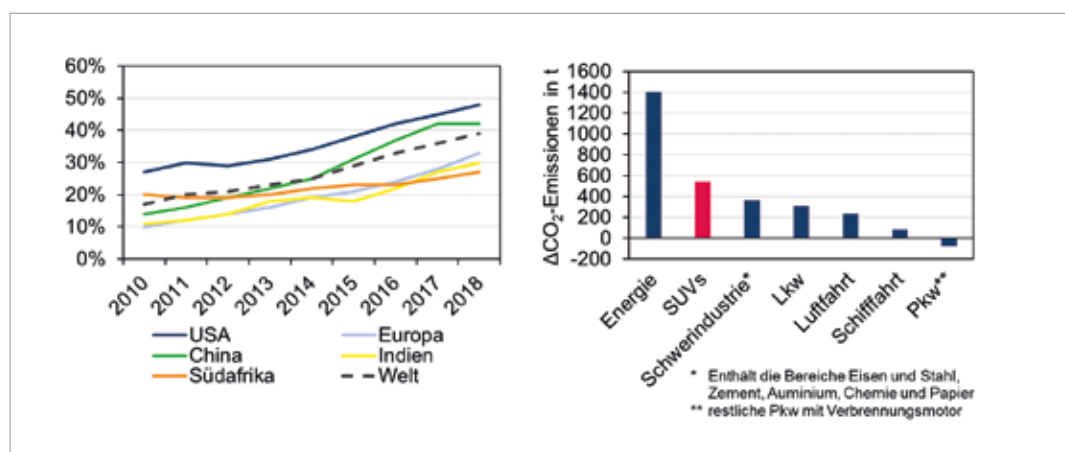


Abbildung 2b
Veränderungen der CO₂-Emissionen von 2010 bis 2019 (in Mio. t)



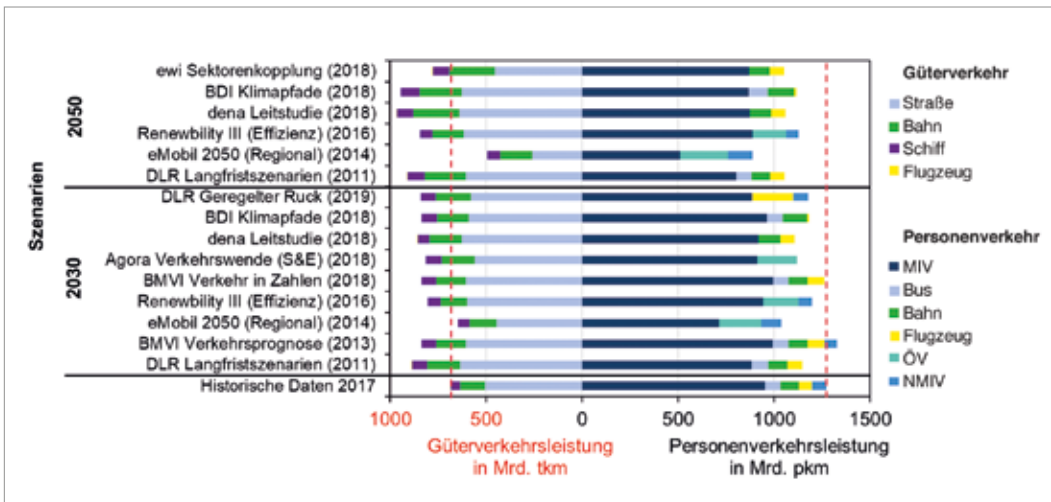


Abbildung 3
Verkehrsleistungs-szenarien für Deutschland in 2030 und 2050 [10, 14-21]

steigende Verkehrsleistungen erwartet werden, wohingegen im Personenverkehr eine leichte Reduktion bis 2050 angenommen wird. Weiterhin werden Verlagerungseffekte in den Szenarien nur in einem geringeren Ausmaß angenommen, sodass laut den bisher untersuchten Szenarien auch zukünftig ein starker Fokus auf dem motorisierten Individualverkehr liegt.

Das „Regional-Szenario“ der „eMobil“-Studie des Öko Instituts [18] stellt sowohl für 2030, als auch für 2050 einen Ausreißer in der Übersicht dar. Die Reduktion der Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr des Szenarios resultieren vor allem aus der grundlegenden Annahme einer zunehmenden Regionalisierung des Lebens der Menschen. Im Personenverkehr führt diese beispielsweise zu einer Verkürzung der Wege zu Versorgungs- und Freizeitstrukturen. Hinzu kommt eine Reduktion der Arbeitswege und Dienstreisen um 25%. Die geringere Verkehrsleistung im Güterverkehr resultiert aus einem „sparsameren“ Umgang mit Ressourcen sowie aus lokalen (Recycling-)Kreisläufen. Weiterhin wird eine optimierte Auslastung der Ladekapazitäten angenommen. [18] Dies verdeutlicht, dass auch zum Beispiel alternative Verkehrsmittel wie das Fahrrad mitgedacht werden müssen.

4.2 Die Rolle von Energiesystemmodellen

Die gezeigten Verkehrsleistungsszenarien beinhalten Aspekte des Vermeidens und des Verlagerns. Des Weiteren gibt es Technologiemodelle, mit welchen Verbesserungspotenziale bestimmt werden können. Energiesystemmodelle bilden ein zentrales Element, da sie alle drei Grundpfeiler der Verkehrswende (vermeiden, verlagern, verbessern) berücksichtigen. Grundlage der holistischen Betrachtungsweise der Energiesystemmodelle bildet der Einbezug technischer, ökonomischer und ökologischer Rahmen-

bedingungen. Auf deren Basis wird das untersuchte System optimiert. Die Ergebnisse der Systemmodelle sind allerdings nicht als Prognosen zu verstehen, sondern dienen dazu, Kausalitäten innerhalb des Systems sichtbar zu machen.

Eine zentrale Entwicklung des Energiesystems der Zukunft ist die verstärkte Kopplung der einzelnen Sektoren. Durch neuartige Energiesystemmodelle [22-26] können die Zusammenhänge dieser Sektorkopplung berücksichtigt und deren Effekte aufgezeigt werden. Einer dieser Effekte ist eine Veränderung der Energiebereitstellung hervorgerufen durch die Verkehrswende. Dieser Wirkzusammenhang ist in ► **Abbildung 5** dargestellt.

Die steigende Elektrifizierung der Pkw-Flotte bis 2050 könnte zu einem steigenden Bedarf alternativer Kraftstoffe in Form von elektrischer Energie und Wasserstoff führen, für die verbleibenden Verbrennungskraftmaschinen sind Bio- bzw. PTL-Kraftstoffe erforderlich. Um diese Energieformen bereitstellen zu können, müssen dementsprechend jedoch die erneuerbaren Energien Wind und Photovoltaik (PV) in ausreichendem Maße im Energiesystem installiert

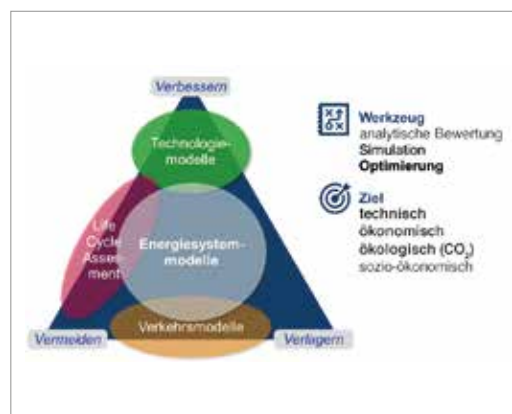


Abbildung 4
Einteilung der methodischen Modelle in das Zieldreieck der Verkehrswende

Abbildung 5a
**Anteile von Antrieben
 und Kraftstoffen in der
 Pkw-Flotte 2050 [26]**

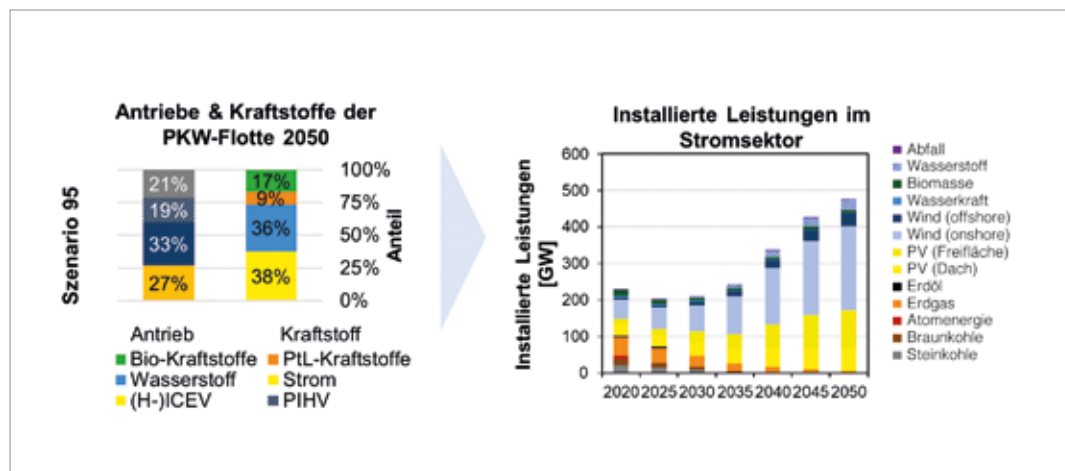
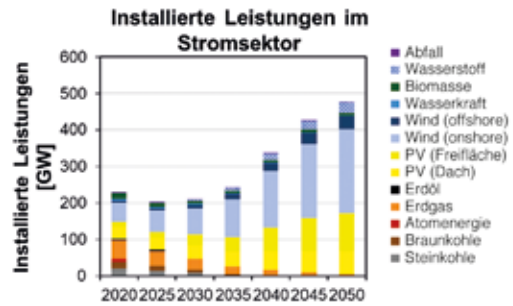


Abbildung 5b
**Installierte Leistungen
 im Stromsektor [26]**



sein sowie Erzeugungskapazitäten für die Verarbeitung zu Wasserstoff und anderen Kraftstoffen geschaffen werden.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Zielsetzungen der Energiewende stellen den aktuell nahezu ausschließlich fossile Rohstoffe nutzenden Verkehrssektor vor besondere Herausforderungen, da trotz erzielter Verbesserungen der Antriebstechnologie ein Trend zu steigenden CO₂-Emissionen erkennbar ist. Dieser Trend wird unter anderem durch steigende Verkehrsleistungen und ein verändertes Käuferverhalten in Richtung von Fahrzeugen mit erhöhtem Kraftstoffverbrauch verursacht. Weiterhin ist erkennbar, dass die Nachfrage nach emissionsarmen und effizienteren alternativen Antrieben nur langsam wächst.

Die Verkehrswende erfordert daher einen Mix aus Maßnahmen, die sich den Schlagworten vermeiden, verlagern, verbessern zuordnen lassen. Dabei gilt es zu beachten, dass einem breiten Spektrum an Lösungsoptionen, deren jeweiliger Markterfolg heute nicht abzusehen ist, zum Teil signifikante Mehrkosten gegenüberstehen. Strategische Entscheidungen können daher nur unter erheblichen Unsicherheiten getroffen werden. Dennoch sind heute auf politischer Ebene gewisse technologiespezifische Entscheidungen unumgänglich, sollen die klimapolitischen Ziele für das Jahr 2030 erreicht werden. Das gilt insbesondere für den Aufbau der notwendigen Infrastruktur zur Nutzung alternativer Antriebe.

Bezüglich aktueller Forschungsanstrengungen ist weiterhin erkennbar, dass in systemanalytischer Hinsicht die möglichen Auswirkungen eines veränderten Technologiemies – auch einschließlich der Optionen der Sektorenkopplung – und teilweise auch eines veränderten Mobilitätsverhaltens untersucht werden.

Dazu werden zum Teil neuentwickelte und zunehmend verknüpfte Modellansätze eingesetzt. Dabei verwendete Szenarien und Prognosen weisen insbesondere auch auf steigende Verkehrsleistungen im Güterverkehr hin. Im Bereich der Umsetzungsforschung kann gezeigt werden, dass derzeit neue Verfahren zur Kraftstoffbereitstellung, end-use Technologien und Infrastrukturlösungen in der Entwicklung sind, welche die Markteinführung der Elektromobilität mit Brennstoffzellen und Batterien sowie flüssiger und gasförmiger biogener und strombasierter Kraftstoffe unterstützen.

6. Quellen

1. BMWi, Zahlen und Fakten Energiedaten – Nationale und Internationale Entwicklung. 2018: Berlin.
2. Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. 2016, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Berlin.
3. Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. 2010, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Berlin.
4. Bundesregierung, Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030. 2019.
5. Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO₂ emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011. 2019: Brussels.
6. Verordnung (EU) 2019/1242 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 20. Juni 2019

- zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates.
7. Cozzi, L. and A. Petropoulos. Commentary: Growing preference for SUVs challenges emissions reductions in passenger car market. 2019 [15.10.2019–22.10.2019]; Available from: <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/october/growing-preference-for-suvs-challenges-emissions-reductions-in-passenger-car-mark.html>
 8. Bestand an Pkw in den Jahren 2010 bis 2019 nach ausgewählten Kraftstoffarten. 22.10.2019]; Available from: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2019_b_umwelt_z.html?nn=663524.
 9. Average carbon dioxide emissions from new passenger cars, E.E.A. (DK), Editor. 2019: Copenhagen.
 10. Radke, S., Verkehr in Zahlen 2018/2019. 2018: Berlin.
 11. Dauth, W. and P. Haller, Klarer Trend zu längeren Pendeldistanzen. IAB Kurzbericht, 2018.
 12. Hubert, J., Anzahl der Urlaubsreisenden in Deutschland bis 2018. 2019.
 13. Rabe, L., Umsatz durch E-Commerce/Onlinehandel in Deutschland bis 2019. 2019.
 14. Lorenczik et al., Kosteneffiziente Umsetzung der Sektorenkopplung. 2018.
 15. Gerbert et al., Klimapfade für Deutschland. 2018.
 16. Bründlinger, T., et al., dena-Leitstudie Integrierte Energiewende – Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. 2018, Deutsche Energie-Agentur GmbH: Berlin.
 17. Zimmer et al., Endbericht Renewability III. 2016.
 18. Hacker et al., eMobil 2050 – Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. 2014, Öko-Institut e.V.: Berlin.
 19. Nitsch et al., Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. 2011.
 20. Hoyer-Klick et al., Verkehr und seine Umweltwirkungen. 2019.
 21. Blanck et al., Klimaschutz im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030. 2018.
 22. Millinger et al., Model for greenhouse gas optimal allocation of biomass across transport sectors in Germany. Transport. Res. Part D-Transport. Environ., 2019: p. 265-275.
 23. Böttger et al., Cost-optimal market share of electric mobility within the energy system in a decarbonisation scenario, in 15th International Conference on the European Energy Market. 2018: Lodz.
 24. Erlach et al., Optimierungsmodell REMod-D, in Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. 2018.
 25. de Tena et al., Impact of electric vehicles on a future renewable energy-based power system in Europe with a focus on Germany. Int. Journal of Energy Research, 2018: p. 2670-2685.
 26. Robinius, M., et al., Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050 (Kurzfassung). 2019, Forschungszentrum Jülich GmbH: Jülich.

Lösungspfade aus der Systemforschung – Pfade für das Gesamtsystem und Modellierungsansätze



DLR
Dr. Sonja Simon
sonja.simon@dlr.de

Dr. Thomas Pregger
thomas.pregger@dlr.de

Fraunhofer ISE
Dr. Thomas Schlegl
thomas.schlegl@ise.fraunhofer.de

Dr. Christoph Kost
christoph.kost@ise.fraunhofer.de

FZ Jülich
Dr. Martin Robinius
m.robinius@fz-juelich.de

Dr. Peter Markewitz
p.markewitz@fz-juelich.de

UFZ
Prof. Dr. Daniela Thrän
daniela.thraen@ufz.de

Dr. Markus Millinger
markus.millinger@ufz.de

WI
Dr. Peter Viebahn
peter.viebahn@wupperinst.org

1. Einleitung

Ziel der Energiesystemanalyse ist es, technische, ökonomische und politische Entscheidungen im Energiesystem wissens- und informationsbasiert zu unterstützen. Die Energiesystemanalyse beschäftigt sich mit der künftigen Gestaltung des Energiesystems und nutzt Detailinformationen aus allen Bereichen des Energiesystems, um Zusammenhänge und Wechselwirkungen zu analysieren. Mit Hilfe von meist komplexen Modellen werden diese Zusammenhänge quantifiziert und gegenläufige Abhängigkeiten (trade-offs), aber auch win-win-Situationen identifiziert. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, das Energiesystem über die Summe aller Einzelperspektiven hinaus zu verbessern und mögliche Transformationspfade aufzuzeigen.

Ein thematischer Schwerpunkt der deutschen Energiesystemanalyse ist die Energiewende. Im Fokus stehen mittel- bis langfristige Transformationspfade des Energiesystems. Wie die Herausforderungen dieser Transformation aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet werden, stellt der folgende Beitrag vor. Neben einem Überblick der aktuell verwendeten und entwickelten Methoden werden einige Transformationsstrategien beleuchtet, die geeignet sind, diese Herausforderungen zu bewältigen.

2. Perspektiven auf die Transformationspfade

Seit langem liegt der Fokus der Systemanalyse auf der techno-ökonomischen Optimierung des Energiesystems: eine Reihe von Modellen optimiert hinsichtlich der volkswirtschaftlich kostengünstigsten Optionen und Technologiekombinationen einer künftigen Energieversorgung. Die Erreichung gesetzter Ziele der Transformation steht hier im Vordergrund, wie z.B. eines vorgegebenen Anteils an erneuerbaren Energien oder Treibhausgasminderungsziele.

Die Modelle REMix (Gils, Scholz et al. 2017), Fine-NESTOR (Lopion, Markewitz et al. 2019) oder REMod (Palzer, Kost et al. 2018, Sterchele, Henning et al. 2019) setzen unterschiedliche Schwerpunkte. Kontinuierlich wurden und werden sie verbessert: Eine feinere technologische Auflösung ermöglicht, die unterschiedlichen Charakteristika v.a. der neu hinzukommenden Energietechnologien abzubilden

(z.B. fluktuierende Erneuerbare, flexible Stromerzeuger, Speichertechnologien und Elektromobilität). Außerdem wird eine Verbesserung der Modelle durch Abbildung zusätzlicher Restriktionen und eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung angestrebt. Auch erhöhen sich die Anforderungen an die Zielgenauigkeit der Optimierung gegenüber realen Entwicklungen, z.B. durch Berücksichtigung von Unsicherheiten oder die Bewertung der Erreichbarkeit errechneter Energieszenarien.

Beides erhöht die Komplexität der Modellierung, die damit an physische Grenzen der Berechenbarkeit auf üblichen Computern stößt, auf welchen in langwierigen Modellläufen wenige Szenarien errechnet werden. Daher werden derzeit alternative Berechnungsansätze und Beschleunigungsverfahren entwickelt (Parallelisierung, Hochleistungsrechner), die eine schnellere Berechnung einer Vielzahl von Szenarien über einen breiten Parameterraum ermöglichen (Breuer, Bussieck et al. 2019).

Darüber hinaus werden bereits bestehende Modelle gekoppelt und integrierte Modellierungsansätze verstärkt. Dadurch können weitere gesellschaftliche Perspektiven auf die Energiewende betrachtet werden, z.B. ökologische Wirkungen, Akzeptanz oder der Nutzen auf der Ebene von Verbrauchern und Anlagenbetreibern.

Simulationsmodelle untersuchen die Wirkung politischer Maßnahmen auf Märkte und Stakeholder. Das Modell Inve2st (Senkpiel und Berneiser 2019) analysiert die explorative Technologiediffusion innerhalb des Energiesystems und überprüft so die Machbarkeit von Szenarien.

Mit dem agentenbasierten Modell AMIRIS (Deissenroth, Klein et al. 2017) wird z.B. überprüft, wieweit die betriebswirtschaftlich agierenden Akteure im Energiesystem tatsächlich von den volkswirtschaftlich kostenoptimalen Entscheidungen abweichen. Im Sinne der Perspektivenerweiterung nimmt auch die Akzeptanzforschung einen immer größeren Raum in der Energiesystemanalyse ein. Ein Ansatz hier ist die Identifizierung von sozialen Auswirkungen auf lokale Stakeholder sowie die partizipative Bewertung dieser Auswirkungen (Terrapon-Pfaff, Fink et al. 2019) oder die multikriterielle Bewertung von Energieszenarien durch Stakeholder zur Erhöhung der Akzeptanz in der Umsetzung (Zelt, Krüger et al. 2019).

Neben dem globalen Fokus auf CO₂ ist es aber auch Aufgabe der Energiesystemanalyse, ökologische Wirkungen in ihrer Breite zu beleuchten. Denn es ist klar, dass der Umstieg auf erneuerbare Energien zwar vom Verbrauch an fossilen Energieträgern wegführt, gleichzeitig aber mit einer höheren Anlagenzahl und damit einem höheren Materialbedarf einhergeht. Insbesondere der neue Speichersektor führt zu zusätzlichen Umweltwirkungen, die quantifiziert und Verbesserungen in anderen Sektoren gegenüber gestellt werden müssen. Eine methodische Herausforderung ist dabei, die einzelnen Lebenszyklusanalysen für Bewertungen von Gesamtenergiesystemen zu ertüchtigen und viele Dimensionen konsistent abzubilden. Ein Beispiel dafür ist die Kopplung bestehender LCA-Datenbanken mithilfe von OpenLCA mit dem Energiesystemmodell Mesap (Junne, Simon et al. 2019).

Eine künftige Herausforderung ist es, die verschiedenen gesellschaftlichen Optionen gemeinsam zu bewerten. Die Quantifizierung aller Dimensionen wird derzeit durch die Weiterentwicklung und Kopplung der verschiedenen Modelle angestrebt. Künftig werden Methoden der multikriteriellen Bewertung und der multikriteriellen Optimierung hinzukommen, welche die gesellschaftliche Gesamtperspektive abbilden (Junne, Haas et al. 2019). Die Herausforderung liegt hier insbesondere in der Wertung verschiedener Dimensionen zueinander, die eine noch stärkere Integration sozialwissenschaftlicher Methoden und die Übertragung der Ergebnisse in die klassischen Modelle voraussetzt.

3. Technologische Strategien in Energieszenarien für Deutschland

Der methodische Überblick zeigt bereits die Fülle und Bandbreite der von der Energiesystemanalyse adressierten Fragen. Das Folgende konzentriert sich auf Modellierungsergebnisse, die miteinander korrespondieren: Sehr ambitionierte Klimaziele und verschiedene Transformationsoptionen im Verkehrssektor.

3.1 Klimaziel CO₂-Reduktion: vom 80%- zum 95%-Ziel (1.5 °C)

Die Erkenntnis, dass für die Einhaltung des 1.5 °C Ziels bis zur Mitte des Jahrhunderts das Energiesystem seine Klimaemissionen auf Null zurückführen muss, hat in den vergangenen fünf Jahren zu einer Reihe sehr ambitionierter Szenarien geführt, welche Treibhausgase bis zu 95% reduzieren. Ein zentraler Ansatzpunkt der Szenarien bleiben Effizienzmaßnahmen, welche die technischen Verbrauchsreduktionspotenziale heben und als Schlüssel für ein Gelingen der Energiewende darstellen.

► **Abbildung 1** zeigt, welche Potenziale in diesem Bereich noch gehoben werden können und müssen, um die Vereinbarung des Pariser Klimaabkommens einzuhalten. Eine gegenüber Unsicherheiten robuste Maßnahme, die bekanntermaßen auch bei ambitionierteren Szenarien greift, ist hier die energetische Sanierung von Gebäuden (Palzer, Kost et al. 2018, Sterchele, Henning et al. 2019).

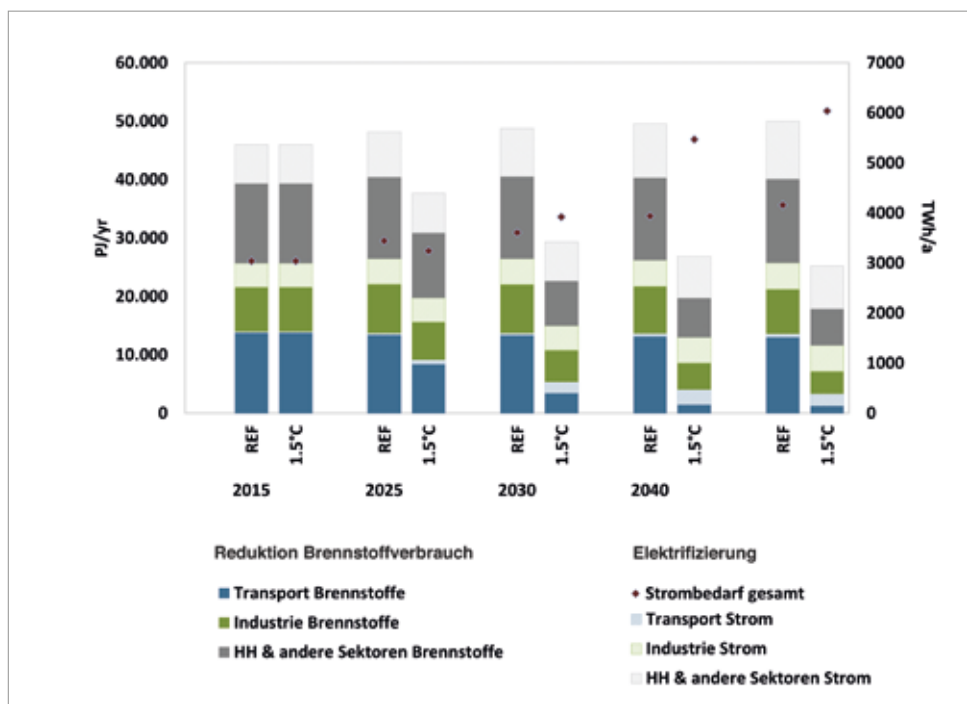


Abbildung 1
Nötige Reduktion des Endenergiebedarfs und Elektrifizierung in Europa zur Erreichung der Pariser Klima-Ziele
 (Teske, Pregger et al. 2019)

Der zweite wichtige Ansatzpunkt ambitionierter Klimaschutz-Szenarien ist die Elektrifizierung auf Basis erneuerbarer Energien.

- Aus den beschriebenen Modellierungen fließt die Erkenntnis, dass immer ambitioniertere Ziele zur Integration erneuerbarer Energien die Komplexität der Wechselwirkungen im Energiesystem erhöhen und die Optimierungsergebnisse stark durch eine Verschärfung von Klimazielen beeinflusst werden.
- Für Deutschland zeigen Optionen flexibler Sektorenkopplung (z.B: Elektrolyseure zur Erzeugung von H₂) unter diesen Rahmenbedingung positive Wechselwirkungen und gewinnen stark an Bedeutung (Gils und Gardian 2019).
- Im Bereich der Biomasse wird durch ambitioniertere Klimaziele eine Verschiebung ihres Einsatzes von der Wärme hin zum Verkehr deutlich – insbesondere unter Einbindung elektrischer Energie zur Bereitstellung von Strom/Biomasse-basierten Kraftstoffen (Thrän, Lauer et al. 2019).
- Als robust gegenüber sich verändernden Klimazielen zeigen sich jedoch Wärmepumpen und Wärmenetze, die in Verbindung mit Wärmespeichern günstige Sektorenkopplung gewährleisten (Palzer, Kost et al. 2018, Gils und Gardian 2019, Sterchele, Henning et al. 2019).

3.2 Energiebereitstellung für den Verkehr

Der Verkehr und die Bereitstellung klimaneutraler Kraftstoffe – auch zur Speicherung von Strom aus erneuerbaren Quellen – stellen innerhalb der Szenarien Schlüsseltechnologien für >95% CO₂-Vermeidung dar. Dabei gilt: eine geringe direkte Elektrifizierung der Nutzenergie wird mit einem Vielfachen an benötigter Leistung zur Erzeugung synthetischer Brennstoffe „bezahlt“. Soll die Energieversorgung

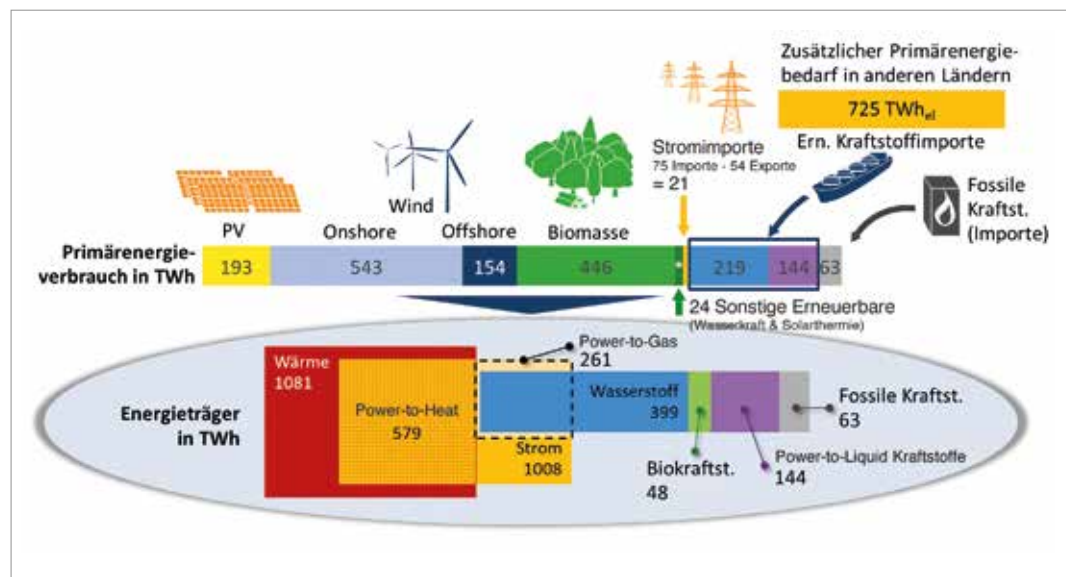
komplett auf Basis erneuerbarer Energien bereitgestellt werden, so werden erhebliche Anteile an strombasierten Kraftstoffen importiert werden müssen (▶ vgl. *Abbildung 2*). Wo und mit welchen Auswirkungen deren Erzeugung erfolgen kann – etwa in Nordafrika und dem Nahen Osten – wird derzeit unter anderem im Projekt MENA-Fuels vertieft untersucht (Wuppertal Institut 2019). Darüber hinaus ist der globale Handel und der Import von Wasserstoff, synthetischen Kraftstoffen und synthetischen Gasen Gegenstand von weiteren Forschungsarbeiten (Heuser et al. 2019).

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Diese Übersicht über aktuelle Methoden und Ergebnisse zeigt, wie die Fragestellungen in der Energiesystemanalyse immer komplexer und kleinteiliger werden. Eine verstärkte Integration simulierender und optimierender Modelle ist unabdingbar, ebenso wie eine Erweiterung der techno-ökonomischen Perspektive auf ökologische, soziale und Akzeptanzaspekte. In allen Forschungseinrichtungen wird dies derzeit mit unterschiedlichen Schwerpunkten vorangetrieben.

Dabei bearbeitet die Energiesystemanalyse zunehmend Fragestellungen für CO₂-Reduktion weit jenseits der heute anvisierten 80%. Damit adressiert sie heute die Herausforderungen der Zukunft, wenn zur Einhaltung der Pariser Klimaziele eine komplette CO₂-Vermeidung im Energiesystem notwendig wird. Die internationale Perspektive ist elementar, weil neue Energiekooperationen die alten Importabhängigkeiten ablösen müssen, um eine vollständige Transformation zu ermöglichen.

Abbildung 2
Beispiel einer Energieversorgung für Deutschland im Jahr 2050 mit 95% reduziertem CO₂-Ausstoß:
 Für eine komplett erneuerbare Energieversorgung würden erhebliche Mengen strombasierter Kraftstoffe importiert werden müssen.
 (Robinius, Markewitz et al. 2019)



Die Energiewende ist heute technisch machbar. Eine Vielzahl von Technologieoptionen steht bereits zur Verfügung oder wird mit Hochdruck entwickelt. Aktuell bestehen die Herausforderungen für die Energiewende vor allem auf gesellschaftlicher Ebene, wobei Akzeptanz sowie die Bewertung sozialer und ökologischer Auswirkungen eine wichtige Rolle spielen. Auch die Verbindung von energiepolitischen und klimapolitischen Herausforderungen – wie sie beispielsweise bei der Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre bestehen – sind bisher in den Energieszenarien nicht beachtet (Klepper und Thrän 2019). Die zentrale Herausforderung für die Gesellschaft ist, diese verschiedenen Aspekte in eine Gesamtbewertung zu integrieren. Für die Energiesystemanalyse bedeutet das, die Indikatoren zu erweitern und neue Methoden wie Multicriteria decision analysis (MCDA) und die Modellierung sozialer Impacts zu entwickeln bzw. zu kombinieren und mit einer partizipativen Bewertung von Energieszenarien zusammen mit Stakeholdern den Weg für eine breite gesellschaftliche Unterstützung zu bereiten.

Für die Forschenden in der Systemanalyse ist daher die wichtigste Herausforderung, die immer komplexeren Zusammenhänge in verständliche Botschaften zu übersetzen, damit Entscheidungstragende und Bevölkerung die Lösungen verstehen, akzeptieren, abwägen und schließlich auch anwenden können.

5. Quellen

- Breuer, T., M. Bussieck, F. Fiand, K.-K. Cao, H. C. Gils, M. Wetzel, A. Gleixner, T. Koch, D. Rehfeldt und D. Khabi (2019). „BEAM-ME – Ein interdisziplinärer Beitrag zur Erreichung der Klimaziele“ OR news : das Magazin der GOR(66): 6–8.
- Deissenroth, M., M. Klein, K. Nienhaus und M. Reeg (2017). „Assessing the Plurality of Actors and Policy Interactions: Agent-Based Modelling of Renewable Energy Market Integration“ Complexity. 2017: 24.
- Gils, H. C. und H. Gardian (2019). Integrated modelling of the future electricity and gas supply in Germany. 5th International Conference on Smart Energy Systems,. Copenhagen, 10–11 September 2019.
- Gils, H. C., Y. Scholz, T. Pregger, D. Luca de Tena und D. Heide (2017). „Integrated modelling of variable renewable energy-based power supply in Europe.“ Energy 123: 173–188.
- Junne, T., J. Haas, J. Wang, S. Moreno, T. Naegler, J. Buchgeister und W. Nowak (2019). Considering Ecological Sustainability in Planning the Future Electricity Supply of Chile – How Much More Does it Cost? . IRES 2019. Düsseldorf, Deutschland.
- Junne, T., S. Simon, J. Buchgeister, M. Saiger und T. Naegler (2019). Integrating future background scenarios for prospective LCA – method and case study on the German energy system. SETAC Europe 29th Annual Meeting. Helsinki, Finland.
- Klepper, G. und D. Thrän, Eds. (2019). Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Potenziale – Technologien – Zielkonflikte. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. München.
- Lopion, P., P. Markewitz, D. Stolten und M. Robinius (2019). „Cost Uncertainties in Energy System Optimisation Models: A Quadratic Programming Approach for Avoiding Penny Switching Effects.“ Energies 12(20).
- Palzer, A., C. Kost und P. Sterchele (2018). Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen. Berlin.
- Robinius, M., P. Markewitz, P. Lopion und et al. (2019). Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050, Forschungszentrum Jülich GmbH.
- Senkpiel, C. und J. Berneiser (2019). Simulating the adoption of electric vehicles under consideration of person-related variables. Social simulation for Policy. Mainz, Deutschland. .
- Sterchele, P., H.-M. Henning und A. Weidlich (2019). Analysis of Technology Options to Balance Power Generation from Variable Renewable Energy. Freiburg, Fraunhofer ISE.
- Terrapon-Pfaff, J., T. Fink, P. Viebahn und E. M. Jamea (2019). „Social impacts of large-scale solar thermal power plants: Assessment results for the NOORO I power plant in Morocco.“ Renewable and Sustainable Energy Reviews 113: 109259.
- Teske, S., T. Pregger, T. Naegler, S. Simon, J. Pagenkopf, B. van den Adel und Ö. Deniz (2019). Energy Scenario Results. Achieving the Paris Climate Agreement Goals: Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for +1.5°C and +2°C. S. Teske. Cham, Springer International Publishing: 175–401.
- Thrän, D., M. Lauer, M. Dotzauer, J. Kalcher, K. Oehmichen, S. Majer, M. Millinger und M. Jordan (2019). Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO), DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum, UFZ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung.
- Wuppertal Institut. (2019). „MENA-Fuels – Roadmaps zur Erzeugung nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe im MENA-Raum zur Dekarbonisierung des Verkehrs in Deutschland.“ Retrieved 21.10.2019, von <http://www.wupperinst.org/Mena-Fuels/>
- Zelt, O., C. Krüger, M. Blohm, S. Bohm und S. J. E. Far (2019). „Long-term electricity scenarios for the MENA region: assessing the preferences of local stakeholders using multi-criteria analyses.“ Energies 12(16): 3046.

Wärmebereitstellung in Privathaushalten – Lösungen für eine CO₂-freie Energiebereitstellung



IZES
Bernhard Wern
wern@izes.de

DBFZ
Dr. Volker Lenz
volker.lenz@dbfz.de

DLR
Evelyn Sperber
evelyn.sperber@dlr.de

GFZ
Dr. Ali Saadat
ali.saadat@gfz-potsdam.de

Fraunhofer IEE
Dr. Dietrich Schmidt
dietrich.schmidt@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE
Dr. Peter Engelmann
peter.engelmann@ise.fraunhofer.de

FZ Jülich
Dominik Hering
d.hering@fz-juelich.de

Dr. André Xhonneux
a.xhonneux@fz-juelich.de

ISFH
Dr. Federico Giovannetti
f.giovannetti@isfh.de

KIT
Dr. Ferdinand Schmidt
ferdinand.schmidt@kit.edu

UFZ
Matthias Jordan
matthias.jordan@ufz.de

Dr. Sebastian Strunz
sebastian.strunz@ufz.de

ZAE
Dr. Hans-Peter Ebert
hans-peter.ebert@zae-bayern.de

Einleitung

Der Ausbau regenerativer Wärme stagnierte 2010 bis 2018 bei einem Anteil von 11,5–13% am gesamten Wärmebedarf (BMWi 2019). Dabei entfielen 59% des Wärmebedarfes auf die niederkalorische Nutzung von Wärme in Privathaushalten, dies entspricht 32% des bundesdeutschen Endenergiebedarfes und ist somit eine relevante Größe der Energiewende (BMWi 2019).

Biomasse stellt mit 86% den Großteil der regenerativen Wärme (► vgl. *Abbildung 1*) und leistet somit bisher neben der Haussanierung den Hauptbeitrag für die Wärmewende.

Biomasse ist jedoch für alle Sektoren ein wichtiger Energieträger (vgl. z.B. Schlesinger et al. 2014 oder Fehrenbach et al. 2019), der viele Zwecke erfüllen muss, und zusätzlich auch verstärkt in der Bioökonomie nachgefragt werden wird.

Steigende Kosten der fossilen Wärmebereitstellung erhöhen dabei die Bereitschaft zur Wärmewende, wie Beispiele in Dänemark oder Schweden zeigen. Lag noch vor 15 Jahren der Richtpreis der OPEC pro Barrel Rohöl bei etwa 30 Dollar, so hat sich der Ölpreis – unter einigen Schwankungen – bis heute mehr als verdoppelt. Zusätzlich möchte die Bundesregierung durch eine CO₂-Abgabe im Rahmen des Klimapaketes fossile Energieträger auch im Wärmebereich verteuern. Deutschland steht also vor der Aufgabe, die künftige Wärmeversorgung unter den Notwendigkeiten des Klimaschutzes neu zu definieren.

Die Wissenschaft hat mit z.B. Schlesinger et al. (2014) gezeigt, wie die Wärmebereitstellung der Zukunft grundsätzlich aussehen könnte (Greenfield-Ansatz). Angesichts zu geringer Sanierungsraten im Gebäudebestand muss aber auch sie sich der Frage stellen, wie die Transformation hin zu einem ökologisch und wirtschaftlich tragfähigen System gesamtgesellschaftlich – damit verbunden ist die Frage der Akzeptanz – zu bewerkstelligen ist.

Der vorliegende Artikel zeigt vor diesem Hintergrund zunächst die mögliche Entwicklung der Wärmenachfrage und der Energieträger im Sektor der Privathaushalte auf. Dies erfolgt unter Berücksichtigung begrenzter Biomassepotenziale. Die Fragestellung hierbei ist, welche Ziele bis 2050 erreicht werden sollen und welche Herausforderungen dabei zu meistern sind.

Danach werden Lösungsmöglichkeiten der alternativen Wärmeversorgung beschrieben, um eine Auswahl verschiedener Technologien darzustellen, mit der die Wärmewende auch praktisch gelingen könnte. Im dritten Teil des Beitrages werden Schlussfolgerungen gezogen und weitere Forschungsbedarfe definiert.

Wärmenachfrage und Energieträger

Die Wärmenachfrage im Gebäudebereich muss durch eine gezielte Sanierung reduziert werden. In einer Studie für den BDI haben dabei Gebert et al. (2018) herausgearbeitet, dass bei einer Erreichung einer 95%-igen Reduktion der Treibhausgasemissionen auch der Gebäudebereich nahezu CO₂-neutral sein muss. Die Energieeinsparverordnung (EnEV) als Beispiel normativer Regelungen brachte zwar durch ambitionierte Energierichtwerte im Neubaubereich eine große Reduktion des Raumwärmebedarfs pro Kopf von durchschnittlich 200 kWh auf 150 kWh pro m² und Jahr in den letzten 20 Jahren. Gleichzeitig ist jedoch die Wohnfläche pro Kopf gestiegen, sodass sich durch diesen Rebound-Effekt der Raumwärmebedarf absolut wenig verändert hat.

► *Abbildung 2* zeigt wie sich künftig je nach Szenario der Endenergiebedarf des Gebäudesektors stark verringern soll.

Die verschiedenen Szenarien berechnen eine unterschiedlich starke Verringerung des derzeitigen Endenergiebedarfes von ca. 1.000 TWh auf 360–660 TWh im Jahr 2050, wobei ein verstärkter Einsatz von elektrischen Wärmepumpen (Strom) mit einer Verminderung des Endenergiebedarfs einhergeht.

In den Szenarioannahmen aller Studien, die auf eine 95%-Verringerung der THG-Emissionen gegenüber 1990 abzielen, ist unterstellt, dass Importe von Energieträgern eine große Rolle spielen.

In den meisten Studien stellt Strom (z.B. in Form von Wärmepumpen) den höchsten Anteil an der Energiebereitstellung.

Wärmenetze nehmen nur in einem Szenario (S95) eine sehr viel stärkere Bedeutung ein.

Die Anteile von Heizölen sind in den Szenarien grundsätzlich sehr gering, wohingegen der Anteil von Gasen (biogenen und fossilen) nach wie vor sehr

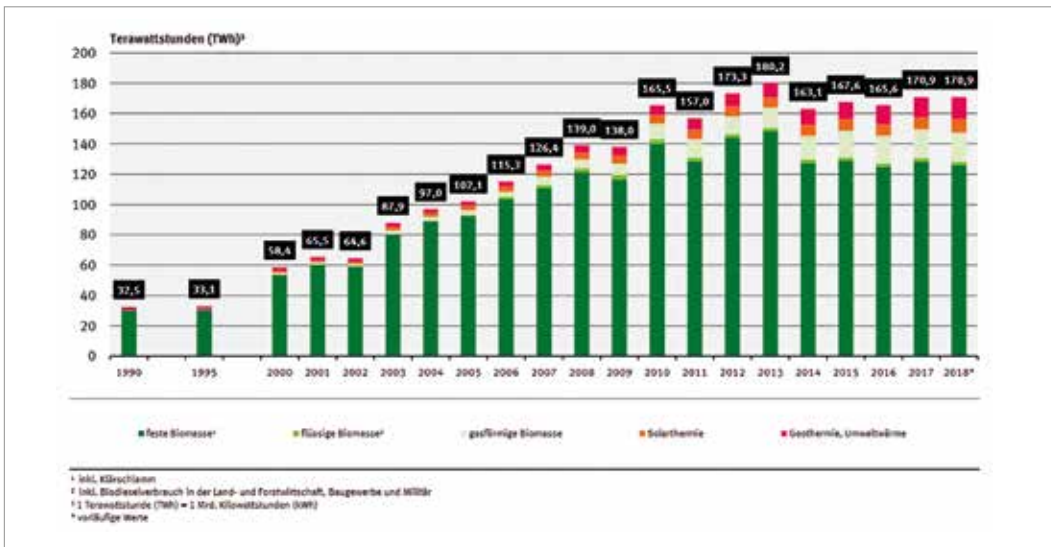


Abbildung 1
Entwicklung des Wärmeverbrauchs aus erneuerbaren Energien.
 Quelle: UBA auf Basis AGEE-Stat, Stand 02/2019

hoch ist. Eine Ausnahme stellen Szenarien dar, die auf eine verstärkte Strombereitstellung der Wärme zielen. Biomasse hat dagegen eine abnehmende Bedeutung, v.a. in den strombasierten Szenarien dieser beiden Studien. Die Autoren beschreiben dabei, dass eine 100%ige Wärmeversorgung mit Strom nicht zielführend ist.

Die bisher genannten Arbeiten betrachten Szenariensätze, bei denen alle Anlagen neu errichtet und somit je nach Optimierungsziel verschiedene Technologien eingesetzt werden (Greenfield Ansatz). Die Frage ist jedoch, wie sich eine bestehende Region mit ihren realen Gegebenheiten transformieren lässt hin zu diesen aus Gesamtsystemsicht optimalen Wärmeversorgungsoptionen. Hierzu haben Baur et al. (2016) für die Region Eifel und Trier in Rheinland-Pfalz eine Bottom-up-Analyse entwickelt. Ziel war es, die Möglichkeiten einer endogenen autarken Energieversorgung zu untersuchen. Ein Ergebnis war, dass trotz hoher Sanierungsanstrengungen die in der Region bereitstellbare erneuerbare Energie für den Wärmesektor insgesamt (Industrie, GHD und Privatgebäude)

nicht ausreicht; v.a. die Industrie braucht dabei die Biomasse in einem solchen Ausmaß, dass Privathaushalte ohne holzartige Biomasse in Einzelfeuerungen auskommen müssten. Jordan et al. (2019) kamen in einem nach Kosten optimierenden Modell v.a. bei hohen CO₂-Minderungszielen (minus 95%) in einer Betrachtung für ganz Deutschland für das Jahr 2050 zu ähnlichen Ergebnissen. Der „Wärme-Leistungsträger“ Biomasse muss also nach und nach ersetzt werden.

Die zweite Herausforderung bei der Betrachtung regionaler Daten ist, dass es Regionen mit hohen Anteilen von schlecht saniertem älterem Gebäudebestand an Hauptstraßen gibt. Gerade hier ist jedoch abgesehen von prosperierenden Großstädten auf Grund des niedrigen Mietzinses keine hohe Sanierungsquote zu erwarten (IZES 2017). Hier könnten Wärmenetze in Frage kommen, die jedoch in den letzten zehn Jahren einen eher verhaltenen Zubau hatten. Ein Zubau um den Faktor 6 bis 7 gegenüber dem heutigen Anstieg wäre notwendig, um gerade auch diese Quartiere zu versorgen (Gerhardt et al. 2019).

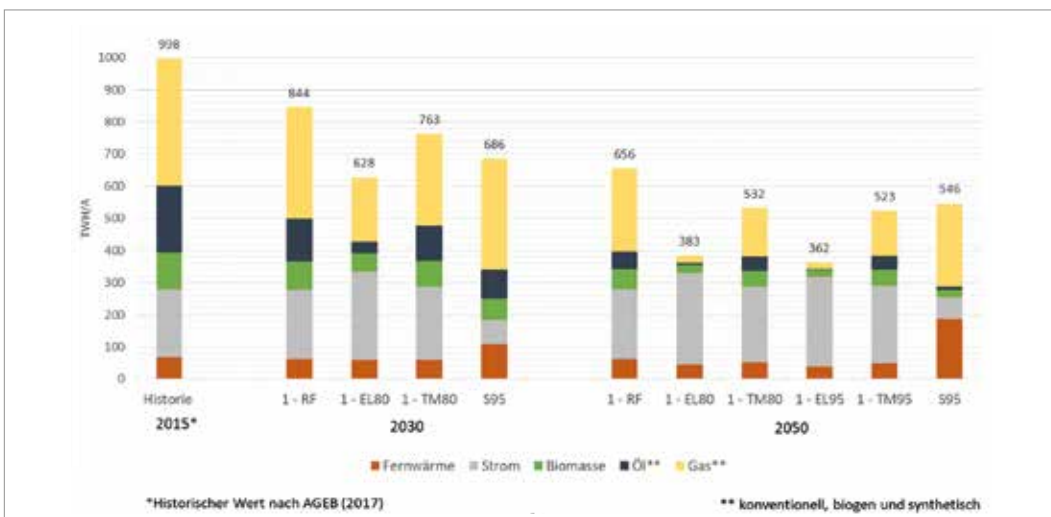


Abbildung 2
Künftiger Endenergiebedarf des Gebäudesektors nach Energieträger in TWh/a
 Quelle: Bründlinger et al. (2018) und Henning et al. (2019)

Es sollten somit – neben der immer zu überlegenden Dämmung der Gebäude – v.a. zielgerichtete erneuerbare Wärme-Lösungsansätze Berücksichtigung finden, die folgende Bedingungen erfüllen:

- möglichst technologieoffen
- dabei aber Biomasse möglichst nur in systemdienlicher Wärme-Kraft-Kopplung und zusammen mit anderen erneuerbaren Wärmequellen in Wärmenetzen einsetzen
- für Häuser mit einem niedrigen Wärmeverbrauch niederkalorische Anwendungen fokussieren
- bei einem hohen Wärmeverbrauch Sonderlösungen bereitstellen

Lösungsansätze einer nachhaltigen Wärmeversorgung

Die Grundlage einer nachhaltigen Wärmeversorgung ist eine umfassende, langfristige Wärmeplanung vor Ort. Anders als zum Beispiel in Dänemark ist die kommunale Wärmeplanung in Deutschland bislang kein integrativer Bestandteil der Raum- bzw. Bauleitplanung und fällt somit nicht in den Bereich der Daseinsvorsorge. In einigen Bundesländern (u.a. Baden-Württemberg, Berlin und Niedersachsen) wird dennoch aktuell bereits an Lösungen gesucht, um die kommunale Wärmeplanung zu institutionalisieren.

Wärmekataster

Einen Ansatz hierfür bieten sogenannte Wärmekataster oder auch Wärmealanten, die in unterschiedlichen Detaillierungsgraden sowohl auf Bundes-, Landes- als auch auf kommunaler Ebene aufgebaut worden sind. Ziel eines Wärmekatasters ist es, den Gebäudebestand wärme(bedarfs)seitig zu analysieren, um anschließend auf Grundlage der lokal vorhandenen Wärmeversorgungspotenziale (industrielle oder sonstige Abwärme, Solarthermie, Geothermie, Biomasse usw.) eine nachhaltige Versorgungsstrategie für einzelne Gebiete und Regionen zu entwickeln.

Ein weiteres Anwendungsgebiet des Wärmekatasters ist die Identifizierung von möglichen Sanierungsgebieten. Somit können die Ergebnisse des Wärmekatasters auch als Grundlage für die energetische Quartierssanierung in Städten und Gemeinden dienen. Forschungsvorhaben (u.a. Becker et al. 2018) arbeiten aktuell daran, Wärmekataster weiterzuentwickeln.

Energieversorgungskonzepte für Gebäude

Zukunftsfähig sind ebenso integrale nachhaltige Energieversorgungskonzepte für Gebäude, die neben der Wärmeversorgung auch den zukünftig steigenden Bedarf an Klimakomfort berücksichtigen.

Ein Beispiel ist die 2019 in Betrieb genommene Umweltstation der Stadt Würzburg. Hier wurde im Rahmen eines DBU-geförderten Projekts (DBU 2019) eine Kombination aus Solar-Luft-Kollektoren, Sole-Wasser-Wärmepumpe, PV-Anlage und zentralem Eisspeicher als Wärme- bzw. Kältereservoir installiert. Eine wesentliche Voraussetzung für den wirtschaftlichen Betrieb eines solchen Systems ist eine energieeffiziente Gebäudehülle.

Als ein Beispiel für eine Sanierung von Bestandsquartieren mit innovativen Lösungen kann der „Lagarde Campus“ in Bamberg dienen, wo eine Wärmeversorgungslösung u.a. mit einem Niedertemperaturnetz für Bestands- und Neubauten im Rahmen des Förderkonzepts Wärmenetzsysteme 4.0 realisiert wird (Kaiser und Loskam 2019).

Emissionsarme Einzelraumfeuerstätten (z.B. mit Blauem Engel) mit Wassertasche können des Weiteren – intelligent in die Gebäudewärmeversorgung mit Wärmepumpen integriert – dazu beitragen Strombedarfsspitzen im Winter (mehrere GW elektrischer Leistung) gezielt zu vermeiden und damit die die Stromnachfrage in einer Jahreszeit mit wenig PV-Einspeisung zu verringern.

In einem weiteren Beispiel wird auf dem Campus der Forschungszentrum Jülich GmbH im Zuge des „Living Lab Energy Campus“-Projektes ebenfalls ein Niedertemperaturnetz realisiert. In diesem Projekt wird Abwärme aus einem Supercomputer zu umliegenden Gebäuden verteilt und dort über Wärmepumpen zur Bereitstellung von Heizenergie genutzt. So soll ohne Renovierung der Primärenergiebedarf der Bestandsgebäude durch Abwärmeintegration gesenkt werden. (Hering et al. 2019)

Forschungsbedarfe

Neben diesen beispielhaften planerischen und technischen Lösungen müssen jedoch auch weitere Lösungen erarbeitet werden, da aus Sicht der Autoren die genannten Lösungen noch nicht ausreichen werden.

So sind derzeit 11,2 Mio. Holzeinzelfeuerungen in Wohnhäusern verbaut (ZIV 2018), die im Sinne des Klimaschutzes eigentlich nach und nach durch andere intelligentere Heizungsoptionen und -konzepte ersetzt werden müssten.

Eine andere Herausforderung stellt die Wohnungsgröße pro Einwohner dar, die vielfach aufgrund sich ändernder Lebensumstände zu hoch ist (z.B. Kinder ziehen aus). Somit gibt es v.a. auch in der Sozialforschung erheblichen weiteren Forschungsbedarf, der das Ziel hat, die Transformation zusammen mit den Bürgern zu gestalten.

Fazit

Der Anteil von erneuerbaren Energien im Wärmesektor stagniert seit Jahren auf einem niedrigen Niveau. Im Sinne der Ziele des Klimaschutzes sollten jedoch bis 2050 (fast) keine fossilen Energieträger mehr zur Wärmeversorgung eingesetzt werden. Dies stellt eine sehr hohe Herausforderung dar.

Technologische und planerische Lösungen wurden seitens der Wirtschaft und der Wissenschaft erarbeitet:

- Einige Quartiere könnten durch moderne „niederkalorische“ Wärmenetze z.B. mit Sonnenwärme versorgt werden.
- Bessere Wohnlagen mit jüngerer Bausubstanz könnten zu Passivhausquartieren entwickelt werden. Bei der Kombination einer schlechten Bausubstanz mit einer für Investoren unattraktiven Wohnlage ist dagegen nicht zu erwarten, dass in absehbarer Zeit in eine vollumfängliche energetische Sanierung investiert wird. Hier könnte ein Wärmenetz oder bei zu geringen Anwohnerzahlen ein punktueller Siedlungsrückbau angedacht werden.
- Ein weiterer wichtiger Punkt betrifft insbesondere in hochverdichteten urbanen Siedlungsräumen das Bereitstellen von Quellenergie für elektrische Wärmepumpen. Mit einer steigenden Durchdringung der Elektrifizierung in der Heizungstechnik wird sich in Zukunft hier nicht mehr die nur Frage nach den Möglichkeiten vor Ort stellen, sondern auch danach, wie dies z.B. mit einem niederkalorischen Fernwärmenetz realisiert werden kann.
- Ein Wärmekataster bietet eine gute Grundlage für die Planung künftiger Wärmeinfrastrukturen, von Schwerpunktgebieten der energetischen Sanierung oder für die Erarbeitung spezifischer Förderungen.
- Biomasse sollte im Wohngebäudebereich möglichst sparsam eingesetzt werden, da auch in anderen Bereichen (z.B. Systemstabilität im Stromsektor sowie Prozessenergie) Biomasse verstärkt nachgefragt werden wird. Dabei hat sie auch die Aufgabe, in der Nachbarschaft liegende Gewerbegebiete oder Industrieanlagen in Verbindung mit anderen erneuerbaren Energien mit hochkalorischer Wärme sicher zu versorgen. Gerade in diesem Industrie- oder Gewerbegebiet sind Arbeitsplätze für die Region vorhanden, die durch eine mit Biomasse abgesicherte Wärmeversorgung zukunftsfester werden.

Diese Lösungen werden jedoch noch nicht genügend eingesetzt. Es bedarf einer Forschung im Sinne einer kulturellen Transformation inklusive der notwendigen Methoden zur Überzeugung der Betroffenen, wie es z.B. Schneidewind (2018) fordert.

Eine wichtige Maßnahme zur Zielerreichung ist dabei u.a. die Suffizienz, d.h. Mehr vom Weniger. So sollte

z.B. die Wohnfläche pro Kopf wieder fallen, neue Wohnformen könnten etabliert werden und eine flexiblere Anpassung der Wohnungsgröße über die verschiedenen Lebenszyklen muss möglich werden.

Eine aktiv voran getriebene Wärmewende könnte eine Möglichkeit sein, die Attraktivität einer Kommune oder einer Region im Sinne der Vorreiterrolle für den Klimaschutz für Unternehmen und neue Mitbewohner zu stärken. Dabei ist eine langfristige interkommunale Planung und frühzeitige, glaubwürdige Einbindung der Einwohner unerlässlich.

Literaturverzeichnis

- Baur, F. Noll, F.; Vogler, C.; Wern, B.; Mees, M.; Steinert, M.; Wiedemeyer, N.; Beyer, S.; Hill, A.; Gebauer, M.; Bauschinger, T.; Kornmann, A.; Menke, C.; Barton, M. (2016): Wärmestudie Region Eifel und Trier. Endbericht im Auftrag des MWKEL Rheinland-Pfalz, Saarbrücken (IZES) und Mainz (MWKEL)
- Becker, D.; Noll, F.; Wern, B.; Ludwig, D.; Schörder, I. (2018): Dynamisierung von Wärmekatastern – Entwicklung und Erprobung technischer Ansätze zur Dynamisierung von kommunalen Wärmekatastern. Projektbericht zum Vorhaben Dynamika, FKZ 03ET1397A-B, gefördert vom BMWi, Saarbrücken und Hannover
- BMWi (2019): Energiedaten: Gesamtausgabe. Stand: Oktober 2019, erhältlich unter www.bmwi.de
- Bründlinger, T. et al. (2018): Dena-Leitstudie Integrierte Energiewende—Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Veröffentlicht von Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), ewi Energy Research & Scenarios
- DBU (2019): Hell, luftig und umweltfreundlich: Neubau mit Recyclingbeton. DBU aktuell 06/2019. https://www.dbu.de/708artikel38373_2486.html, Stand 09.12.2019
- Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Wern, B.; Pertagnol, J.; Baur, F.; Hünecke, K.; Dehoust, G.; Bulach, W.; Wiegmann, K. (2019): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor), Abschlussbericht, Herausgeber Umweltbundesamt, UBA 115/2019
- Gerbert et al. (2018): Klimapfade für Deutschland. Im Auftrag des BDI. BCG und prognos. Januar 2018
- Gerhardt, N. et al. (2019): Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95% THG Klimazielszenarien. Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE). Februar 2019

- Henning, H.M. et al. (2019): Integriertes Energiekonzept 2050 – Strom Wärme Verkehr Industrie, Hrsg. NOW GmbH (2019)
- Hering, D., Xhonneux, A and Müller, D. 2019. (in press) Economic and Ecologic Evaluation of Low Temperature Waste Heat Integration into Existing District Heating. Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA
- IZES (2017): Wärmekataster Saarland. Endbericht, im Auftrag des MWAEV, Saarbrücken
- Jordan, M.; Lenz, V.; Millinger, M.; Oehmichen, K.; Thrän, D. (2019): Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach. Energy 189 (2019) 116194
- Kaiser, J. und Loskarn, S. (2019): Entwicklung eines Strom-, und Wärmekonzeptes auf Quartiersebene unter Berücksichtigung von Sektorenkopplung für den Lagarde Campus Bamberg. Vortrag, Berliner Energietage 2019. Berlin 20.05.2019
- Schlesinger et al. (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Projekt Nr. 57/12. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Prognos AG, EWI, GWS.
- Schneidewind (2018): Die große Transformation. Eine Einführung in die Kunst des gesellschaftlichen Wandels. Herausgegeben von Klaus Wiegandt und Harald Welzer, Forum für Verantwortung
- ZIV (2018): Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks. Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks – Zentralinnungsverband (ZIV) 2018, Sankt Augustin

Was leisten Forschungsinfrastrukturen als Inkubator für die Energiewende?

Um die national und international gesetzten Energie- und Klimaziele zu erreichen, hat sich Deutschland auf den Weg eines tiefgreifenden Umbaus seines Energiesystems begeben. Für die Transformation hin zu einer weitgehend treibhausgasneutralen Volkswirtschaft soll ein überwiegend auf regenerativen Energiequellen aufbauendes Energiesystem entstehen und die Energieverbräuche sollen in allen Sektoren drastisch reduziert werden.

Noch vor wenigen Jahren lag der Fokus der Energieforschung im Kontext der Energiewende überwiegend auf der Entwicklung effizienter Technologien und der technischen Erschließung erneuerbarer Energiequellen. Doch es zeigte sich, dass Ansätze, die auf einzelne Technologien fokussieren, bei der Erreichung der Energie- und Klimaziele an Grenzen stoßen. Unter den Prämissen Klima- und Umweltschutz, Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und gesellschaftliche Akzeptanz, sind heute die technischen Optionen stets in einen systemischen Kontext zu stellen: Die Energieforschung umfasst zunehmend das Zusammenwirken der Gesamtkette Energiegewinnung, Übertragung/Verteilung, Speicherung und Nutzung, die Berücksichtigung gesamter Lebenszyklen von Produkten und Produktionsketten, das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen technologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen sowie die sich räumlich und ökologisch ausprägenden Effekte im Kontext einer Energiesystemtransformation.

Für das Stromsystem, welches traditionell für die Erzeugung und Verteilung auf Grundlage eines zeitgleichen und räumlich nahen Verbrauches errichtet und optimiert wurde, sind künftig völlig neuartige Konzepte der Netzarchitektur und Regelung erforderlich, welche derzeit erst in den Grundzügen bestimmbar sind: Die Bedeutung von Sektorenkopplung, Speicherkapazität, regelbaren Lasten, sowie des Ausbaus von Übertragungs- und Verteilnetzen sind allen Akteuren bewusst.

Die für diese Transformation notwendigen, erheblichen und langfristigen Investitionen erfordern Informationen darüber, wie diese künftige Architektur optimal auszulegen ist, insbesondere um die Anforderungen an die Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit zu erfüllen.

Die Forschungsinfrastrukturen schließen hier eine Lücke zwischen der kleinmaßstäblichen Forschung und Entwicklung und der großmaßstäblichen Anwendung.

Beispiele am UFZ

Am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung wurde im Juni 2019 eine neue interaktive WebGIS-Anwendung (webbasiertes GeoInformationssystem) freigeschaltet. Der sogenannte „EE-Monitor“ ermöglicht dem interessierten Nutzer eine virtuelle Reise in die Vergangenheit der erneuerbaren Energien. Kartographisch kann die zeitliche und räumliche Entwicklung im Strombereich in den vergangenen 30 Jahren in Deutschland nachvollzogen werden. Basis für diese Anwendung bildet ein Datensatz, der durch ein interdisziplinäres Wissenschaftlerteam unter Leitung des UFZ erarbeitet wurde (alle bis 2015 errichteten Anlagen für Windenergie, Photovoltaik, Bioenergie- und Wasserkraft).

Im Unterschied zu den großen und räumlich konzentrierten fossilen Kraftwerken sind die Erneuerbare-Energien-Anlagen in hoher Anzahl dezentral im Raum angeordnet. Ihr Ausbau geht mit einem deutlich höheren Flächenbedarf sowie einer breiter gestreuten und weit in den Raum hineinreichenden Wirkung einher. Die Erfassung der räumlichen Lage und der räumlichen Beziehungen der Erneuerbare-Energien-Anlagen ist deswegen ein wichtiger Baustein für das Verständnis ihrer Wirkungen auf Natur, Landschaft und Gesellschaft. Das WebGIS und die darunterliegende Datenbasis ermöglichen neue Analysemöglichkeiten von hoher regionaler aber auch nationaler Aussagekraft.

Planern und Vertretern von Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Forschung ermöglicht die WebGIS-Anwendung einen direkten und kostenfreien Zugang zu dieser wissenschaftlich aufbereiteten Datenbasis. Geoinformationen gewinnen aber über die Fachwender hinaus auch an Bedeutung für die Öffentlichkeit. Auf unkomplizierte Art und Weise kann so jeder den Ausbau der erneuerbaren Energien zu Stromerzeugung in einer bestimmten Region oder einem Bundesland in Erfahrung zu bringen.



KIT

Prof. Dr. Joachim Knebel
joachim.knebel@kit.edu

Dr. Siegfried Bajohr
siegfried.bajohr@kit.edu

Prof. Dr. Veit Hagemeyer
veit.hagemeyer@kit.edu

Prof. Dr. Jörg Sauer
j.sauer@kit.edu

DLR

Bernhard Milow
bernhard.milow@dlr.de

Dr. Karsten von Maydell
karsten.maydell@dlr.de

Fraunhofer IEE

Dr. Norbert Henze
norbert.henze@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE

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

FZ Jülich

Dr. Stefan Kasselmann
s.kasselmann@fz-juelich.de

Dr. André Xhonneux
a.xhonneux@fz-juelich.de

UFZ

Dr. Katja Bunzel
katja.bunzel@ufz.de

Mario Liebergesell
mario.liebergesell@ufz.de

Abbildung 1
Ziele der Energiewende

(Bildquelle:
Bundeswirtschaftsministerium
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/energiewende.html>)



Die WebGIS Anwendung sorgt für hohe Transparenz über den räumlichen und zeitlichen Ausbau der erneuerbaren Energien und trägt so zur Akzeptanz für die Energiewende bei.

Beispiele am IEE

Das Fraunhofer IEE verfügt über umfangreiche Testeinrichtungen, Labore und Geräteausstattungen und bietet damit eine innovative und zukunftsorientierte Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur.

Im Testzentrum für intelligente Netze und Elektromobilität (SysTec) werden neue Betriebsmittel und Betriebsverfahren für intelligente Nieder- und Mittelspannungsnetze entwickelt und getestet. Weiterhin werden hier die Netzintegration und Netzkopplung von Elektrofahrzeugen und deren Versorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien sowie Photovoltaiksysteme, Windenergieanlagen, Speicher- und Hybrid-systeme unter realen Bedingungen untersucht.

Im Forschungs- und Prüflabor zur Netzintegration (PNI) werden Netzkomponenten und Netzbetriebsmittel hinsichtlich neuer System Funktionen realitätsnah entwickelt und geprüft. Schwerpunkt des PNI sind Untersuchungen und Tests an der Netzschnittstelle von Speichern, Generatoren auf der Basis erneuerbarer Energien, Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, regelbaren Verbrauchern, Elektrofahrzeugen, und regelbaren Transformatoren.

Im Test- und Prüflabor für Elektromobilität (TPE) hat das Fraunhofer IEE das Know-how zu realen und virtuellen Entwicklungsumgebungen für Lithium-Ionen-Batterien, Ladeeinheiten und Netzsimulatoren gebündelt. Ein Schwerpunkt ist die Simulation und Echtzeit-Emulation von Lithium-Ionen- und Blei-Säure-Batterien, die das Klemmenverhalten realer Batterien sehr präzise nachbilden. Dadurch sind schnell und kostengünstig Hardwaretests möglich, die sonst nur sehr aufwändig und zeitintensiv zu realisieren sind.

Hardware-in-the-Loop (HIL) ist eine Methode um Labor- und Simulationsumgebungen miteinander zu kombinieren. Die Vorteile von Netzsimulationen werden in die laboratorische Infrastruktur integriert,

um komplexe Smart Grid-Technologien in ihrer gesamten Funktionsbandbreite zu prüfen. Weiterhin kann der Beitrag von dezentralen Erzeugeranlagen zur Netzstabilität und Netzoperation in einer realitätsgetreuen Testumgebung analysiert werden. In einer Power Hardware in the Loop (P-HIL)-Umgebung werden Komponenten unter realitätsnahen Betriebsbedingungen analysiert, in dem bspw. Leistungsflüsse zwischen einem Prüfling und dem Netz mittels Echtzeitsimulation berücksichtigt werden.

Am Hessischen Biogas-Forschungszentrum (HBFZ) in Bad Hersfeld betreibt das Fraunhofer IEE eine Forschungsbiogasanlage. Damit wird die Forschung zu Power-to-Gas (PtG) unter realen Bedingungen einer landwirtschaftlichen Biogasanlage ermöglicht. Die Plattform bietet eine technische Infrastruktur mit einer Rohbiogaskonditionierung, unterschiedliche Entschwefelungsverfahren sowie verschiedene Speicher- und Verwertungsmöglichkeiten für das Produktgas. Mit dem Aufbau der PtG-Testplattform am HBFZ wurde die Möglichkeit geschaffen, diese Technologie in verschiedenen Varianten, im technischen Maßstab und unter Realbedingungen zu untersuchen. Am HBFZ ist eine ganzheitliche Betrachtung der Systemintegration sowohl in die Land- als auch in die Energiewirtschaft möglich, was zu nachhaltigen Lösungen führt.

Beispiele am DLR

Das Emulationszentrum für Vernetzte Energiesysteme – NESTEC – des DLR-Institutes für Vernetzte Energiesysteme am Standort Oldenburg ist eine Laborplattform. Hier können Verteilnetzstrukturen wie ein Wohnquartier (wie zum Beispiel das Reallabor ENaQ in Oldenburg) oder auch ein Verteilnetzareal im Labor mit Hilfe elektrotechnischer Geräte und Netznachbildungen emuliert werden. Ein Fokus liegt hierbei auf der Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. So bietet das Labor die Möglichkeit, KWK-Anlagen oder Wärmepumpen direkt in die Verteilnetzstruktur einzukoppeln. Es können bis zu 18 Prosumer-Einheiten, mehrere Speichereinheiten sowie Elektroautos innerhalb eines Verteilnetzareals mit Hilfe von Netznachbildungen verkoppelt werden.

Die einzelnen Komponenten werden über ein Echtzeitsimulationssystem angesteuert. Mit Hilfe einer Netzleitwarte kann die Verteilnetzstruktur geregelt werden. Das Labor schließt somit die Lücke zwischen Reallaborbetrieb und Simulation.

An den Instituten für Solarforschung und Technische Thermodynamik des DLR an den Standorten Köln und Jülich und Almería (Spanien) sind Forschungsinfrastrukturen aufgebaut bzw. teilweise noch im Aufbau, die Forschung vom Labormaßstab bis zu realen Betriebsmodi erlauben. Für solarthermische Kraftwerke (CSP) werden im Sonnenofen, der weltweit größten künstlichen Sonne Synlight® und mehreren CSP-Anlagen im Megawattbereich die Machbarkeit neuer Konzepte bis hin zum effizienten Betrieb bewährter Technologien gezeigt. Die TESIS-Anlage erlaubt die Forschung an Großspeichern zur Wärmespeicherung mit flüssigen Salzschnmelzen. Durch die Anlagen und ihre komplementäre Kombination können die Technologien in verschiedenen Skalen untersucht werden.

Beispiele am ISE

„EnStadt:Pfaff“ ist eines von sechs Leuchtturm-Projekten für nachhaltige Stadtentwicklung, die von BMWi und BMBF gemeinsam gefördert werden. EnStadt:Pfaff ist als Reallabor konzipiert, da die Planung und Demonstration gemeinsam mit den Akteuren vor Ort erfolgt und durch die sozialwissenschaftliche Begleitung auch die Prozesse zur Integration von Energiewendetechnologien in die Umsetzung erprobt, begleitet und analysiert werden (z.B. die Integration von Energie- in die Bauleitplanung).

Die Kooperation der Stadt Kaiserslautern (als Eigentümerin und Entwicklerin des Geländes) mit Unternehmen (z.B. die neuen Eigentümer der Bestandsgebäude) sowie fünf Forschungsinstituten (interdisziplinär: Energie, Mobilität, Digitales, Blockchain, Stadtbau- typologien etc.) ist Voraussetzung für eine gemeinsame Entwicklung von Lösungen für die Implementierung innovativer Konzepte und Technologien.

Die einzelnen demonstrierten Technologien, Werkzeuge und Methoden sind innovativ und up to date, wurden aber meist schon an anderer Stelle demonstriert.

Einzigartig wird das Projekt dadurch, dass eine so große Zahl innovativer Technologien und Ansätze aus unterschiedlichen Disziplinen zu einem Gesamtsystem integriert werden.

In den ersten zwei Jahren wurden Konzepte für den Endausbau des Quartiers erarbeitet (Energie, Mobilität, Digitales, ...) und die Lösungen in den

Bebauungsplan eingebracht, der Ende 2019 final verabschiedet wird.

Beispiele am KIT

Das Energy Lab 2.0 ist als ein Reallabor und eine Simulationsplattform konzipiert, mit deren Hilfe das Zusammenspiel der Komponenten künftiger Energiesysteme untersucht wird. Gemeinsam mit den Partnern des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des Forschungszentrums Jülich (FZJ) werden hier neue Netzarchitekturen, die Integration von Speichertechnologien, neue Netzhardware und Regelstrategien sowohl simuliert wie auch in ihrer Netzeinbindung im Anwendungsmaßstab getestet und weiterentwickelt.

Das Energy Lab 2.0 umfasst einen modular aufgebauten Anlagenverbund, in dem elektrische, thermische und chemische Energieströme sowie Informations- und Kommunikationstechnologien verknüpft werden, um die Stabilität eines sektorgekoppelten Netzes auf Grundlage erneuerbarer, fluktuierender Energieerzeugung zu untersuchen.

Als eine der ersten Anlagen im Energy Lab 2.0, wurde im Juni 2019 die „Drei-Phasen-Methanisierung“ (3PM) in Betrieb genommen. Diese derzeit in ihrer Art weltweit einzigartige Anlage, zur Erzeugung von Methan aus Kohlendioxid und Wasserstoff, weist eine hohe Dynamikfähigkeit und Robustheit im Betrieb auf und ist dadurch eine ideale Komponente in einem künftigen Energiesystem, um fluktuierend bereitgestellten, regenerativen Strom in Methan „umzuwandeln“ und so langfristig als Energieträger verfügbar zu halten.

Die bioliq®-Pilotanlage ist eine Forschungsinfrastruktur zur Demonstration und zum Scale-Up von Verfahren zur Umwandlung biogener Reststoffe in normgerechte Kraftstoffe oder Produkte für die chemische Industrie. Mit der bioliq®-Pilotanlage ist es möglich, synthetische Kraftstoffe in technischen Mengen für Forschungsprojekte mit der Fahrzeugindustrie zur Verfügung zu stellen (z.B. Projekt „reFuels“). Inzwischen wurde die bioliq®-Anlage mit dem Energy Lab 2.0 gekoppelt, zur Bereitstellung von Reststoffen als Kohlenstoffquelle für Power-to-X-Prozesse. Langfristig soll die Anlage weiterentwickelt werden, um neben biogenen auch anthropogene Reststoffe wie beispielsweise Kunststoffabfälle und industrielle CO₂-Ströme nutzen und damit einen nachhaltigen, geschlossenen Kohlenstoffkreislauf demonstrieren zu können.

Beispiele am FZJ

Beim LLEC handelt es sich um eine wissenschaftlich-technologische Plattform zur Entwicklung hoch-integrierter Energieversorgungssysteme in den Bereichen Wärme, Strom, chemische Energiespeicher und Mobilität durch lernfähige und vorausschauende Regelungsstrategien.

Das Ziel ist die Schaffung eines intelligenten Energiesystems, welches den Themen Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und Benutzerkomfort gleichermaßen Rechnung trägt.

So werden elektrische, thermische und chemische Energieströme im Anlagenverbund über ein neues intelligentes IT-System verknüpft. Ein Aspekt ist der Ausgleich schwankender regenerativer Quellen wie Wind und Sonne im Bereich der Stromerzeugung. Dies erfordert die Etablierung neuer Technologien wie die Umwandlung erneuerbaren Stroms in chemische Energieträger (Power-to-Gas), um eine stetige Versorgung zu gewährleisten. Darüber hinaus werden Photovoltaik-, Batterietechnik-, Blockheizkraftwerks- und Wasserstoff-Demonstratoren zusammen mit weiteren Prototypen in die Energieversorgung des Forschungscampus integriert. Eine neuartige LOHC-Anlage, welche die Prozesswärme aus dem benachbarten BHKW bezieht, erzeugt Wasserstoff und speichert diesen in zwei 100m³ großen Behälter, welche als saisonale Energiespeicher fungieren.

Eine Leitzentrale wird Informationen über alle Energieströme auf dem Gelände des Forschungszentrums sammeln und die verschiedenen Energiesysteme auf Basis vorausschauender, lernfähiger Algorithmen regeln. Hierfür wird unter anderem ein digitales Modell des gesamten Campus erstellt.

Eine besondere Rolle nimmt das Schülerlabor „JuLab“ ein. Hier werden Teile der Gesamtlösung vorab in einem kleineren Umfeld getestet und darüber hinaus aktiv in den pädagogischen Ausbildungsbetrieb des JuLab eingebunden. Ein weiterer Aspekt des Projektes ist die Abwärmenutzung der Jülicher Supercomputer: Ab 2020 sollen bis zu zwei Megawatt Abwärme über ein Niedertemperaturnetz die umliegenden Gebäude im Winter beheizen. Die Planung und der Bau der Demonstratoren werden dabei in enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern erfolgen.

Fazit

Die in diesem Beitrag vorgestellten Forschungsinfrastrukturen zeigen das für die Energiewende erforderliche, über die Sektoren und Technologien hinweg breit angelegte Themenspektrum im FVEE. Die Forschungsarbeiten im FVEE reichen dabei von der Material- und Komponentenentwicklung, Fertigungstechnologie, Demonstration und Systemintegration über Informations- und Kommunikationstechnik bis hin zum Einbezug des politischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Kontextes, der für den langfristigen Transformationsprozess erforderlich ist.

Die Forschungsinfrastrukturen der FVEE-Mitglieder ermöglichen es, die erforderlichen Kenntnisse und Erfahrungen zur Auslegung künftiger Energiesysteme in einem realitätsnahen, experimentellen Rahmen zu sammeln. Unter Einbeziehung verschiedener Szenarien und Rahmenbedingungen können durch diese Großgeräte, Reallabore, Informations- und Kommunikationsinfrastrukturen wissenschaftlich gesicherte Parameter für künftige Energiesysteme in einem anwendungsnahen Betrieb bestimmt und diese den Entscheidungsträgern in Politik und Wirtschaft zur Verfügung gestellt werden.

Integrierte Photovoltaik – Aktive Flächen für die Energiewende

1. Was bedeutet PV-Integration?

Die meisten Energiesystemszenarien gehen davon aus, dass die Photovoltaik (PV) neben der Windkraft die wichtigste Säule der zukünftigen Energieversorgung in Deutschland und weltweit sein wird. Nötig für eine erfolgreiche Energiewende in Deutschland sind, abhängig von zahlreichen Randbedingungen, ca. 400–500 Gigawatt installierte PV-Leistung [1]. Die heute installierte Leistung von knapp 49 GW muss somit vervielfacht werden. Neben der Herausforderung der Integration von entsprechenden volatilen Strommengen in die Netze benötigt der massive Ausbau der PV erhebliche Flächen.

Mit der Integration von PV-Technologie in die Hüllen von Gebäuden, Fahrzeugen und Verkehrswegen und ihrer Einbindung in Agrar- und Wasserflächen werden riesige, bereits für andere Zwecke genutzte Flächen für die Solarstromerzeugung erschlossen (► *Abbildung 2*).

Integrierte Photovoltaiktechnologie löst nicht nur Flächennutzungskonflikte, sie schafft an vielen Stellen auch Synergieeffekte.

Gebäude, Lärmschutzwände und Fahrzeuge ermöglichen eine Montage auf vorhandene Unterkonstruktio-

nen. Im Gegensatz zu einer Aufständigung in der Freifläche wird kaum weiteres Material für die Modulmontage benötigt.

Weiterhin dient die frontseitige Abdeckung der Module, häufig eine Glasscheibe, gleichzeitig als Schutz für das Gebäude, das Fahrzeug, die Nutzpflanzen oder die lärmgeplagten Anwohner. Kosten für die Flächenbereitstellung entfallen weitgehend oder vollständig.

Agro-Photovoltaik kombiniert die Erzeugung von Solarstrom und landwirtschaftlichen Produkten auf derselben Fläche. Die Ernte auf zwei Ebenen kann die Landnutzungsrate beträchtlich erhöhen, im Projekt APV-RESOLA um bis zu 86% [2]. Darüber hinaus kann sich (abhängig von Kultur und Klima) die partielle Verschattung auch vorteilhaft auf den landwirtschaftlichen Ertrag und die Bodenfeuchtigkeit auswirken.

Strom wird mit integrierter PV dezentral und häufig verbrauchsnahe produziert. PV an Bord von strombetriebenen Fahrzeugen erhöht deren Reichweite und senkt ihre Betriebskosten. Der Reichweitengewinn kann bei PKW bis ca. 3300 km, bei LKW bis ca. 5000 km pro Jahr betragen, im Fall einer zusätzlichen Belegung seitlicher Flächen sind noch höhere Werte zu erzielen.



Fraunhofer ISE
Dr. Harry Wirth
harry.wirth@ise.fraunhofer.de

DLR
Dr. Martin Vehse
martin.vehse@dlr.de

HZB
Dr. Björn Rau
bjoern.rau@helmholtz-berlin.de

ISFH
Prof. Dr. Robby Peibst
r.peibst@isfh.de

KIT
PD Dr. Alexander Colsmann
alexander.colsmann@kit.edu

ZAE
Andreas Stephan
andreas.stephan@zae-bayern.de

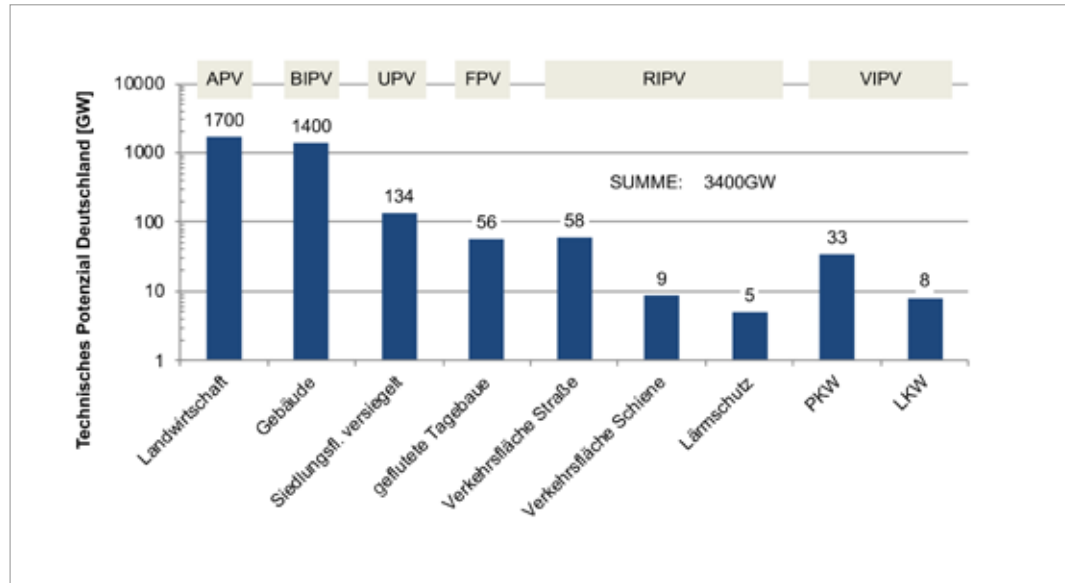
ZSW
Peter Lechner
peter.lechner@zsw-bw.de



Abbildung 1:
Anwendungspotenziale für integrierte Photovoltaik

Abbildung 2
Technische Ausbaupotenziale der integrierten Photovoltaik:

A: Agro
B: Building
U: Urban
F: Floating
R: Road
V: Vehicle



All diese Synergieeffekte reduzieren den Materialverbrauch, verbessern die Ökobilanz der Photovoltaik und erzeugen Kostenvorteile, die bei drastisch gesunkenen Preisen für Solarzellen immer stärker ins Gewicht fallen.

Integrierte PV verbessert auch die CO₂-Bilanz der angeschlossenen Verbraucher, weil PV-Strom mit ca. 62 g CO₂/kWh [3] einen deutlich geringeren Emissionsfaktor aufweist als der deutsche Strommix im Inlandsverbrauch mit 518 g CO₂/kWh [4] (Betrachtungsjahr 2018).

Nach bisherigen Erfahrungen erhöht Integration auch die Akzeptanz für den weiter notwendigen, massiven PV-Ausbau.

Integrierte Photovoltaik erfordert ein hohes Maß an individuellen Lösungen. Produkte mit einheitlicher Größe und standardisiertem Design können in vielen Fällen nicht verwendet werden. Besonders im Gebäudesektor zählen kurze Lieferwege und ein geschmeidiges Zusammenspiel von Planung, Produktion und Montage. In einer kundenindividuellen Massenproduktion (engl. Mass Customization) entstehen Chancen für eine lokale, digital vernetzte PV-Produktion mit nachhaltiger Wertschöpfung deutscher und europäischer Unternehmen.

Abbildung 3
Doppelte Ernte durch Agrophotovoltaik auf dem Heggelbach-Hof
(Fraunhofer ISE)





Abbildung 4:
MorphoColor®
Modulumuster
 (Fraunhofer ISE)

2. Flächenpotenziale für die Integration

Für die Integration von PV kommen sehr viele Flächen der bebauten Umwelt in Betracht, die der Sonne ausgesetzt sind.

► **Abbildung 2** zeigt Schätzwerte zu technischen Potenzialen für die Integration von PV in Deutschland.

Während das theoretische Potenzial eine komplette Inanspruchnahme der entsprechenden Ressourcen betrachtet, beschränkt sich das technische Potenzial auf solche Anwendungen, die technisch plausibel verwertbar sind.

Allein die Bauwerkintegrierte Photovoltaik (BIPV) [5] und die Agrophotovoltaik (APV) eröffnen Flächenpotenziale für eine Nennleistung von jeweils mehr als 1 Terawatt (TW). Auf etwa 17% der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland werden Kulturen angebaut, die partielle Verschattung tolerieren oder sogar davon profitieren (► **Abbildung 3**).

Die für die Umsetzung relevanten wirtschaftlich-praktischen Potenziale ergeben sich aus den technischen Potenzialen unter zusätzlicher Berücksichtigung ökonomischer, regulatorischer und praktischer Randbedingungen sowie von Fragen der Akzeptanz. Es ist Aufgabe der Forschung und Entwicklung, einen möglichst großen Anteil des technischen Potenzials durch effiziente, preiswerte, langlebige und ansprechende Produktinnovationen auszuschöpfen.

3. Innovative Technologien

In allen integrierten Anwendungen senkt Effizienz die Stromgestehungskosten, weil bei annähernd gleichem Materialeinsatz und Installationsaufwand

höhere Energieerträge erzielt werden. Besonders für die PV-Stromproduktion an Bord von Fahrzeugen steht sehr wenig Fläche zur Verfügung.

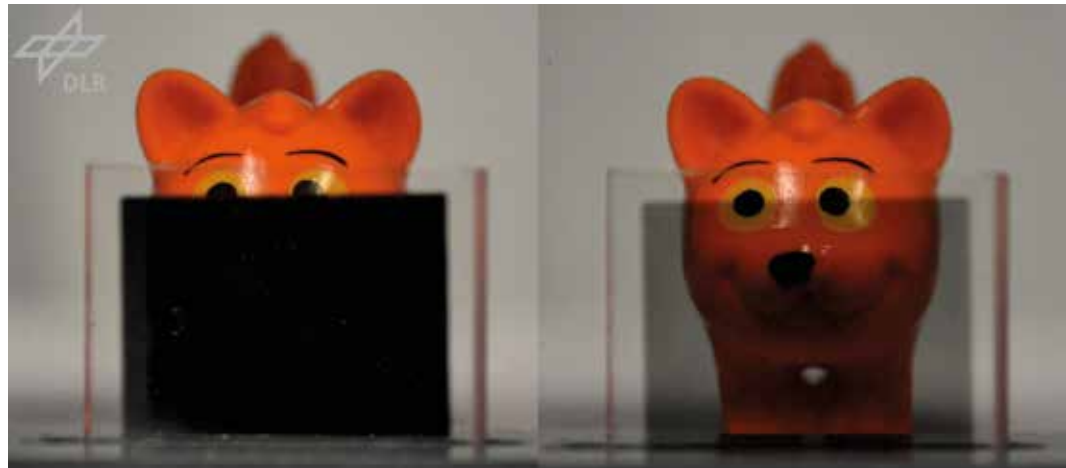
Mehrere Institute des FVEE entwickeln höchsteffiziente Zell- und Modularchitekturen auf Basis von PERC-Technologie (Passivated Emitter and Rear Cell), HJT (Heterojunction Technology) und passivierter Rückseitenkontakte.

Intensiv geforscht wird auch an Tandem- und Mehrfachsolarzellen, die das Licht in gestapelten aktiven Schichten noch effizienter nutzen [6], [7]. Als Tandem-Zellen werden insbesondere Kombinationen von Silizium-Solarzellen mit aufliegenden Perowskit- und III-V-Solarzellen untersucht. Bifaziale Technologien, die Einstrahlung von beiden Seiten des Moduls nutzen, können über landwirtschaftlichen Flächen oder in beliebig orientierten Lärmschutzwänden um 5–15% höhere Erträge liefern [8].

Neuartige, spektral hochselektive Farbschichten schaffen Potenziale für Multifunktionalität. Das Vorbild für selektive Reflexion kommt aus der Natur: die Interferenzfarben der Morpho-Schmetterlinge zeigen dem Beobachter einen brillanten Farbeindruck, unabhängig von der Beobachtungsrichtung (► **Abbildung 4**). Die neuen MorphoColor-Schichten auf Glas verbergen die Schaltkreise der Module und reduzieren dabei den Stromertrag der dahinterliegenden Solarzellen nur geringfügig um ca. 7% relativ [9].

Selektive Transmission lässt sich mit speziellen Dünnschicht-Solarzellen erreichen, bspw. auf organischer Basis. Die Zellen können so eingestellt werden, dass nur Wellenlängen transmittiert werden, die für das Pflanzenwachstum auf dem darunterliegenden Feld notwendig sind. Das in der Schicht absorbierte Licht dient der Stromproduktion.

Abbildung 5
**PV als schaltbare
 Glasbeschichtung**
 (DLR)



Die in Entwicklung befindlichen schaltbaren Schichten können Tageslicht bei Bedarf farbneutral transmittieren. Bei hoher Einstrahlung lässt sich ihre Absorption durch einen Schaltvorgang massiv erhöhen, sie können dann Strom erzeugen und bieten gleichzeitig Sonnenschutz (► *Abbildung 5*). Diese steuerbare Multifunktionalität ermöglicht eine PV-Integration auch in transparenten Teilflächen von Fassaden.

Kleinformatige Solarzellen, bspw. in geschindelter Verschaltung, ermöglichen dreidimensionale Flächen für gewölbte Fahrzeugdächer. Erste Muster von großflächigen PKW-Glasdächern im Vollformat mit einer selektiven Farbschicht und dahinter verborgenen Solarzellen in Schindelverschaltung wurden 2019 auf der IAA in Frankfurt gezeigt.

Für die Gebäudeintegration werden flexible Formate benötigt, um den gestalterischen Spielraum der Architekten nicht einzuschränken. Mit Schindelstrings lassen sich Stringlängen und damit Formate sehr leicht anpassen.

4. F&E-Bedarf

Integrierte PV betritt regelmäßig interdisziplinäre Felder für Forschung und Entwicklung. Im Vordergrund stehen nicht mehr allein der Jahresstromertrag und die Stromgestehungskosten, es kommen hochspezifische Randbedingungen, Zielsetzungen und Belastungen von Seiten der Anwendung hinzu.

Forschungsprojekte müssen daher ein breites Spektrum an F&E-Themen adressieren:

- Bei Integration in Hüllen sind die Betriebsbedingungen der Module meist geprägt von inhomogener Einstrahlung und erhöhten Betriebstemperaturen. Beide Effekte können sich negativ auf Ertrag und Zuverlässigkeit auswirken.

- In der Agro-Photovoltaik verdienen nicht nur die Ertragsgewinne durch bifaziale PV-Technologien eine besondere Betrachtung, sondern auch das Pflanzenwachstum, das Mikroklima und die Bodenfeuchte unter dem PV-Kraftwerk.
- Analog stellen sich Fragen für die schwimmende Photovoltaik bezüglich der Wechselwirkungen mit dem Gewässer.
- In Fahrzeugen und Lärmschutzwänden sind die Module dauerhaft Vibrationen ausgesetzt, bei schwimmender PV einer anhaltend hohen Luftfeuchte, möglicherweise in salziger Umgebung. Diese Belastungen werden durch Prüfungen nach aktuellen Normen nicht ausreichend abgedeckt.
- Besonders für die Gebäudeintegration wäre eine Lebensdauer jenseits 40 Jahre ein wichtiges Verkaufsargument. F&E muss die zugehörigen Degradationspfade analysieren, realistische beschleunigte Prüfprogramme und numerische Simulationen definieren sowie das Design der Zellen und Module für die Anwendungen optimieren.
- Bei neuen Verbindungstechnologien wie dem Schindeln und dem bleifreien Kleben und Lötten sind die Kosten weiter zu senken, mit scharfem Blick auf die Zuverlässigkeit.
- Bei Dünnschichtmodulen müssen nachträgliche Verschaltungs- und Skalierungskonzepte weiterentwickelt und optimiert werden.
- Größere Entwicklungsanstrengungen sind auch bei spektral selektiven und schaltbaren Schichten zu leisten, um Kosten und Beständigkeit zu optimieren.
- Neben den speziellen technischen und technologischen Aspekten integrierter Solarmodule spielt das Thema Akzeptanz eine wesentliche Rolle. So sind bei der Gebäudeintegration insbesondere gestalterische Freiheiten (Form, Farbe, Transparenz, Materialität) entscheidend und weniger die Moduleffizienz. Daher gilt es bei der BIPV vorrangig auch darum, die Anwender, also die Archi-

tekten und Planer, sowie die Bauherren in die Entwicklung multifunktionaler Bauelemente einzu-beziehen, um praxistaugliche Komponenten zu entwickeln, die sowohl die herkömmlichen Funktionen eines Bauelementes bieten, als auch Strom erzeugen können.

- Ein weiterer Aspekt ist die Nachhaltigkeit der Integrierten PV hinsichtlich ihres CO₂-Fußabdrucks, der Verwendung kritischer Materialien und der Recyclingfähigkeit. Über Methoden der Lebenszyklusanalyse sind die ökologisch sensiblen Parameter zu identifizieren und entsprechende Verbesserung abzuleiten, bspw. bei Materialauswahl, Produktdesign und Lebensdauer.
- Die Wirtschaftlichkeit und praktisch realisierbaren Potenziale der verschiedenen Integrationstechnologien müssen besser verstanden werden. Integrierte PV eröffnet jenseits der quasi-standardisierten Module zur Aufdach- und Freiflächenmontage neue Chancen für die deutsche PV-Industrie. Die Potenziale liegen sowohl bei der Produktion der Komponenten, als auch im Maschinenbau. Diese wirtschaftspolitische Dimension gilt es zu analysieren, auch um sie bei einer zukünftigen Förderung der PV-Integration zu berücksichtigen. In Kooperationen zwischen Instituten, Industrie und Start-Ups aus den jeweiligen Anwendungsfeldern entstehen optimale Bedingungen für zukünftige Innovationen für die Integration.

- [6] Robby Peibst, Michael Rienäcker, Byungsul Min, Christina Klamt, Raphael Niepelt, Tobias F. Wietler, Thorsten Dullweber, Eduard Sauter, Jens Hübner, Michael Oestreich, Rolf Brendel, From PERC to Tandem: POLO- and p+/n+ Poly-Si Tunneling Junction as Interface Between Bottom and Top Cell, *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 9, No. 1, January 2019
- [7] Romain Cariou, Jan Benick, Frank Feldmann, Oliver Höhn, Hubert Hauser, Paul Beutel, Nasser Razek, Markus Wimplinger, Benedikt Bläsi, David Lackner, Martin Hermle, Gerald Siefer, Stefan W. Glunz, Andreas W. Bett & Frank Dimroth, III-V-on-silicon solar cells reaching 33% photoconversion efficiency in two-terminal configuration, *Nature Energy*, Vol. 3, April 2018
- [8] Christian Reise, Alexandra Schmid. Realistic Yield Expectations for Bifacial PV Systems – An Assessment of Announced, Predicted and Observed Benefits, 31st European PV Solar Energy Conference and Exhibition, September 2015, Hamburg
- [9] Benedikt Bläsi, Thomas Kroyer, Oliver Höhn, Martin Wiese, Claudio Ferrara, Ulrich Eitner, Tilmann Kuhn, Morpho Butterfly Inspired Coloured BIPV Modules, 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, September 2017, Amsterdam

5. Quellenverzeichnis

- [1] Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen, Studie des Fraunhofer ISE, Februar 2020
- [2] Schmid, T.; Trommsdorff, M.; Bopp, G.; Ehmann, A.; Franke, W.; Gimbel, E.; Högy, P.; Ketzer, D.; Oberfell, T.; Reyer, F.; Rösch, C.; Schindele, S. u.a. sowie Weinberger, N.; Weselek, A., Agrophotovoltaik: Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung (APV-RESOLA), Vortrag auf der Konferenz „Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement“, Berlin, Februar 2019
- [3] Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, Umweltbundesamt, November 2019
- [4] Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2018, Umweltbundesamt, April 2019
- [5] Karoline Fath, Technical and economic potential for Photovoltaic systems on buildings, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, September 2017

Tandemsolarzellen mit Perowskiten – Die neuen Stars der Photovoltaik



HZB

Prof. Dr. Christiane Becker
christiane.becker@helmholtz-berlin.de

Prof. Dr. Steve Albrecht
steve.albrecht@helmholtz-berlin.de

Fraunhofer ISE

Prof. Dr. Stefan Glunz
stefan.glunz@ise.fraunhofer.de

ISFH

Dr. Sarah Kajari-Schröder
kajari-schroeder@isfh.de

Dr. Sascha Wolter
wolter@isfh.de

KIT

PD Dr. Alexander Colsmann
alexander.colsmann@kit.edu

Dr. Ulrich W. Paetzold
ulrich.paetzold@kit.edu

ZAE

Prof. Dr. Vladimir Dyakonov
vladimir.dyakonov@zae-bayern.de

ZSW

Dr. Erik Ahlswede
erik.ahlswede@zsw-bw.de

Prof. Dr. Michael Powalla
michael.powalla@zsw-bw.de

Die globale Energiewende kann nur gelingen, wenn die Photovoltaik einen maßgeblichen Beitrag zur nachhaltigen Stromerzeugung leistet. Die Photovoltaik-Forschung arbeitet daran, die Stromerzeugungskosten von Solarzellen zu minimieren und die Wettbewerbsfähigkeit weiter zu steigern. Die marktdominierende Technologie von Silizium-Solarzellen ist – erfreulicherweise – mittlerweile so ausgereift, dass sich deren Wirkungsgrade dem physikalischen Limit von etwa 29,5% [Richter, Schäfer] annähern.

Durch Reduktion der Kosten von Solarzellenmaterialien und Solarzellenherstellung allein ist die Senkung der Stromerzeugungskosten allerdings nur noch begrenzt möglich, da jede Solarzelle gewisse Fixkosten hat, so genannte „Balance of System Costs“ (BOS). Dazu gehören beispielsweise Kosten für Kabel, Wechselrichter, Modulrahmen und insbesondere die limitiert zur Verfügung stehenden Flächen. Daher ist es sehr wichtig, an der Stellschraube „Effizienz“ zu drehen und deutlich höhere Wirkungsgrade für die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom zu realisieren. Es müssen also neue Solarzellenkonzepte entwickelt werden, die signifikant höhere Wirkungsgrade als reine Silizium-Solarzellen ermöglichen und mehr Leistung pro Fläche generieren.

Verlustmechanismen

Der Wirkungsgrad von Silizium-Solarzellen, wie auch von allen anderen Einfachsolarmodulen, ist unter anderem durch zwei große Verlustmechanismen beschränkt:

- Zum einen können Photonen des Sonnenspektrums, deren Energie geringer ist als die elektronische Bandlücke von Silizium, nicht absorbiert werden. Daher können sie auch nicht zur Umwandlung in elektrischen Strom genutzt werden (► *Abbildung 1a*). Dieser Verlustmechanismus betrifft den Teil des Sonnenspektrums mit einer Wellenlänge größer als circa 1200 nm.
- Zum noch größeren Anteil wirken sich Thermalisierungsverluste aus: Photonen mit einer Energie größer als die elektronische Bandlücke von Silizium werden zwar absorbiert, setzen aber den überschüssigen Anteil ihrer Energie gegenüber der elektronischen Bandlücke in Wärme um. Dieser überschüssige Anteil ist so für die Stromumwandlung verloren.

Das Tandemsolarzellen-Konzept

Genau hier setzt das Tandemsolarzellen-Konzept an, um die Thermalisierungsverluste zu verringern. Der hochenergetische Anteil des Sonnenlichts wird von einem Solarzellenmaterial mit großer elektronischer Bandlücke in einer so genannten „Topzelle“ absorbiert und mit viel geringeren Thermalisierungsverlusten in Strom umgewandelt. Der niederenergetische Anteil des Sonnenlichts ist nicht verloren, sondern wird von einer darunter liegenden Solarzelle, der „Bottomzelle“ mit niedrigerer elektronischer Bandlücke absorbiert und ebenfalls mit reduzierten Thermalisierungsverlusten verwertet (► *Abbildung 1b*).

Welche Materialien eignen sich nun als „Topzellen“-Partner für die etablierte Silizium-Photovoltaik oder für ebenfalls kommerziell erhältliche Dünnschicht-Solarzellen, die auf Chalkopyriten basieren? Silizium und Chalkopyrite, wie beispielsweise Kupfer-Indium-Gallium-Selenid, weisen eine ähnliche Bandlücke E_G von 1.12 bzw. 1.15 eV auf. Das Partnermaterial sollte also eine elektronische Bandlücke im Bereich von 1.5 bis 2 eV haben und selbst mit hoher Effizienz Sonnenlicht in Strom umwandeln.

Bei Verwendung von III-V-Halbleitern als „Topzelle“ zeigt sich deutlich das enorme Potenzial des Mehrfachsolarmodulkonzepts. Unlängst wurde eine monolithische Mehrfachsolarmodul basierend auf III-V-Halbleitern und Silizium realisiert, die einen stabilen Weltrekord-Wirkungsgrad von 34,1% auf einer Fläche von 4 cm² aufweist [Cariou, ISEPresse22]. Damit wird das physikalische Limit einer reinen Siliziumsolarmodul von etwa 29,5% [Richter, Schäfer] deutlich übertroffen. Die Unterzelle aus Silizium weist passivierende Kontakte (TOPCon) auf beiden Seiten und eine spezielle Lichtfallenoptik für infrarotes Licht auf. Darauf befinden sich die mittlere Solarzelle aus GaAs und die Topsolarmodul aus GaInP [Cariou]. Für eine großtechnische Umsetzung dieser vielversprechenden Technologie ist allerdings noch eine deutliche Senkung der Prozesskosten notwendig, die momentan intensiv bearbeitet wird.

Bis vor circa 10 Jahren war außer den III-V-Halbleitern kein Solarzellenmaterial in Sicht, das als Topzellen-Partner für die etablierte Silizium- und Chalkopyrit-Solarzellentechnologie in Frage käme und selbst gut genug ist, um eine Wirkungsgradsteigerung zu ermöglichen.

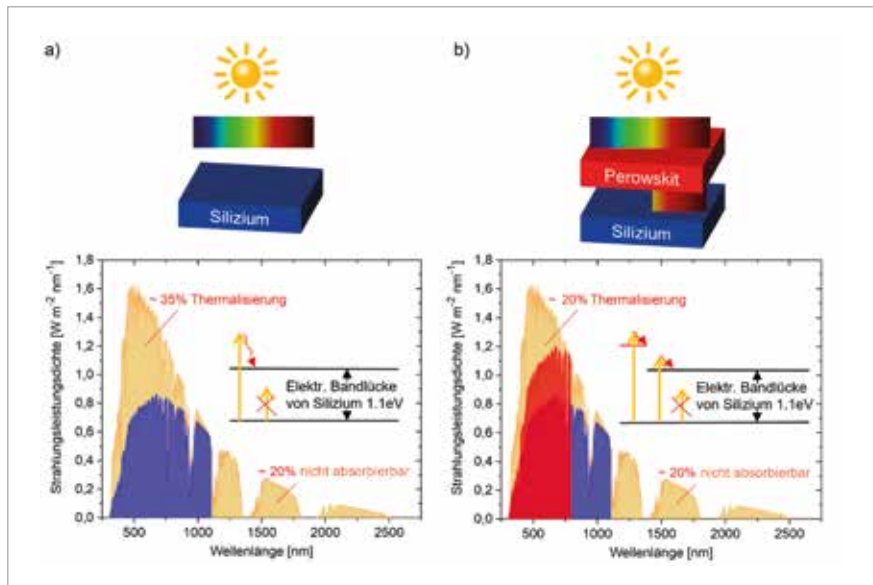


Abbildung 1

Ausnutzung des Sonnenspektrums

a) Verlustmechanismen in Einfachsolarzellen:

- Photonen mit einer Wellenlänge größer 1200 nm werden nicht absorbiert.
- Photonen mit einer Wellenlänge kleiner 1100 nm verlieren Energie durch Thermalisierung.

b) Tandemsolarzellen Konzept:

Durch Kombination der Silizium-Solarzelle mit einer „Topzelle“ lassen sich Thermalisierungsverluste reduzieren und so das Sonnenspektrum besser ausnutzen.

Das hat sich mit dem Aufkommen von Perowskit-Materialien (► *Abbildung 2*) grundlegend geändert. Der Kristall, der den Perowskiten seinen Namen gab, ist Kalzium-Titan-Oxid und hat eine kubische oder orthorhombische Gitterstruktur, die mit der chemischen Formel ABC_3 auftritt (► *Abbildung 2a*):

- A) Bei den verwendeten Solarzellen-Materialien nimmt den Gitterplatz A des Kalzium-Kations entweder ein organisches Molekül oder Cäsium (Cs) ein.
- B) An die Stelle des Titans auf Gitterplatz B kommen Blei (Pb) oder Zinn (Sn).
- C) Die C-Gitterplätze des Oxids nehmen die Halogenide Jod (I), Brom (Br) oder Chlor (Cl) ein.

Perowskit-Solarzellen haben eine rasante Entwicklung hinter sich und spielen nach nur 10 Jahren Forschungsarbeit mit Einfachsolarzellen-Rekordwirkungsgraden über 25 % in derselben Liga mit wie die etablierten Solarzellen-Materialien Silizium, Chalkopyrite und III-V-Halbleiter.

Die Gründe dafür sind vielfältig. Perowskit-Materialien weisen einige für Solarzellenanwendungen günstige Eigenschaften auf.

Zu den Vorteilen gehören unter anderem

- Hoher Absorptionskoeffizient: Nur wenige 100 Nanometer dünne Schichten reichen aus, um alle hochenergetischen Photonen zu absorbieren.
- Defekt-Toleranz: Defekte in der Kristallstruktur wirken sich vergleichsweise wenig auf die Solarzellen-Wirkungsgrade aus.
- Gezielt durchstimmbare elektronische Bandlücke.
- Herstellung aus billigen und häufig vorkommenden Materialien
- Einfache und großflächige Herstellungstechniken: beispielsweise Schleuderbeschichtung, Ko-Verdampfen und Drucken aus der flüssigen Phase [Lim]

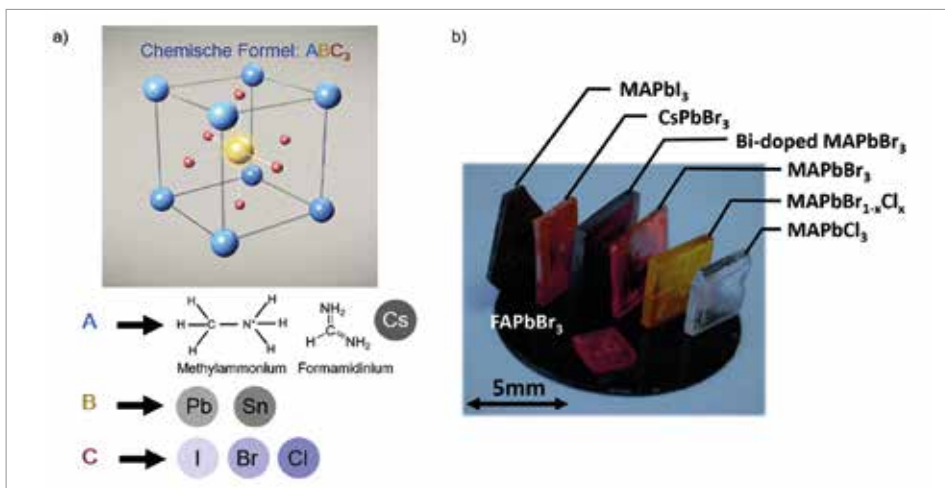


Abbildung 2

Perowskite als Topzellen-Materialien

a) Perowskite treten mit der chemischen Formel ABC_3 auf:

Gitterplatz A: organische Moleküle oder Cäsium
 Gitterplatz B: Blei (Pb) oder Zinn (Sn)
 C-Gitterplätze: Halogenide wie Jod (I), Brom (Br) oder Chlor (Cl).

b) Optimierter Mix:

Durch Mischen dieser Einzelkomponenten lassen sich Perowskit-Materialien mit maßgeschneiderten optischen und elektronischen Eigenschaften herstellen.

Abbildung 3

Monolithische Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle:

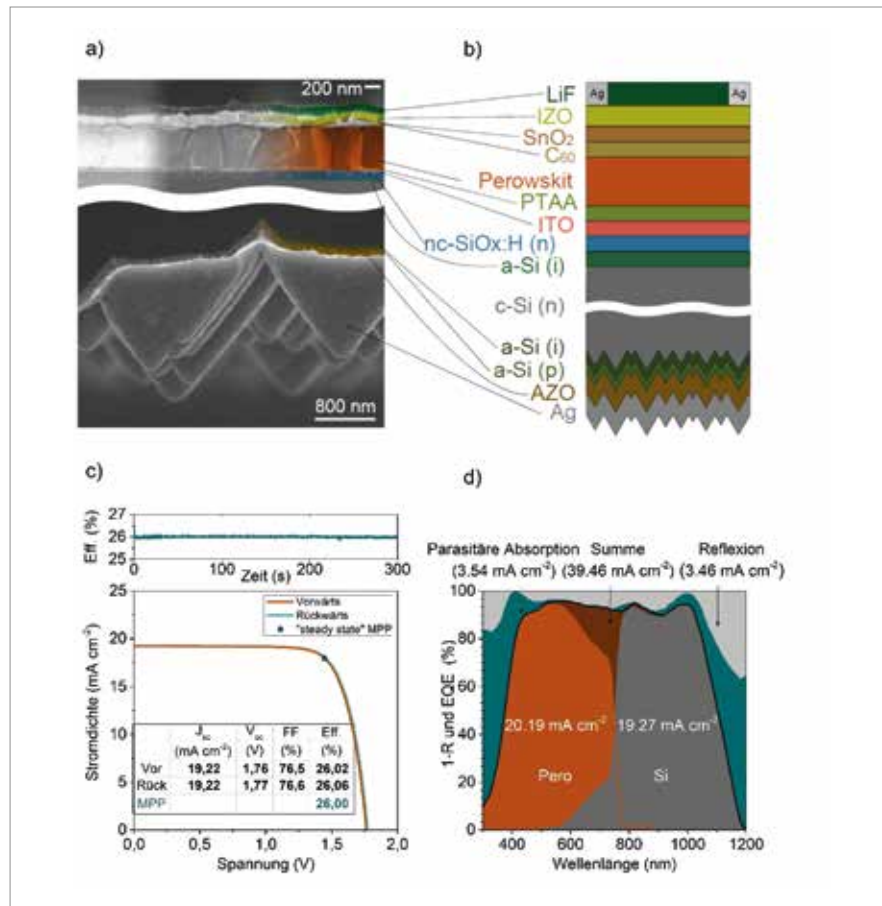
a) Querschnitt mit der Perowskit-Topzelle (oben) und der Rückseite der Silizium-Bottomzelle (unten)

b) schematische Darstellung des Schichtstapels

c) Strom-Spannungskennlinie und Wirkungsgrad-Verlauf

d) 1-Reflexion (1-R) und Externe Quanten Effizienz (EQE): Die integrierten Stromdichten für Perowskit-Topzelle (20.19 mA cm^{-2}) und Silizium-Bottomzelle (19.27 mA cm^{-2}) sind gut angepasst.

(Adaptiert von [Köhnen] – Published by The Royal Society of Chemistry.)



Es gibt allerdings auch noch zwei große Herausforderungen, an denen derzeit intensiv geforscht wird:

- Mangelnde Stabilität, insbesondere, wenn Perowskite organische Komponenten enthalten
- Blei-Anteil

In ► **Abbildung 3** ist ein monolithisches Tandemsolarzellen-Bauteil aus Perowskit und Silizium dargestellt [Köhnen]. „Monolithisch“ bedeutet, dass die Perowskit-„Topzelle“ und die Silizium-„Bottomzelle“ direkt miteinander in Serie geschaltet sind und somit nicht mehr BOS-Kosten als für eine Einfachszelle anfallen. Die gezeigten 26% Wirkungsgrad gehören zu den höchsten demonstrierten Effizienzen weltweit für diesen Solarzellentyp.

► **Abbildung 3a** zeigt eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme und ► **3b** die entsprechende schematische Darstellung des Schichtstapels.

► **Abbildung 3c** zeigt die gemessene Strom-Spannungskennlinie und den Verlauf der Effizienz (Eff.) über den Zeitraum von 5 Minuten.

Aufgrund der Serienschaltung von „Topzelle“ und „Bottomzelle“ ist es wichtig, dafür zu sorgen, dass in beiden Teilsolarzellen die gleiche Anzahl von Photonen absorbiert und so der gleiche Strom generiert wird. Sonst würde die Teilzelle mit dem geringeren

Strom die Leistung des gesamten Tandembauzeils limitieren.

Aus der in ► **Abbildung 3d** gezeigten Quantenausbeute wird ersichtlich, dass die beiden Stromdichten mit 20.2 mA/cm^2 und 19.3 mA/cm^2 sehr gut angepasst sind. Die Tandemsolarzelleneffizienz liegt dabei auch höher als die Wirkungsgrade der entsprechenden Einfachszellen: Das Tandemsolarzellen-Konzept ist also auch für Perowskite bereits experimentell demonstriert.

Es gibt auf internationaler Ebene aktuell weitreichende Forschungsaktivitäten, um den Wirkungsgrad von Tandemsolarzellen mit Perowskiten weiter zu steigern und die Kompatibilität mit vorhandenen Technologien zu verbessern. Hier sind exemplarisch drei Forschungsgebiete genauer beschrieben:

Anpassung der elektronischen Bandlücke

Im Hinblick auf den Einsatz in Tandemsolarzellen, bestehen organisch-anorganische Hybrid-Perowskit-Halbleiter durch die mögliche Variation der Bandlücke in diesen Materialien. Insbesondere Perowskit-Materialien mit einer weiten Bandlücke ($E_G \sim 1,65 - 1,75$) eV sind ein Schwerpunkt der aktuellen

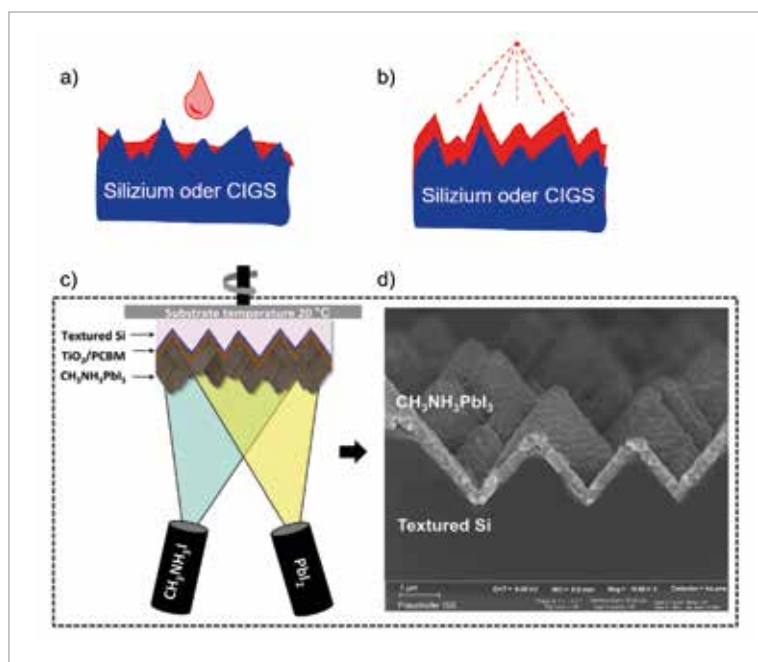


Abbildung 4
Alternative Abscheidemethoden für Perowskite und Kontaktschichten:
 a) Texturierte (nicht plane) Oberflächen eignen sich nicht für Schleuderbeschichtung mit flüssigem Beschichtungsmaterial
 b) Alternative Abscheidemethoden ermöglichen eine konformale Beschichtung texturierter Oberflächen.
 c) Simultane Verdampfung von zwei Perowskitkomponenten,
 d) Ko-verdampfte Perowskitschicht auf texturiertem Silizium.
 (Quelle: (c) und d) aus [Cojocaruu])

Forschung, da sie sich ideal für das Top-Absorbermaterial in Tandem-PV-Architekturen eignen, die auf etablierten PV-Technologien wie den marktbeherrschenden kristallinen Si-Solarzellen oder Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid(CIGS)-Dünnschicht-Solarzellen basieren.

Perowskit-Halbleiter mit weiter Bandlücke werden aufgrund ihrer Schlüsselbedeutung von mehreren Forschungsinstituten im FVEE-Verbund weiterentwickelt [Liu, Gharibzadeh]. Ein Highlight aus dem Jahr 2019 sind am KIT entwickelte 2D/3D-Perowskit-Heterostrukturen, die eine neues Konzept darstellen die Stabilität weiter zu verbessern und die Leerlaufspannung (VOC) von Multikation-Perowskit-Solarzellen zu erhöhen [Gharibzadeh]. Diese Materialkombination erlaubte es einen Wirkungsgrad von bis zu 19,4%, bei einer bemerkenswert hohen Leerlaufspannung (VOC) von 1,31V zu erzielen.

Alternative Abscheidemethoden

Die bisher am häufigsten verwendete Herstellungsmethode für Perowskit-Schichten ist Schleuderbeschichtung aus der flüssigen Phase. Das funktioniert am besten auf planen Oberflächen, weshalb in vielen aktuellen Tandemsolarzellen-Bauteilen die Silizium-Bottomzelle eine plane Vorderseite aufweist (► *Abbildung 3a und 3b*). Dies ist aus optischer Hinsicht allerdings nicht ideal, da plane Grenzflächen oft zu erheblichen Reflexionsverlusten führen (► *grauer Bereich in Abbildung 3a*).

Die etablierte Silizium-Solarzellen-Technologie arbeitet aus diesem Grund mit Silizium-Scheiben, die

pyramidenförmige oder andere zufällige Oberflächentexturen mit Abmessungen von einigen Mikrometern aufweisen. Derartige Texturen erlauben eine sehr effektive, breitbandige Entspiegelung des Solarzellenbauteils.

Leider sind Schleuderbeschichtungsprozesse von dünnen Perowskit- und Kontaktschichten auf derartigen Texturen schwer zu realisieren (► *Abbildung 4a*). Es müssen also alternative Abscheidemethoden für Perowskit-Solarzellen entwickelt werden, um die Kompatibilität mit der etablierten Silizium-Solarzellen-Technologie zu gewährleisten (► *Abbildung 4b*). Eine aussichtsreiche Herstellungsmethode für Perowskit-Solarzellen auf texturierten Oberflächen ist Ko-Verdampfen, z.B. Blei(II)iodid (PbI_2) und Methylammoniumiodid ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$). (► *Abbildung 4c*). [Wolter,Cojocaruu].

Dadurch können konformale Perowskit-Schichten selbst auf stark texturierten Oberflächen abgeschieden werden (► *Abbildung 4d*).

Eine weitere Innovation, die in den vergangenen Monaten signifikante Wirkungsgradsteigerungen im Bereich Perowskit-basierter Tandemsolarzellen ermöglicht hat, ist die Entwicklung von alternativen Lochleiterschichten. Diese so genannten „SAMs“ (engl. „self-assembled monolayers“) bedecken selbst texturierte Oberflächen konformal und sind zudem billig und transparent [Magomedov].

Dünnschicht-Solarzellen mit Chalkopyrit-Bottomzelle Dünnschicht-Solarzellen-Technologien weisen einige Vorteile auf. So sind die Verwendung von flexiblen Substraten und eine signifikante Kostenreduktion

durch weniger Materialverbrauch möglich. Perowskit-Topzellen werden daher gerne mit Chalkopyrit-Dünnschicht-Bottomzellen kombiniert. Von entscheidender Bedeutung sind dabei unter anderem die transparent leitenden Schichten des Tandemverbands. Das konventionell für den Frontkontakt auf Glas oft verwendete Indium-Zinn-Oxid (ITO) weist eine sehr geringe Absorption im Bereich des sichtbaren Lichts auf, ist aber für den langwelligen Spektralbereich nicht optimal, da dort die Absorption durch freie Ladungsträger stark zum Tragen kommt.

Alternative leitfähige Kontaktschichten müssen daher eine geringe Ladungsträgerkonzentration bei gleichzeitig sehr guter Beweglichkeit der Ladungsträger erreichen können. Ein aktuell sehr interessantes Material ist hierbei Wasserstoff-dotiertes Indium-Oxid (IO:H), das deutlich geringere Absorptionsverluste im nahen Infrarotbereich ermöglicht, so dass mehr nutzbares Restlicht an der unteren Bottom-Zelle ankommt [Schultes].

Mit Hilfe der oben genannten SAM-Lochleiterschichten ist es kürzlich gelungen ein Perowskit-Chalkopyrit-Tandemsolarzellenbauteil mit Weltrekord-Wirkungsgrad von 23.3% zu realisieren [Al-Ashouri]. Zertifiziert wurde dieser Wirkungsgrad am Callab des Fraunhofer ISE. Die zertifizierte Messung von Tandemsolarzellen ist eine noch größere Herausforderung als die von Einfachsolarmodulen [Siefer] und wird weltweit nur von einer sehr kleinen Gruppe von Kalibrierlaboren wie dem AIST in Japan, dem NREL in den USA und dem Callab des Fraunhofer ISE beherrscht. Für die korrekte Vorhersage des Jahresertrages von Tandemsolarzellen sind diese exakten Messungen von größter Bedeutung

Fazit

Zusammenfassend sind Tandemsolarzellen mit Perowskiten äußerst aussichtsreiche Kandidaten, um aktuelle Wirkungsgrad-Limits von Einfach-Solarzellen zu übertreffen. Im Labormaßstab werden schon Rekord-Wirkungsgrade von Tandemsolarzellen gemessen, die oberhalb der aktuell maximalen Wirkungsgrade von Einfach-Solarzellen liegen. Kürzlich wurde am Helmholtz-Zentrum Berlin eine Perowskit-Silizium Tandem-Solarzelle mit 29,15% Wirkungsgrad realisiert [Albrecht].

Quellennachweise

- [Richter] Richter et al., Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells, *IEEE Journal of Photovoltaics* 3, 1184–1191 (2013), doi: 10.1109/JPHOTOV.2013.2270351
- [Schäfer] Schäfer und Brendel, Accurate Calculation of the Absorptance Enhances Efficiency Limit of Crystalline Silicon Solar Cells With Lambertian Light Trapping, *IEEE Journal of Photovoltaics* 8, 1156–1158 (2018), doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2824024
- [Cariou] Cariou et al., III–V-on-silicon solar cells reaching 33% photoconversion efficiency in two-terminal configuration, *Nature Energy* 3, 326–333 (2018), doi: 10.1038/s41560-018-0125-0
- [ISEPresse22] Pressemitteilung # 22, ISE Freiburg, 2019, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2019/fraunhofer-ise-stellt-zwei-wirkungsgradrekorde-fuer-monolithische-dreifachsolarzellen-auf-siliciumbasis-auf.html>
- [Lim] Lim et al., Wege zur Industrialisierung von c-Si/Perowskit-Tandemsolarzellen, *FVEE Themenheft 2019*, S. 47–50
- [Köhnen] Köhnen et al., Highly efficient monolithic perovskite silicon tandem solar cells: analyzing the influence of current mismatch on device performance, *Sustainable Energy Fuels* 3, 1995–2005 (2019), doi: 10.1039/C9SE00120D
- [Liu] Liu et al., Open-Circuit Voltages Exceeding 1.26 V in Planar Methylammonium Lead Iodide Perovskite Solar Cells, *ACS Energy Lett.* 4, 110–117 (2019), doi: 10.1021/acsenergylett.8b01906
- [Gharibzadeh] Gharibzadeh et al., Record Open-Circuit Voltage Wide-Bandgap Perovskite Solar Cells Utilizing 2D/3D Perovskite Heterostructure, *Adv. Energy Mater.* 9, 1803699 (2019), doi: 10.1002/aenm.201803699
- [Wolter] Wolter et al., Determination and influence evaluation of the acoustic impedance ratio for thermal co-evaporation, *Appl. Phys. Lett.* 113, 013301 (2018), doi: 10.1063/1.5037403
- [Cojocar] Cojocar et al., Detailed Investigation of Evaporated Perovskite Absorbers with High Crystal Quality on Different Substrates, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 10, 26293 (2018), doi: 10.1021/acsmi.8b07999
- [Magomedov] Magomedov et al., Self-Assembled Hole Transporting Monolayer for Highly Efficient Perovskite Solar Cells, *Adv. Energy Mater.* 8, 1870139 (2018), doi: 10.1002/aenm.201801892
- [Schultes] Schultes et al., Sputtered Transparent Electrodes (IO:H and IZO) with Low Parasitic Near-Infrared Absorption for Perovskite–Cu(In,Ga)Se₂ Tandem Solar Cells, *ACS Appl. Energy Mater.* (2019), doi: 10.1021/acsaem.9b01224
- [Al-Ashouri] Al-Ashouri et al., Conformal monolayer contacts with lossless interfaces for perovskite single junction and monolithic tandem solar cells, *Energy & Environmental Science* 12, 3356–3369 (2019), doi: 10.1039/C9EE02268F
- [Siefer] Siefer und Bett, Calibration of III-V concentrator cells and modules. 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion Hawaii. Hawaii, S. 745–748 (2006)
- [Albrecht] NREL, Best Research-Cell Efficiencies, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

Wege zur Industrialisierung von c-Si/Perowskit-Tandemsolarzellen

Der mit Abstand größte Anteil der aktuell produzierten und installierten Photovoltaik(PV)-Module basiert auf kristallinem Silizium (c-Si). Die kontinuierliche Verbesserung des Wirkungsgrades der verwendeten c-Si-Solarzellen hat maßgeblich dazu beigetragen, dass die Preise dieser PV-Module in den letzten 5 Jahren von ca. 0,60 EUR/Wp auf derzeit ca. 0,25 EUR/Wp („Standard-Module“) bis 0,35 EUR/Wp („Hocheffizienz-Module“) gesunken sind.

Die weitere kontinuierliche Weiterentwicklung der bestehenden Technologien sowie die Einführung neuer c-Si-Solarzellen-Generationen wird ohne Frage in den nächsten Jahren zu weiteren Wirkungsgradsteigerungen führen. Gleichzeitig wurde im Artikel „Stapelsolarzellen mit Perowskiten – Die neuen Stars der Photovoltaik“ (► S. 42) dargelegt, dass das obere Limit dieser Entwicklung bereits abzusehen ist: bei spätestens 29% Wirkungsgrad werden „reine“ c-Si-Solarzellen ihr Maximum erreicht haben.

Ein Weg zu noch höheren Wirkungsgraden wurde in dem Artikel ebenfalls aufgezeigt: die Kombination von c-Si-Solarzellen mit Solarzellen auf Basis von Perowskiten. Im Labormaßstab haben diese Stapel- oder auch Tandemsolarzellen inzwischen gezeigt, dass sie tatsächlich höhere Wirkungsgrade erreichen als reine c-Si-Solarzellen.

Nun stellt sich die Frage, wie man diese Technologie im industriellen Maßstab fertigen kann und ob sich der dafür notwendige Entwicklungsaufwand auch lohnt.

Weltweiter Wettbewerb – weltweite Chancen

Dazu sei darauf hingewiesen, dass im Jahr 2018 weltweit etwa ca. 140 Mrd. EUR investiert wurden, um insgesamt ca. 100 GW PV-Leistung zu installieren [1]. Damit wurde etwa fünfmal so viel Leistung installiert wie im Jahr 2010 und etwa doppelt so viel wie im Jahr 2014. PV ist also ein globaler Wachstumsmarkt. Zudem ist Strom aus PV-Systemen inzwischen an vielen Orten der Welt günstiger als Strom aus allen anderen Quellen. Diese Tatsache, in Kombination mit den weltweiten, europäischen und auch deutschen Zielen bezüglich der Reduzierung von CO₂-Emissionen, garantiert, dass dieses Wachstum sowohl mittel- als auch langfristig anhalten wird.

Installierte PV-Leistung beruht auf produzierten PV-Modulen. Aktuell wird der Großteil der c-Si-PV-Module in Asien und insbesondere in China gefertigt [1]. Gleiches gilt für c-Si-Solarzellen. Die für die Produktion von PV-Modulen und Solarzellen nötigen Maschinen und Anlagen stammen sowohl aus Europa als auch aus Asien, wobei es leider einen klaren Trend zu sinkenden europäischen Marktanteilen gibt.

Dies steht im Gegensatz dazu, dass die europäische und vor allem auch die deutsche Forschung weiterhin Spitzenergebnisse erzielt. So hält das Fraunhofer ISE derzeit sowohl den Weltrekord für multikristalline (22,3%) als auch für beidseitig kontaktierte (25,8%) Siliziumsolarzellen. Das ISFH hat zudem mit 26,1%



ISFH
Dr. Bianca Lim
b.lim@isfh.de

Prof. Dr. Tobias Wietler
t.wietler@isfh.de

HZB
Prof. Dr. Rutger Schlatmann
rutger.schlatmann@helmholtz-berlin.de

Prof. Dr. Bernd Stannowski
bernd.stannowski@helmholtz-berlin.de

Fraunhofer ISE
Dr. Uli Würfel
uli.wuerfel@ise.fraunhofer.de

FZ Jülich
Dr. Kaining Ding
k.ding@fz-juelich.de

KIT
Dr. Ulrich W. Paetzold
ulrich.paetzold@kit.edu

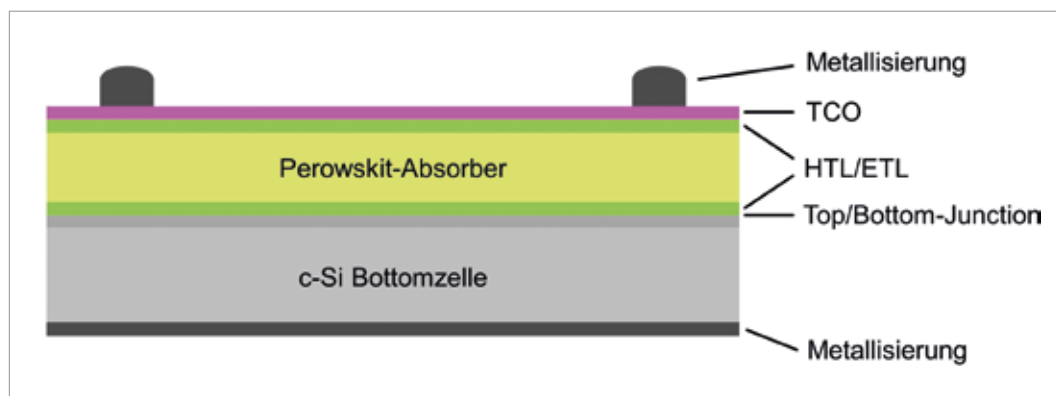
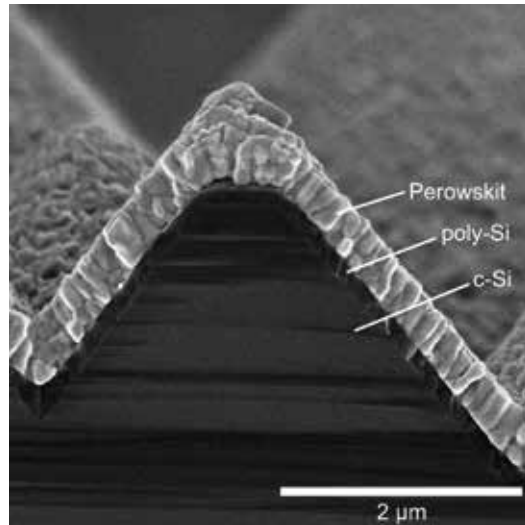


Abbildung 1
Monolithische Tandemsolarzelle:
Schema der wichtigsten Bausteine für diese direkt aufeinander aufbauende Tandemsolarzelle

Abbildung 2

Ko-Verdampfung erzeugt auch auf texturierten Oberflächen geschlossene Schichten; hier Abscheidung einer Perowskit-Schicht auf texturierter Siliziumoberflächen. (Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme)



den höchsten Wirkungsgrad auf p-Typ-Silizium erreicht. Diese Spitzenforschung steht bereit, sowohl die Maschinenbauer als auch (potenzielle neue) Zell- und Modulproduzenten dabei zu unterstützen, ihre Marktanteile wieder zu vergrößern bzw. in den PV-Markt einzutreten.

Kostengünstig industriell herstellbare Silizium-Perowskit-Tandemsolarzellen könnten dabei sehr gut den Entwicklungsvorsprung bieten, den es benötigt, um in dem sehr dynamischen Wachstumsmarkt PV Fuß zu fassen.

An den Erfolg von c-Si anknüpfen und darauf aufbauen

Was ist für diese kostengünstige industrielle Produktion notwendig?

► **Abbildung 1** zeigt schematisch die wichtigsten Bausteine für sogenannte monolithische, d.h. direkt aufeinander aufbauende, Tandemsolarzellen: Die Basis bilden eine (sehr gute) c-Si-Solarzelle (Bottomzelle) und eine (ebenfalls sehr gute) Perowskit-basierte Solarzelle (Topzelle). Die Perowskit-Solarzelle besteht dabei aus einem Absorbermaterial (dem Perowskit) sowie einer elektronenleitenden Schicht (ETL) auf der einen und einer löcherleitenden Schicht (HTL) auf der anderen Seite. Die beiden Solarzellen sind mittels einer Junction, d.h. einem Übergang für die Ladungs-



Abbildung 3

Tintenstrahl-Druck von Perowskit-Schichten: Logodruck als Beispiel für die Positionsgenauigkeit.

träger, miteinander verbunden. Auf der Vorderseite der Perowskit-Solarzelle (und auf der Rückseite der c-Si-Solarzelle) befindet sich zudem noch ein Metallkontakt.

Sehr gute c-Si-Solarzellen werden bereits heutzutage industriell gefertigt und zwar derzeit auf einer Größe von ca. 160 x 160 mm² und einer Taktung von 1 bis 2 Solarzellen pro Sekunde. Die „neuen“ Materialien, die in der oberen Hälfte der Tandemsolarzelle zum Einsatz kommen, müssen also mit Prozessen aufgebracht werden, die mit diesen Rahmenbedingungen kompatibel sind.

Großflächiges Abscheiden von Perowskit- und Transportschichten

Ko-Verdampfung

Am ISFH wird dazu das Ko-Aufdampfen von Perowskitschichten entwickelt, also das gleichzeitige Verdampfen der einzelnen Perowskitkomponenten wie z.B. Blei(II)iodid (PbI₂) und Methylammoniumiodid (MAI). Durch die Kontrolle der einzelnen Aufdampfraten hat man eine enge Kontrolle über die Schichtzusammensetzung sowie über die Schichtdicke [2,3]. Gleichzeitig ist mit dieser Methode die konforme Beschichtung auf unebenen Oberflächen sehr gut möglich.

So weist die Oberfläche von c-Si-Solarzellen sogenannte zufällige Pyramiden auf, welche die Lichtkopplung in die Solarzelle deutlich verbessern. Laborverfahren wie das Aufschleudern flüssiger Komponenten (Spin-Coating) können auf solchen Oberflächen keine geschlossenen Schichten erzeugen. Dagegen sieht man in dem Rasterelektronenmikroskop-Bild in ► **Abbildung 2**, dass sich die ko-verdampfte Perowskit-Schicht gleichmäßig auf der texturierten Si-Oberfläche abgeschieden hat.

Mittels Aufdampfen lassen sich ebenso die elektronen- und löcherleitenden Transportschichten abscheiden und somit komplette Perowskit-Solarzellen herstellen.

Das KIT hat mit dieser Technik bereits einen Wirkungsgrad von 16,8% gezeigt. Solarzellen, bei denen „nur“ der Absorber verdampft wurde und bei denen daher eine organische Transportschicht verwendet werden konnte, erreichten sogar einen Wirkungsgrad von 18,1% [4].

Aufgedampfte Perowskit-Absorber sind auch ein Forschungsthema am HZB. In Kombination mit Transportschichten aus selbstorganisierten, molekularen Monolagen (self-assembled monolayers, SAM) wur-

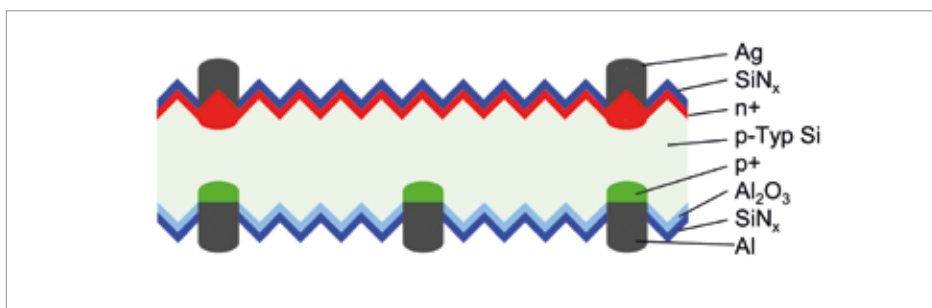


Abbildung 4a

Bifaziale PERC+-Solarzelle:
 Schema einer kristallinen Silizium-Solarzelle der sogenannten „Passivated Emitter and Rear Cell“-Architektur (PERC), welche sich derzeit als marktführende Technologie etabliert.

den dort Wirkungsgrade mit ko-verdampften Perowskit-Absorbern über 19,5% gezeigt [5].

Tintenstrahldruck

Eine weitere Methode zur großflächigen Abscheidung von Perowskit-Schichten ist der Tintenstrahldruck (Inkjet), der ebenfalls am KIT entwickelt wird. Hier werden die einzelnen Bestandteile des Perowskiten mittels des bekannten Tintenstrahlverfahrens auf die Oberfläche aufgebracht. Im Vergleich zum Aufdampfen wird dabei weniger Ausgangsmaterial benötigt, denn die Abscheidung verläuft gezielt und positionsgenau. Selbst die Erzeugung von Mustern ist mit diesem Verfahren möglich, wie beispielsweise in ► *Abbildung 3* gezeigt. Perowskit-Solarzellen mit tintenstrahldruckgedruckten Absorbern haben bereits Wirkungsgrade von 18,5% erzielt [6,7].

Dieser Schichtstapel besitzt eine hohe Temperaturstabilität und ist daher kompatibel mit den sogenannten Feuerprozessen der marktführenden c-Si-Solarzellen. Dieses „Feuern“ geschieht in Durchlauföfen bei Temperaturen oberhalb von 750°C und dient zur Ausbildung des Kontaktes zwischen den mittels Siebdruck aufgetragenen metallhaltigen Pasten und dem Silizium.

Damit eröffnet sich eine aus derzeitiger Marktsicht besonders attraktive Variante für c-Si-Perowskit-Tandemsolarzellen: das Upgrade der sogenannten Passivated Emitter and Rear Cell (PERC)-Technologie. Diese hält seit einigen Jahren immer mehr Einzug in die Massenproduktion und stellt selbst ein Upgrade zur bis dato dominanten Zellarchitektur mit ganzflächigem Aluminium-Rückkontakt dar. Einige Hersteller berichten von Wirkungsgraden um die 22,5% in Produktionslinien.

Direktes Upgrade für marktführende c-Si-Technologie denkbar

Das ISFH konzentriert sich im Bereich der Junction zwischen Top- und Bottomsolarzelle auf sogenannte Tunneljunctions auf Basis von polykristallinem Silizium. Die Tunneljunction besteht aus einer hochdotierten p-Typ-Poly-Si-Schicht, welche in direktem Kontakt mit einer hochdotierten n-Typ-Poly-Si-Schicht steht. Hinzu kommt eine sehr dünne Oxidschicht zwischen diesem poly-Si-Stapel und dem kristallinen Silizium der Bottomzelle [8].

Der schematische Aufbau einer bifazialen PERC+-Solarzelle ist in ► *Abbildung 4a* gezeigt. Die Basis bildet kristallines p-Typ-Silizium. Auf der Vorderseite befindet sich eine dünne Schicht kristallines, hochdotiertes n-Typ-Silizium sowie eine ebenfalls sehr dünne Schicht Siliziumnitrid. Die Rückseite ist mit einem Stapel aus Aluminiumoxid und Siliziumnitrid (Al₂O₃/SiN_x) beschichtet. Die Metallkontakte sind sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite nur lokal vorhanden, so dass die Solarzelle Licht von beiden Seiten einsammeln kann (Bifazialität).

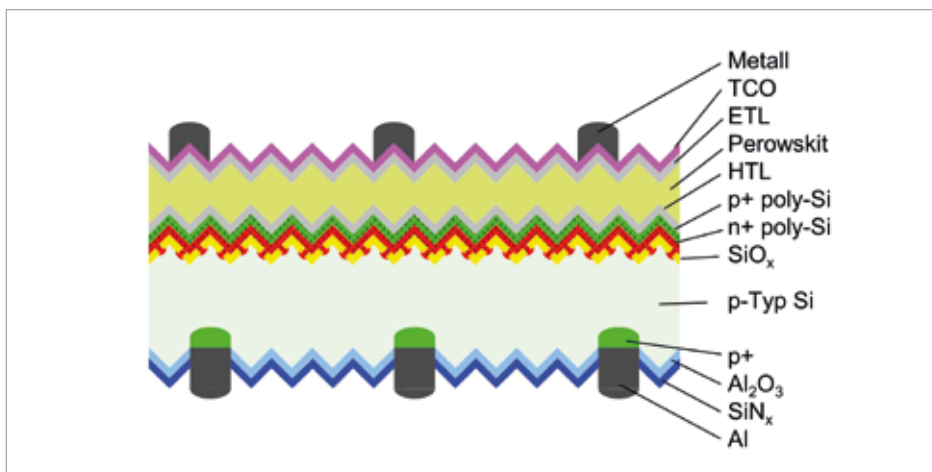


Abbildung 4b

Schema einer Tandemsolarzelle,
 welche dieselbe Rückseite besitzt wie die in *Abbildung 4a* gezeigte PERC-Solarzelle. Die Verbindung zwischen Si-Bottomzelle und Perowskit-Topzelle besteht aus zwei dünnen, hochdotierten polykristallinen Silizium-Schichten.

Ersetzt man nun das hochdotierte n-Typ-Gebiet sowie die SiN_x-Schicht an der Vorderseite der PERC-Solarzelle durch die oben beschriebene Tunneljunction, so übernimmt die Kombination aus sehr dünnem Siliziumoxid und hochdotiertem n-Typ-Poly-Si dessen Funktion – und reduziert zudem die Rekombinationsverluste an dieser Oberfläche. Die Perowskit-Topzelle kann dann direkt auf die hochdotierte p-Typ-Poly-Si-Schicht aufgebracht werden (► *Abbildung 4b*).

Dieser Ansatz wird von ISFH, HZB, dem Institut für Physik und Astronomie der Universität Potsdam zusammen mit den Firmen OxfordPV, RENA und Wavelabs im Rahmen des BMWi-geförderten Projektes Perowskit/POLO/PERC-Tandemsolarzelle (P3T) verfolgt.

Die Vorreiter: Silizium-Heterojunction-Bottomzellen

Silizium-Heterojunction (HJT)-Solarzellen zeichnen sich durch sehr hohe Wirkungsgrade (> 25%) aus und sind seit Jahren ein „Premium-Produkt“ im c-Si-Markt. Sie sind sehr gut mit Perowskit-Topzellen kombinierbar, da an der Vorderseite nur leichte Modifikationen durchgeführt werden müssen, um einen guten Übergang von Top- zu Bottomzelle zu ermöglichen.

In einer Kooperation zwischen HZB, der Universität Oxford sowie OxfordPV wurde mit diesem Ansatz im Juni 2018 ein Wirkungsgrad von 25,2% gezeigt [9]. Mittlerweile hat OxfordPV den Wirkungsgrad auf 28,0% (1 cm²) erhöht und hält damit den Weltrekord für diese Technologie [10]. Tandemsolarzellen, die komplett am HZB hergestellt werden, erreichen über 26% Wirkungsgrad [11].

Diese rasante Entwicklung zeigt das große Potenzial der Tandemtechnologie. HZB, Fraunhofer ISE und TU Berlin arbeiten nun zusammen mit von Ardenne und OxfordPV daran, diese HJT-Perowskit-Tandemsolarzellen auf die für c-Si-Solarzellen übliche Größe von 6-Zoll-Wafern hochzuskalieren und damit einen Wirkungsgrad von 26% zu erreichen (BMW-gefördertes Projekt ProTandem).

Im Rahmen dieser Zusammenarbeit soll außerdem die Serienfertigung von c-Si-Perowskit-Tandemsolarzellen demonstriert werden. Dafür wird derzeit in Brandenburg a. d. Havel eine 250 MW-Fertigungslinie von OxfordPV aufgebaut, welche auf einer Silizium-HJT-Linie von Meyer Burger beruht. Die Kommerzialisierung ist für das Jahr 2020 geplant.

Quellen

- [1] A. Jäger-Waldau, *PV Status Report 2018*, EUR 29463 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-97465-6, doi:10.2760/826496, JRC113626
- [2] S. J. Wolter, V. Steckenreiter, M. C. Tatarzyn, T. Wietler, R. Niepelt, and S. Kajari-Schröder, *Determination and influence evaluation of the acoustic impedance ratio for thermal co-evaporation*, Applied Physics Letters 113, 013301 (2018)
- [3] R. Niepelt, S. J. Wolter, M. Tatarzyn, M. Diederich, V. Steckenreiter, T. Wietler, R. Peibst, and S. Kajari-Schröder, *Application of Experimentally Determined Acoustic Impedance Ratio for Homogeneous Co-Evaporation of Perovskite Absorbers*, 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), Waikoloa Village, HI, 0508-0511 (2018)
- [4] T. Abzieher, J. A. Schwenzer, S. Moghadamzadeh, F. Sutterlüti, I. M. Hossain, M. Pfau, E. Lotter, M. Hetterich, B. S. Richards, U. Lemmer, M. Powalla, and U. W. Paetzold, *Efficient All-Evaporated pin-Perovskite Solar Cells: A Promising Approach Toward Industrial Large-Scale Fabrication*, IEEE Journal of Photovoltaics 9, 1249 (2019)
- [5] A. Al-Ashouri, A. Magomedov, M. Roß, M. Jošt, M. Talaikis, G. Chistiakova, T. Bertram, J. A. Márquez, E. Köhnen, E. Kasparavicius, S. Levenco, L. Gil-Escrig, C. J. Hages, R. Schlatmann, B. Rech, T. Malinauskas, T. Unold, C. A. Kaufmann, L. Korte, G. Niaura, V. Getautis, and S. Albrecht, *Conformal monolayer contacts with lossless interfaces for perovskite single junction and monolithic tandem solar cells*, Energy & Environmental Science 12, 3356-3369 (2019)
- [6] F. Mathies, H. Eggers, B. S. Richards, G. Hernandez-Sosa, U. Lemmer, and U. W. Paetzold, *Inkjet-Printed Triple Cation Perovskite Solar Cells*, ACS Applied Energy Materials 1 (5), 1834-1839 (2018)
- [7] T. Abzieher, S. Moghadamzadeh, F. Schackmar, H. Eggers, F. Sutterlüti, A. Farooq, D. Kojda, K. Habicht, R. Schmager, A. Mertens, R. Azmi, L. Klohr, J. A. Schwenzer, M. Hetterich, U. Lemmer, B. S. Richards, M. Powalla and U. W. Paetzold, *Electron-Beam-Evaporated Nickel Oxide Hole Transport Layers for Perovskite-Based Photovoltaics*, Advanced Energy Materials 9, 1802995 (2019)
- [8] R. Peibst, M. Rienäcker, B. Min, C. Klamt, R. Niepelt, T. Wietler, T. Dullweber, E. Sauter, J. Hübner, M. Oestreich, and R. Brendel, *From PERC to Tandem: POLO- and p+/n+ Poly-Si Tunneling Junction as Interface Between Bottom and Top Cell*, IEEE Journal of Photovoltaics 9 (1), 49-54, (2019)
- [9] L. Mazzarella, Y.-H. Lin, S. Kirner, A. B. Morales-Vilches, L. Korte, S. Albrecht, E. Crossland, B. Stannowski, C. Case, H. J. Snaith, and R. Schlatmann, *Infrared Light Management Using a Nanocrystalline Silicon Oxide Interlayer in Monolithic Perovskite/Silicon Heterojunction Tandem Solar Cells with Efficiency above 25%*, Advanced Energy Materials 9 (14), 1803241 (2019)
- [10] NREL Best Research-Cell Efficiency Chart, Version 20191106, <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20191106.pdf>
- [11] E. Köhnen, M. Jošt, A. B. Morales-Vilches, P. Tockhorn, A. Al-Ashouri, B. Macco, L. Kegelman, L. Korte, B. Rech, R. Schlatmann, B. Stannowski, and S. Albrecht, *Highly efficient monolithic perovskite silicon tandem solar cells: analyzing the influence of current mismatch on device performance*, Sustainable Energy Fuels 3, 1995-2005 (2019)

Windenergie vom Anfang bis zum Ende gedacht

Trotz schwieriger Marktlage in Deutschland wird Windenergie weltweit als eine der Säulen für ein dekarbonisiertes und umweltverträgliches Energiesystem angesehen. Ende 2018 waren knapp 600 TW weltweit an Windleistung installiert. Trotz der Verlangsamung des Höhenwachstums werden die Rotorblätter aber immer noch länger (► *Abbildung 1*). Dies wird durch stetige Verbesserungen des Blatt-designs und der eingesetzten Werkstoffe erreicht.

Im Folgenden sollen die aktuellen Entwicklungen in der Windenergieforschung für zwei Bereiche aufgezeigt werden:

1. Anströmung und Nachlauf des Windes, also der Weg der Luftmoleküle vor und hinter Windenergieanlagen
2. Der Weg vom Material zur Produktion von Rotorblättern von Windenergieanlagen, die mit dieser Luftströmung interagieren

1. Bestimmung von Windpotenzialen und Anlagennachläufen

Windenergieanlagen (WEA) stellen für den Wind Hindernisse dar, und dem Wind wird Energie entzogen. Dadurch wird der Wind gebremst und die Luftunruhe (Turbulenz) erhöht.

Die genaue Kenntnis von Strömungsverhältnissen vor WEA ist wichtig

- für die Potenzialbewertung von Anlagenstandorten,
- um im Betrieb ein besseres Lastmanagement zu erreichen und
- um die Schallabstrahlung zu bestimmen.

Klassisch werden Windmessungen als Zeitreihe über etwa ein Jahr mit einem meteorologischen Messmasten vorgenommen (► *Abbildung 2*).

Die großen Nabenhöhen kommerzieller WEA werden jedoch von den meteorologischen Messmasten inzwischen kaum noch erreicht. Messungen durch mehrere Masten mit Auslegern und Sensoren in ausgeklügelter Position und Abständen können als sogenanntes Met-Masten-Array erweitert werden.

Alternativ stehen heute neben in-situ-Geräten an Messmasten immer mehr Fernmesssysteme zur Verfügung, mit denen Wind- und Turbulenzfelder vertikal aufgelöst bis in einige hundert Meter Höhe erfasst werden können [1] (► *Abbildung 3*).

Gleichzeitig erlaubt neuere Messtechnik zusätzlich die Erfassung von turbulenten Windströmungen. Diese Variationen in der Anströmung hängen von Tagesgang und komplexen Topografien ab und beeinflussen auch die Nachlaufcharakteristik.

Numerische Simulationen der turbulenten Strömung untersuchen außerdem detailliert den Einfluss auf WEA und die Nachläufe [2].

Bei Windmessungen mit *light detection and ranging* (Lidar) oder *sound detecting and ranging* (Sodar) wird der dreidimensionale Windvektor aus mindestens drei synchronisierten Messungen in drei verschiedene Richtungen zusammengesetzt. Insgesamt erzielen Lidarmessungen ähnlich gute Ergebnisse wie klassische Verfahren, höhere Unsicherheiten entstehen aber in komplexem Gelände. Windmessungen mit mehreren gepulsten Lidaren zeigen eine geringere Auflösung verglichen mit in-situ Messungen. Windmessungen mit kontinuierlich scannenden Lidar-



DLR
Dr. Sarina Keller
sarina.keller@dlr.de

Fraunhofer IEE
Berthold Hahn
berthold.hahn@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer IWES
Florian Sayer
florian.sayer@iwes.fraunhofer.de

IZES
Jan Hildebrand
hildebrand@izes.de

KIT
Prof. Dr. Stefan Emeis
stefan.emeis@kit.edu

ZSW
Andreas Rettenmeier
andreas.rettmeier@zsw-bw.de

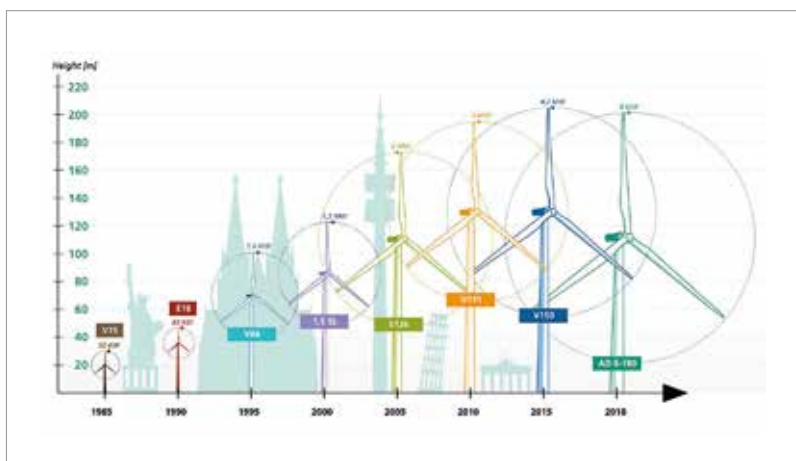


Abbildung 1
Größenzunahme von Windenergieanlagen
Quelle: IWES

Abbildung 2
Zwei meteorologische Messmasten
 des WindForS-Forschungstestfelds am Albtrauf bei Geislingen/Donzdorf
 Quelle: WindForS



Systemen erfassen die Strömung mit höherer räumlicher Auflösung aber geringerer Reichweite [3].

Neuartige Messungen mit Drohnenschwärmen (UAV = Unmanned Aerial Vehicle) erlauben die simultane Erfassung des dreidimensionalen Windvektors an bis zu 100 flexiblen Messpunkten. Dadurch kann das dreidimensionale Windfeld beispielsweise in einer Ebene vor oder hinter der WEA mit einer hohen räumlichen Auflösung direkt erfasst werden [4].

In anderen Forschungsprojekten wurden Messungen über der Nordsee per Flugzeug und Satellit durchgeführt. Je nach Wetterlage erholt sich die Windgeschwindigkeit manchmal erst nach einigen wenigen Kilometern (onshore) oder 10 bis zu 100 Kilometer (offshore) hinter einem Windpark wieder auf ihren ursprünglichen Wert. Der Effekt ist besonders stark über der relativ glatten Meeresoberfläche. Stromabwärtsliegende Windparks können bei Windgeschwindigkeiten, die zwischen der Einschaltgeschwindigkeit und der Nenngeschwindigkeit liegen, im Ertrag beeinträchtigt werden. Bei dem weiteren Ausbau in der Nordsee ist diese Abschattung bei bestimmten Wetterlagen relevant (wärmere Luft über kälterem Wasser) (► *Abbildung 4*).

Inzwischen haben Fernerkundungssysteme Einzugesunden in die Technische Richtlinie „Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen“ der FGW e.V. und der IEC61400-12 „Messung des Leistungsverhaltens von Windenergieanlagen“. Außerdem liegen seit diesem Jahr mit dem *weather research and forecast model* (WRF) simulierte Winddaten für verschiedene, windenergierelevante Höhen für ganz Europa im New European Wind Atlas vor [5].

Bei Simulationen kommen zusätzlich zu *Large Eddy Simulationen* (LES) auch *Computational Fluid Dynamics* (CFD) und *Detached-Eddy Simulationen* (DES) zum Einsatz. DES sind eine Kombination aus LES und *Reynolds Averaged Navier Stokes Modellen* (RANS), letztere sind jedoch sehr rechenintensiv. Durch die Kombination von LES und RANS erreicht man eine höhere Genauigkeit im Vergleich zur reinen LES-Simulation, was für Nachlaufsimulationen oder für Standorte im bergig-komplexen Gelände Vorteile bringen können.

Die zunehmende Kenntnis von Windströmungen vor und hinter einer WEA hilft auch bei der Bestimmung von Schallausbreitung. Eine situationsabhängige Schallbeurteilung (anstelle von starren Grenzwerten) erlaubt eine ertragreichere Stromproduktion oder eine bessere Nutzung der Flächen bei gleichzeitig besserer Akzeptanz. Messungen im Umfeld von WEA haben zum Beispiel die Veränderungen des Schallpegels in Zusammenhang mit Wettersituationen verdeutlicht [6]. Der Nachweis durch Messungen und Modellrechnungen, wie stark der Schallpegel unter bestimmten Wettersituationen bei den Anwohnern reduziert werden kann, erlaubt hier eine höhere Flexibilität. Die bisherigen Methoden (ISO 9613-2) sind diesbezüglich noch nicht verlässlich genug. Nur mithilfe von simulierten Schallausbreitungsrechnungen kann man diesen Einfluss gezielt nachweisen

Abbildung 3
Windmessungen mit Lidar:
 Verbund aus synchronisierten Lidar-Scannern und einem Lidar-Profilier
 Quelle: ZSW



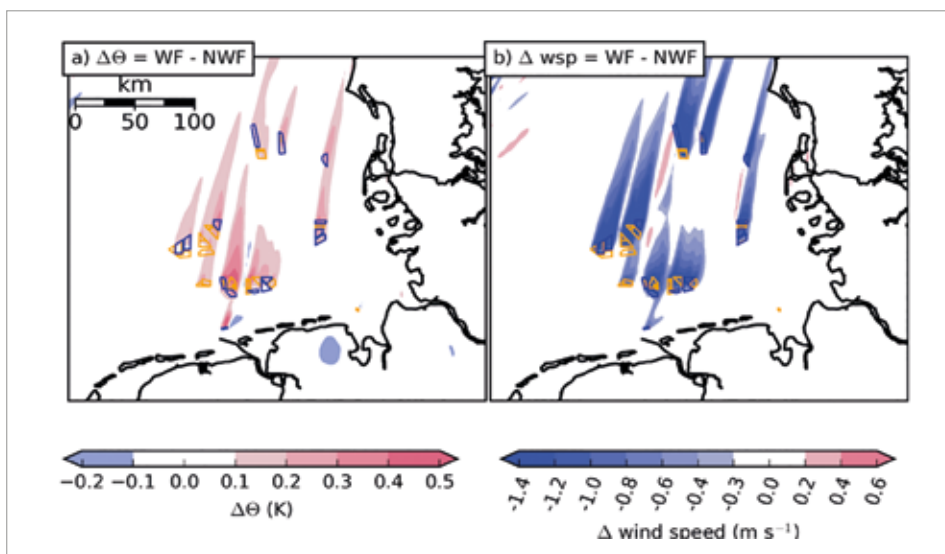


Abbildung 4
Einfluss von WEA auf Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe
 Quelle: KIT, Projekt WIPAFF

und beziffern. Messtechnisch ist es nicht möglich, diesen Anteil der Lärmbelastung aus der Gesamtlärmbelastung herauszufiltern.

Neben der technischen Dimension sind Schallaspekte insbesondere aus Akzeptanzsicht eine wichtige Einflussgröße. Das Ausmaß der Lärmbelastung hängt neben den messbaren akustischen Größen – also der Geräuschbelastung – von zahlreichen nicht-akustischen Faktoren ab, wie z.B. der Einstellung zur Geräuschquelle oder der wahrgenommenen Fairness des Planungsverfahrens. In diesem Zusammenhang spielt das Verfahrenswissen eine große Rolle, welches potenzielle Unsicherheiten minimiert, die konfliktverschärfend wirken können. Hierzu zählen insbesondere Fragen nach den Grenzwerten der TA Lärm (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm), deren Messung und Überprüfung bei Genehmigung und Betrieb von WEA. In diesem Zusammenhang ist das Vertrauen in den Projektierer bzw. Betreiber, die Genehmigungsbehörden und in das Genehmigungs- bzw. Monitoringverfahren ein relevanter Parameter. Um das Verfahrenswissen zu erhöhen und einen Raum für einen moderierten sachlichen Austausch zu bieten, sind Dialogverfahren ein wichtiger Lösungsansatz. Hierfür gibt es aktuell verschiedene Beispiele, z.B. das Forum Energiedialog in BaWü (FED), das Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (KNE) oder den Winddialog Saar.

2a. Materialien in Rotorblättern

Alle modernen Rotorblätter folgen einem ähnlichen strukturellen Ansatz (► *Abbildung 5*). Die unterschiedlichen Biegemomente werden von den Holmgurten aus Faserverbundwerkstoffen, den Stegen und durch die Blattnase und Endkante übernommen. Dabei verwenden sowohl die Holmgurte als auch häufig die Laminare im Blattendkantenbereich unidirektionale Fasern. Die Stege und die aerodynamische Hülle der Blattstruktur werden typischerweise mit Sandwichtaufbauten realisiert, die aus Kernwerkstoffen (Balsa-holz, PET-Schäume oder PVC-Schäume) und vergleichsweise dünnen Laminaten bestehen.

In Rotorblättern kommen heute im Wesentlichen *glasfaserverstärkte Kunststoffe* (GFK) zum Einsatz, die einen guten Kompromiss zwischen Kosten und spezifischen mechanischen Eigenschaften darstellen. Da die Durchmesser von WEA zunehmen, steigen die Blattlänge und überproportional auch die Rotorblattmassen. Damit erhöhen sich aber auch die statischen und insbesondere dynamischen Lasten an den Rotorblättern und die Beanspruchungen im Blattanschlussbereich deutlich.

Durch den gezielten Einsatz von *kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff* (CFK) in den Holmgurten konnten bereits in der Vergangenheit größere Rotorblätter

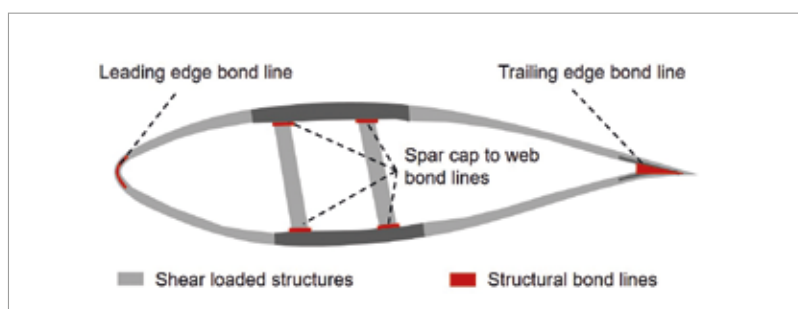


Abbildung 5:
Beispiel für eine typische Rotorblattstruktur
 [Quelle: IWES]

Abbildung 6
**Beispiel für eine
 Blattprüfung**
 Quelle: IWES



gebaut werden. *Faser Metall Laminate* (FML) am Blattwurzelanschluss stärken die Verbindungsbereiche („Lochleibungsfestigkeit“), und mit Nanopartikeln modifizierte Faserverbunde die Risshemmung [7]). Diese neuen Materialsysteme können sowohl in endlosfaserverstärkten Laminaten der Rotorblätter als auch in den benötigten Klebstoffen zum Fügen der Ober- und Unterschale eingesetzt werden. Die bisherigen Fasermaterialien werden zum Verkleben hauptsächlich mit einer Epoxidharzmatrix kombiniert. Es gibt aber auch Bestrebungen, Polyurethane als Matrixmaterial zu verwenden. Eine vereinfachte Aushärtung und eine niedrigere Viskosität sind die Vorteile dieses Materials [8]. Durch Materialuntersuchungen und Ganzblattprüfungen werden die Werkstoffe und Strukturen immer besser verstanden, die Simulationswerkzeuge verbessert und Unsicherheiten im Design reduziert (► **Abbildung 6**).

2b. Bauweisen und Produktion

Die heutige Produktion von Rotorblättern für Windkraftanlagen ist immer noch überwiegend von der konventionellen zweischaligen Bauweise geprägt. Die zwei Halbschalen werden dabei in zwei separaten Werkzeughälften gefertigt und anschließend verklebt.

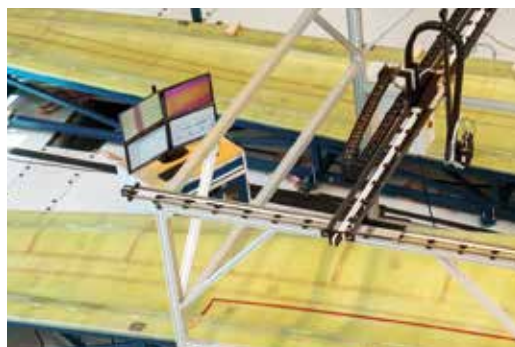


Abbildung 7
**Optische Messzelle
 im Einsatz an einer
 Rotorblattform**
 Quelle: DLR

Ein verbreitetes Konzept ist die Fertigung mit Hilfe von *Prefab*-Bauteilen (in separaten Formwerkzeugen vorab gefertigt), die als ausgehärtetes Faserverbundbauteil in die jeweilige Formwerkzeughälfte eingelegt werden. Zu den Bauteilen, die im *Prefab*-Verfahren gefertigt werden, zählen unter anderem die Gurte und die Stege, die vor der Verklebung der beiden Halbschalen auf eine der beiden Halbschalen laminiert werden. Für deren Herstellung wird inzwischen immer häufiger *Pultrusionstechnologie* (Strangziehverfahren) eingesetzt, um hohe Faservolumenanteile und sehr genaue Faserausrichtungen zu erhalten. Die *Preforms* aus Faserhalbzeugen werden in den Formen überwiegend durch vakuumunterstützte Harzinfusionsverfahren mit Harz getränkt. Zur Aushärtung des Harzes wird mit beheizten Formwerkzeugen gearbeitet.

Neue Verfahren in der Rotorblattproduktion konzentrieren sich insbesondere auf Qualitätsverbesserungen, das Erreichen einer gleichmäßigeren Qualität (geringere Fertigungstoleranzen) und geringere Produktionskosten durch Materialeinsparungen und einen besseren Personaleinsatz.

Beispiele für solche Entwicklungen sind das Verkleben und das Schleifen von Rotorblattoberflächen, bei dem der Klebstoff bedarfsgerecht aufgetragen wird [9]. Eine Optimierung der Bauweisen und Fertigungsverfahren hinsichtlich einer verbesserten oder automatisierten Fertigung muss dabei schon beim Design der Rotorblätter beginnen (Design for Production). Des Weiteren wird an Technologien geforscht, die eine berührungslose Überwachung der Bauteilqualität während der Fertigung erlauben (► **Abbildung 7**). Hierzu wird zum Beispiel eine Messbrücke entwickelt und prototypisch umgesetzt, die mit unterschiedlichen optischen Sensoren ausgestattet ist und die Messung von Prozessparametern wie der Fließfrontposition des Harzes, der Bauteiltemperatur sowie der

Bauteildicke erlaubt. Auch die Bilddokumentation des Baufortschritts ist möglich. Die Messbrücke ist auf einem Schienensystem montiert und über die gesamte Länge der Rotorblattform verfahrbar.

Im Projekt SmartBlades 2 (► *Abbildung 8*) wurden vier Rotorblätter nach dem jetzigen Industriestandard gefertigt und jeder Arbeitsschritt hinsichtlich seines Automatisierungspotenzials untersucht. Ein wesentlicher Aspekt der Untersuchung war dabei die Wirtschaftlichkeit geeigneter Automatisierungskonzepte und deren Machbarkeit [10]. Kostentreiber bei der Rotorblattproduktion sind die verwendeten Fertigungsmaterialien wie Glas- bzw. Kohlefaserhalbzeuge. Besondere Anforderungen liegen hier bei der Qualitätssicherung der Produktion um die Sicherheitsfaktoren zu senken und somit Gewicht und Materialkosten zu reduzieren.

Quellenangaben

- [1] Emeis, S. (2010): Measurement Methods in Atmospheric Sciences. In situ and remote. In: Quantifying the Environment, Vol. 1. Borntraeger Stuttgart.
- [2] Lutz, T., Schulz, C., Letzgus, P., and Rettenmeier, A. (2017): Impact of Complex Orography on Wake Development: Simulation Results for the Planned WindForS Test Site. In: Journal of Physics, Conference Series, Volume 854.
- [3] Bradley, S., A. Strehz, S. Emeis (2015): Remote sensing winds in complex terrain – a review. In: Meteorologische Zeitschrift, 24, 547-555.
- [4] Wildmann, N., Hofsaß, M., Weimer, F., Joos, A., and Bange, J. (2014): MASC – a small Re-motely Piloted Aircraft (RPA) for wind energy research. In: Advanced Science Research, 11, 55-61.
- [5] Wildmann, N., Bodini, N., Lundquist, J. K., Bariteau, L., and Wagner, J. (2019): Estimation of turbulence parameters from scanning lidars and in-situ instrumentation in the Perdigão 2017 campaign. In: Atmospheric Measurement Techniques Discussion, in review.
- [6] LIPS Projekt: [https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=Deutsches%20Zentrum%20f%C3%BCr%20Luft-%20und%20Raumfahrt%20e.V.%20\(DLR\)&m=2&id=661486&p=13&s=14&v=10](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=Deutsches%20Zentrum%20f%C3%BCr%20Luft-%20und%20Raumfahrt%20e.V.%20(DLR)&m=2&id=661486&p=13&s=14&v=10)
- [7] Exner, W., Hein, R., Mahrholz, Th., Wierach, P., Monner, H.P., Sinapius, M. (2018): Impact of nanoparticles on the process-induced distortions of carbon fiber reinforced Plastics: An experimental and simulative approach. In: Journal of Applied Polymer Science, 135, 47031.
- [8] Arash, B., Exner, W., Rolfes, R. (2019): A viscoelastic damage model for nanoparticle/epoxy nanocomposites at finite strain: A multiscale approach. In: Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 128, 162-180.
- [9] Schmidt, S., Mahrholz, Th., Kühn, A., Wierach, P. (2019): Powder binders used for the manufacturing of wind turbine rotor blades. Part 2. Investigation of binder effects on the mechanical performance of glass fiber reinforced polymers. In: Journal of Composite Materials, 53 (16), 2261-2270.
- [10] <https://www.forschungsverbund-windenergie.de/en/joint-projects/smart-blades-2-en>



Abbildung 8
Fertigung eines Testrotorblattes im Projekt SmartBlades 2
 Quelle: IWES

Bioenergie – intelligenter Baustein für ein nachhaltiges Energiesystem



DBFZ

Dr. Nora Szarka
nora.szarka@dbfz.de



DBFZ

Martin Dotzauer
martin.dotzauer@dbfz.de

Dr. Jan Liebetrau
jan.liebetrau@dbfz.de

Alena Hahn
alena.hahn@dbfz.de

Eric Mauky
eric.mauky@dbfz.de

Christopher Schmid
christopher.schmid@dbfz.de

Fraunhofer IEE
 Dr. Bernd Krautkremer
bernd.krautkremer@iee.fraunhofer.de

ISFH
 Oliver Mercker
mercker@isfh.de

IZES
 Dr. Patrick Matschoss
matschoss@izes.de

KIT
 Prof. Dr. Nikolaus Dahmen
nikolaus.dahmen@kit.edu

UFZ
 Michael Steubing
michael.steubing@ufz.de

Prof. Dr. Daniela Thrän
daniela.thraen@ufz.de

Wuppertal Institut
 Dr. Karin Arnold
karin.arnold@wupperinst.org

1. Herausforderungen der Energiewende

Das Ziel der Energiewende – ein sicheres, umweltverträgliches und ökonomisch erfolgreiches Energiesystem (Deutsche Bundesregierung 2010) – birgt diverse Herausforderungen. Diese umfassen die Erreichung der Klimaneutralität, den Umstieg auf erneuerbare Energieträger in allen Sektoren (inkl. Schwerlast- und Flugverkehr sowie industrielle Prozesswärme) als auch deren gegenseitige Integration. Bioenergie kann hierzu einen multiplen Beitrag leisten, sowie negative Emissionen bereitstellen und darüber hinaus auch Beiträge jenseits des Energiesystems erbringen, wie Naturschutz, ländliche Entwicklung, oder die Bereitstellung von biogenem CO₂ als Rohstoff für die chemische Industrie. Somit ist Bioenergie ein unverzichtbarer Bestandteil für die Lösung der Herausforderungen in der Transformation zu einem nachhaltigen Energiesystem (Klepper und Thrän 2019; Szarka et al. 2013; Thrän 2015; Pfeiffer und Thrän 2018; Fishedick et al. 2015).

Gegenwärtig stellt Bioenergie mit dem größten Anteil an erneuerbaren Energien im Primärenergieverbrauch (60%) als auch im Endenergieverbrauch (53%), mehr als alle anderen erneuerbaren Energieträger zusammen (AGEB 2019). Dabei bestehen Unterschiede zwischen den Endenergiesektoren: während Bioenergie in der Bruttostromerzeugung 24% des erneuerbaren Stroms deckt, dominiert sie die erneuerbare Bereitstellung von Wärme mit 86% als auch den erneuerbaren Endenergieverbrauch im Verkehrssektor mit 88% in 2018 (AGEE Stat 2019). Aufgrund der Bedeutung von Bioenergie heute werden folgende Beispiele vorgestellt, welche einen zukünftigen multiplernen Systembeitrag von Bioenergie fokussieren.

2. Methoden

Szenarien, Szenario Tool

Der künftige Einsatz von Bioenergie hängt vor allem von der zukünftigen Verfügbarkeit von nachwachsenden Rohstoffen sowie Rest- und Abfallstoffen für die energetische Nutzung ab.

Weitere Faktoren sind die Verfügbarkeit alternativer Optionen zur Dekarbonisierung, Wirtschaftswachstum, Energieeffizienzsteigerungen, oder die Einbeziehung von negativen Emissionstechnologien (z.B. Bioenergie with Carbon Capture and Storage, BECCS).

Aufgrund dieser Bandbreite an möglichen Annahmen ergeben sich sehr unterschiedliche Anteile der Bioenergie in Szenarien in 2050. Auf Basis von 35 Studien aus einem Szenario Tool des DBFZ wurde der Bioenergieanteil an Primär- und Endenergieverbrauch des Strom-, Wärme- und Kraftstoffsektors ausgewertet. Nur neun Studien beinhalten Daten zum gesamten Primärenergieverbrauch über alle Sektoren hinweg, wobei der Anteil der Bioenergie bei bis zu 30% liegt (WWF 2009).

Allgemein ist eine Tendenz zu anteilig höherem Einsatz an Bioenergie in ambitionierteren Energie- und Klimaszenarien feststellbar.

Die 13 Studien, die Angaben zum Endenergieverbrauch machen, zeigen eine unterschiedliche Nutzungsverteilung von Biomasse auf die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr: die Klimapfade-Studie (BDI 2018) teilt 59% der energetisch genutzten Biomasse der Industrie zu, während etwa die Modell-Deutschland-Studie 59% der Bioenergie dem Verkehr widmet (WWF 2009). In keiner der Studien finden sich entsprechend hohe Anteile für den Stromsektor, diese erreichen maximal 10% (Greenpeace 2010). Damit sind vor allem schwer dekarbonisierbare Bereiche von Bedeutung, wie etwa Luftverkehr oder Hochtemperaturwärme in der Industrie.

Eine vorläufige qualitative Betrachtung der Studien zeigt, dass Biomasse als Flexibilitätsoption und das Zusammenspiel mit anderen erneuerbaren Energien eine herausgehobene Stellung hat, insbesondere auch im Hinblick auf die Sektorenkopplung.

Weitere gelegentlich genannte Motive sind Versorgungssicherheit, Bioenergie als nachhaltiger CO₂-Lieferant für die stoffliche Nutzung oder die energetische Nutzung (PtX-Prozesse) oder das BECCS-Konzept.

Projekt „BE20Plus“

Ziel des Projektes BE20Plus [1] ist es, auf Basis energiewirtschaftlicher Analysen verschiedene Geschäftsmodelle für Betriebsstrategien und Perspektiven der Bestandsbiogasanlagen zu entwickeln und zu evaluieren.

Ein Teilziel dabei ist zu prüfen, welches Potenzial die Wärmenutzung für bestehende Bioenergieanlagen bietet, auf Basis energiewirtschaftlicher und technisch-ökonomischer Analysen. Dabei wurden die Lage anderer Energieinfrastruktureinrichtungen, erneuerbarer Stromerzeuger und potenzieller Wärmesenken als Anhaltspunkt für eine räumlich differenzierte Bewertung genutzt. Es stellte sich heraus, dass nur zirka 50%

der bestehenden Bioenergieanlagen Wärmeabnehmer in einer akzeptablen Distanz für ein Nahwärmenetz haben. Zudem sind die Erlösoptionen für den Verkauf von Wärme sehr heterogen. Daher ist das tatsächlich erschließbare Potenzial deutlich geringer, als das theoretisch ermittelte Potenzial von ca. 150 TWh_{th}. Die Nutzung der Wärme an Bioenergieanlagen bietet insgesamt eine Möglichkeit für bestehende Anlagen für einen Weiterbetrieb, nach dem Auslaufen der EEG-Vergütungsperiode.

Projekte zur Prozessregelung zur Flexibilisierung

Biogasanlagen haben das Potenzial, bedarfsorientierten Strom bereitzustellen, um die Diskrepanz zwischen Energiebedarf und -angebot durch fluktuierende Quellen wie Wind- und Sonnenenergie auszugleichen. Modelprädiktive Regelungen (angewandt am DBFZ) sind zeitdiskrete dynamische Modelle, die das zukünftige Verhalten des Prozesses in Abhängigkeit von den Eingangssignalen berechnen. Diese ermöglichen eine bedarfsorientierte Regelung der Biogasproduktion, beispielsweise durch die Entwicklung von Fütterungsstrategien für die Erfüllung von bedarfsorientierten Gasverbrauchsplänen (Mauky et al. 2016). Damit wird das Flexibilitätsspektrum der Anlage erweitert, notwendiger Gasspeicherbedarf gesenkt und das Emissionsrisiko verringert.

Zukünftige Anwendungen können witterungsbedingte Temperatureinflüsse auf den Gasspeicher, die Preisentwicklung bei Strommärkten oder Stromprodukten sowie den Bedarf von potenziellen Wärmekunden integrieren. Insbesondere die Bedarfsprofile von Wärmekunden und die Einbindung von entsprechenden Speichern erweitern das Modell erheblich.

Biogasanlagen sind damit in der Lage langfristige (saisonale), sowie kurzfristige (z.B. Wochenfahrpläne) Bedarfe abzubilden.

Projekte dazu sind die von der Sächsischen Aufbau-bank (SAB) geförderten Vorhaben RegEnFlx (abgeschlossen) und Gazelle (bis Januar 2020 laufend). Weitere Projekte wurden am IEE für die Erweiterung der Flexibilität von Biogasanlagen entwickelt: „UBEDB“ (Upgrading von Bestandsbiogasanlagen hin zu flexiblen Energieerzeugern durch eine bedarfsorientierte Dynamisierung der Biogasproduktion) und „ReBi“ (Regelung der Gasproduktion von Biogasanlagen).

Projekt „OptDienE“

Das Ziel des Forschungsvorhabens OptDienE [2] besteht darin, das theoretische Potenzial von Einzelraumfeuerungen (ERF) zur Vermeidung von Strombedarfsspitzen bei der Versorgung von Wohngebäuden mit zentraler Wärmepumpe (WP) sowie von Gasnachfragespitzen bei der Versorgung selbiger mit zentralen Gasfeuerungen zu ermitteln. Hierbei werden sowohl der Status Quo als auch die Verhältnisse in den Stützjahren 2030 und 2050 betrachtet, wofür die prognostizierten Veränderungen im Gebäude- und Anlagenbestand berücksichtigt werden. Die Modellierung und integrierte Simulation der ausgewählten Gebäude und Wärmeversorgungskonzepte erfolgt in der dynamischen Systemsimulationsumgebung TRNSYS 17. Da das Projekt noch am Anfang steht (Projektlaufzeit: bis 31.03.2021), liegen noch keine abschließenden Ergebnisse vor. Gleichwohl wurden bereits ausgewählte Ein- und Mehrfamilienhäuser in TRNSYS modelliert, wobei ein Schwerpunkt auf der Abbildung des Lüftungsverhaltens sowie des gebäudeinternen konvektiven Wärmetransports durch Türöffnungen lag.

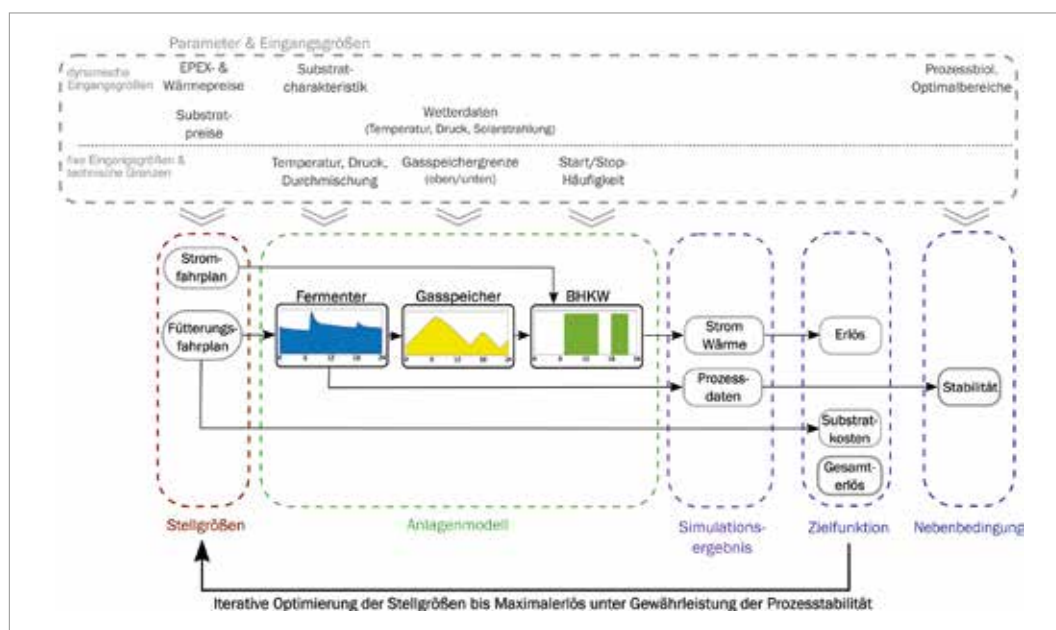


Abbildung 1
Bestandteile einer Prozessoptimierung zur ganzheitlichen Regelung von Biogasanlagen
 Quelle: DBFZ

Projekt „reFuels“

Um auch im Mobilitätssektor signifikant zu den Zielen der Energiewende beizutragen, müssen sowohl die Herstellungsverfahren für regenerative Energieträger wie auch die Antriebstechnik selbst deutlich weiterentwickelt werden.

Bioenergie kann hier durch die Produktion regenerativer Kraftstoffe beitragen. Im Projekt reFuels [3] wird dieser Beitrag durch die Betrachtung verschiedener Szenarien im Hinblick auf Mengen- und CO₂-Minderungspotenzial bis 2030 bewertet. Neben Power-to-Liquid (PtL) werden auch Biomass-to-Liquid (BtL)-Konzepte bewertet. Diese flüssigen Kraftstoffe haben hohe Energiedichten, zeigen einfache Speicher- und Transportierbarkeit und können die existierende Transportinfrastruktur und -logistik sowie die Anwendungstechnologien nutzen.

Weiterhin wird die gesellschaftliche Akzeptanz für diese Kraftstoffe im Projekt untersucht und gefördert.

Übersichtsstudie „MakroBiogas“

Um die gesamtheitliche Wirkung von Biogasanlagen einschätzen zu können, müssen Betrachtungen über den Rahmen der EEG-Regelungen, das heißt über den Stromsektor hinaus, getätigt werden.

Das Ziel der Übersichtsstudie „MakroBiogas“ [4] ist die Systematisierung und ggf. Quantifizierung von Biogas-Leistungen in anderen Sektoren als dem Strom- bzw. Wärmesystem. Hierbei handelt es sich insbesondere um die naturwissenschaftlich-agronomischen Bereiche Boden (Nährstoffmanagement, Erosionsschutz, Fruchtfolge), Landnutzung (Biodiversität und Grünlandschutz, Tourismus und Erholung), Verwertung und Entsorgung (Bioabfall, Grünschnitt, Wirtschaftsdünger), sowie die nicht-energetische Treibhausgas-Vermeidung über die Verwertung tierischer Exkremente.

Die Ergebnisse zeigen: wenn der Anlagenbestand zukünftig weitestgehend außer Betrieb gehen sollte, fallen im Energiesystem nicht nur 30 TWh Strom und 15 TWh Wärme aus Kraft-Wärmekoppelung bis 2035 weg, sondern es entsteht auch ein negativer Einfluss auf die oben genannten Leistungen. So können beispielsweise die Verwertungskapazitäten von Gülle und Festmist massiv absinken oder die nicht-energetische Treibhausgasreduktion könnte absinken, welche dann anschließend anderweitig erbracht werden müsste. Insgesamt zeigt die Studie, dass Biogas eine Reihe von Leistungen in unterschiedlichen Bereichen erbringt, für deren bessere Entfaltung ein ökonomisch-regulatorischer Rahmen notwendig ist, der ein faires Wettbewerbsfeld (level-playing field) generiert und die Kosten-Nutzen-Relation von Biogas im Vergleich zu anderen erneuerbaren Technologien angemessen widerspiegelt.

ESYS-Stellungnahme „Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung“

Ziel der ESYS-Studie [5] ist die Entwicklung von politischen Optionen für langfristige und nachhaltige Bioenergie-Strategien. Über die Entwicklung eines umfassenden Bewertungsrahmens kann geprüft werden, welchen Beitrag zum Klimaschutz Energiekonzepte leisten und ob negative soziale oder ökologische Folgen vermieden werden können.

Dazu wurden folgende Schritte unternommen:

- 1) Definition von Kriterien
- 2) Erstellung einer Bewertungsskala mit fünf Stufen (Ampel) für jedes Kriterium
- 3) Definition von Bioenergietechnologien und Nutzungspfaden für 2018 und 2050
- 4) Definition von Referenzsystemen für die Bewertung
- 5) Anwendung der Bewertungsskala für die definierten Kriterien und Bioenergiekonzepte
- 6) Erstellung einer Ergebnistabelle mit den Bewertungen der ausgewählten Technologien auf Basis aller Kriterien

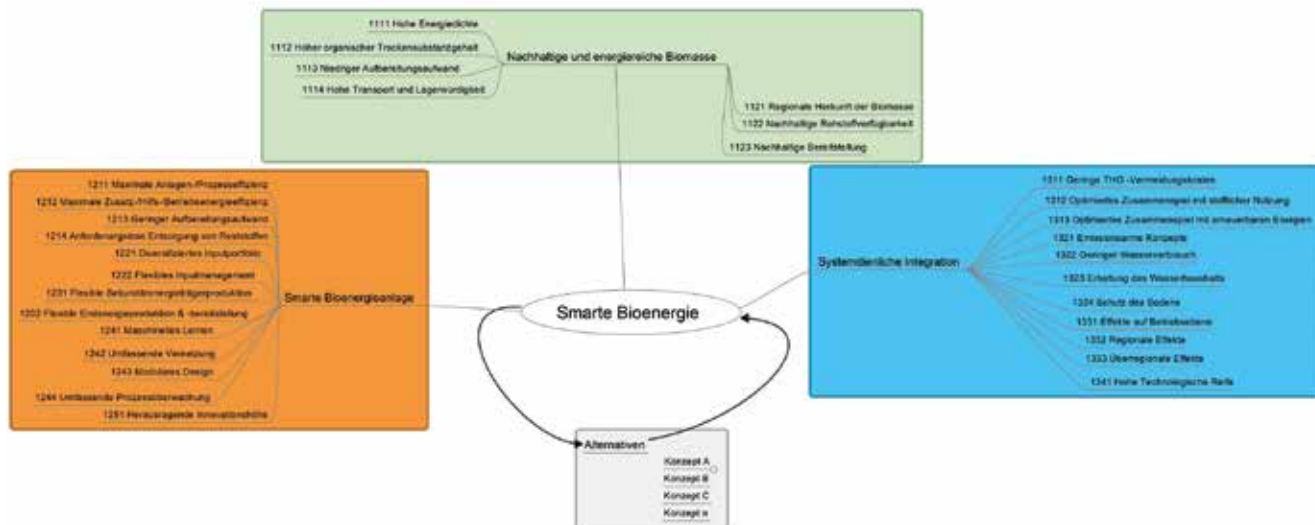
Folgende Vorschläge werden aus den Ergebnissen abgeleitet:

- Rest- und Abfallstoffe können risikoarm energetisch verwendet werden.
- Für einen nachhaltigen Einsatz muss Bioenergie systemdienlich genutzt werden: Sie kann diejenigen Funktionen im Energiesystem übernehmen, für die andere Erneuerbare ungeeignet sind. Bioenergie könnte beispielsweise Schiffe und Flugzeuge antreiben oder Wärme für Industrieprozesse liefern.
- Um „negative Emissionen“ zu erzeugen, sollte die Option BECCS bei künftigen Einsatzgebieten der Bioenergie mitbedacht werden.
- Ein ausreichend hoher CO₂-Preis und Zertifizierungssysteme können sicherstellen, dass Bioenergie dem Klima nützt. Diese sind am wirksamsten, wenn nicht nur Bioenergieträger, sondern alle landwirtschaftlichen Produkte darin einbezogen werden.

Projekt „SmarKt“

Ziel des Projektes SmarKt [6] ist eine Bewertung integrierter Bioenergiekonzepte hinsichtlich ihres Systembeitrags und Marktpotenzials, auf Basis von bestehenden Projektergebnissen im Rahmen des BMWi-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“.

Dafür wird ein umfassendes Ziel-Indikator-Set, basierend auf den Anforderungen des Smart Bioenergy Konzepts (Thrän 2015) entwickelt, erprobt und über Expert*innen validiert.



Im Detail werden die Anforderungen für smarte Bioenergiekonzepte an die Biomassebereitstellung, die Bioenergieanlage sowie deren Integration in das Gesamtsystem in ein hierarchisches Zielsystem transformiert. Anschließend werden Indikatoren auf der untersten Zielebene abgeleitet. Die Indikatoren dienen als Bewertungskriterien für die multikriterielle Bewertungen der Projektergebnisse nach dem Ansatz des Analytic Hierarchy and Network Processes (Saaty 2004). Innerhalb der Bewertung werden die Projektergebnisse in Nutzwerte überführt, welche zur einheitlichen Bewertung der Projekte hinsichtlich ihres Beitrags zu den einzelnen Anforderungen, genutzt werden. Dadurch wird der Systembeitrag der Bioenergiekonzepte als Ganzes und aufgeschlüsselt nach Anforderungsebene sowie Indikatoren veranschaulicht.

3. Zusammenfassung und Empfehlungen

Die erläuterten Beispiele befassen sich mit einer Vielzahl der multiplen Anforderungen an Bioenergie, wobei der Fokus verstärkt auf der Flexibilisierung, dem Zusammenspiel mit erneuerbaren Energien und dem Klimabeitrag liegt. Andere Aspekte, wie negative Emissionen, die Nutzung von biogenem CO₂ oder die Interaktion mit der stofflichen Nutzung werden kaum betrachtet. Dies spiegelt sich auch in ihrem heutigen Umfeld wider, wo technische, ökonomische und politisch-gesellschaftliche Barrieren der vollumfänglichen Entfaltung der Systembeiträge der Bioenergie entgegenstehen: Zukunftsträchtige Bioenergie-technologien wie beispielsweise Lignozellulose-Kraftstoffe befinden sich noch im Entwicklungsstadium.

Die gegenwärtigen ökonomischen Anreize für Bioenergie fokussieren nur begrenzt die Leistungen der Bioenergie und bieten keine langfristige Perspektive. Zudem ist die ökonomische Bewertung durch eine fehlende Internalisierung aller Systembeiträge verzerrt. Politisch-gesellschaftlich bestehen für BECCS oder die Nutzung von CO₂ Akzeptanzprobleme, verbunden mit einem Mangel an Information. Letztlich bedarf es einer gesellschaftlich vereinbarten Bioenergiestrategie, welche die zukünftigen Nutzungspfade in der Bioenergie festlegt (Witte 2019).

Somit werden folgende Empfehlungen abgeleitet:

- Entwicklung eines Vergütungssystems, welches alle Systembeiträge der Bioenergie berücksichtigt (auch Beiträge jenseits des Energiesektors)
- Auswahl oder Priorisierung von Bioenergie-Nutzungspfaden
- Weiterentwicklung von Szenarien hin zu Bioökonomie-Szenarien
- Einbindung von NETs (negative emission technologies) in bestehende Szenarien
- Entwicklung von Guidelines für die Erstellung und Interpretation von Szenarien
- Verstärkung der Preissignale am Markt für Flexibilitätssdienstleistungen auf Erzeugerseite sowie Anreize zum flexiblen Lastmanagement
- Entwicklung einer umfassenden KWK-Strategie
- Markteinführung von Lignozellulose-basierten Kraftstoffen
- Anstoß einer gesellschaftlichen Debatte über negative Emissionen
- Anspruchsvoller CO₂-Preis
- in den Vordergrund stellen der Kohlenstoff-Bindung für landwirtschaftliche Prozesse

Abbildung 2
Ganzheitliche Bewertung integrierter Bioenergiekonzepte

Literaturverzeichnis

- AGEB (Hg.) (2019): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2018. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen.
- AGEE Stat (Hg.) (2019): Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2018. Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energien Statistik.
- BDI (Hg.) (2018): Klimapfade für Deutschland. Im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI). Unter Mitarbeit von Philipp Gerbert, Patrick Herhold, Jens Burchardt, Stefan Schönberger, Florian Rechenmacher, Almut Kirchner et al. Boston Consulting Group BCG; Prognos. Berlin. Online verfügbar unter https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/20180118_BDI_Studie_Klimapfade_fuer_Deutschland_01.pdf – zuletzt geprüft am 08.04.2019
- Deutsche Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Online verfügbar unter <https://archiv.bundesregierung.de/resource/blob/656922/779770/794fd0c40425acd7f46afacbe62600f6/energiekonzept-final-data.pdf?download=1>
- Fishedick, Manfred; Görner, Klaus; Thomeczek, Margit (2015): CO₂. Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Greenpeace (Hg.) (2010): Klimaschutz: Plan B 2050. Energiekonzept für Deutschland. Studie wurde im Auftrag von Greenpeace durchgeführt von EUtech Energie und Management. Unter Mitarbeit von Katja Barzantny, Sigrid Achner, Sebastian Vomberg, Helmuth M. Groscurth, Andree Böhling und Thomas Breuer. EUtech Energie und Management. Hamburg. Online verfügbar unter https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/plan_b_2050_lang_0.pdf – zuletzt geprüft am 02.04.2019
- Klepper, Gernot; Thrän, Daniela (2019): Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Potenziale – Technologien – Zielkonflikte. München (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft).
- Mauky, Eric; Weinrich, Sören; Nägele, Hans-Joachim; Jacobi, H. Fabian; Liebetau, Jan; Nelles, Michael (2016): Model predictive control for demand-driven biogas production in full scale, In: Chem. Eng. Technol. 39 S. 652–664, doi.org/10.1002/ceat. 201500412.
- Pfeiffer, Diana; Thrän, Daniela (2018): One Century of Bioenergy in Germany. Wildcard and Advanced Technology. In: Chemie Ingenieur Technik 90 (11), S. 1676–1698. DOI: 10.1002/cite. 201800 154.
- Saaty, Thomas L. (2004): Fundamentals of the analytic network process – Dependence and feedback in decision-making with a single network. In: J. Syst. Sci. Syst. Eng. 13 (2), S. 129–157. DOI: 10.1007/s11518-006-0158-y.
- Szarka, Nora; Scholwin, Frank; Trommler, Marcus; Jacobi, H. Fabian; Eichhorn, Marcus; Ortwein, Andreas; Thrän, Daniela (2013): A novel role for bioenergy: A flexible, demand-oriented power supply. In: Energy 61. DOI: 10.1016/j.energy. 2012.12.053.
- Thrän, Daniela (Hg.) (2015): Smart bioenergy. Technologies and concepts for a more flexible bioenergy provision in future energy systems. Cham, Heidelberg u.a.: Springer. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-16193-8>
- Witte, Julika (Hg.) (2019): Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften. München, Halle (Saale), Mainz: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. – Nationale Akademie der Wissenschaften; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. (Stellungnahme). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:3:2-105631>
- WWF (Hg.) (2009): Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050. Vom Ziel her denken. Die Studie wurde erstellt von Öko-Institut und Prognos. Unter Mitarbeit von Almut Kirchner, Felix Christian Matthes, Michael Schlesinger, Bernd Weinmann, Peter Hofer, Vincent Rits et al. Öko-Institut; Prognos. Basel, Berlin. Online verfügbar unter https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Modell_Deutschland_Endbericht.pdf – zuletzt geprüft am 02.04.2019

Quellenangaben

- [1] <https://bioenergie.fnr.de/projekte-und-foerderung/ausgewaehlt-projekte/be20plus/>
- [2] <https://isfh.de/forschung/solare-systeme/projekte/optdiene/>
- [3] www.refuels.de
- [4] <http://www.izes.de/de/projekte/makrobiogas>
- [5] www.energiesysteme-zukunft.de/de/themen/bioenergie
- [6] www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/smarkt-541/

Herausforderungen und Perspektiven bei Lithium-Ionen-Batterien

Einleitung

Die zunehmende Umstellung der Stromversorgung auf fluktuierende erneuerbare Energien macht den Versatz zwischen dem Energieangebot und der Energienachfrage stärker. Die Angebots- und Nachfrage-lücken können am besten durch eine Zwischenspeicherung ausgeglichen werden. Dabei kommen verschiedene Speichertechnologien in Frage. Die größte Verbreitung erleben zurzeit aber die elektrischen Energiespeicher. Diese werden auch in immer mehr Anwendungen aus der Unterhaltungs- und Haushaltselektronik, aber vor allem in Elektrofahrzeugen eingesetzt. Die Marktentwicklungsszenarien sagen eine Verzehnfachung der aktuell eingesetzten Kapazität von 150 GWh bis 2030 voraus. (BloombergNEF)

Der aktuelle Bedarf an Lithium-Ionen Batterien wird überwiegend durch fünf chemische Zusammensetzungen des Kathodenmaterials abgedeckt (die aktuelle Verteilung zeigt ► *Abbildung 1 oben*), welche in ihre Entwicklung sehr weit fortgeschritten sind und in den meisten Merkmalen (Energie,- Leistungsdichte, Spannung) die physikalische Möglichkeiten zunehmend ausschöpfen. Allerdings bedürfen Aspekte der Alterung sowie Sicherheit und Zuverlässigkeit – auf Zell- wie auch Systemebene – weiterer Aufmerksamkeit. Dies gilt insbesondere auch für die aktuell mehr und mehr in den Fokus rückende Zweitnutzung von gebrauchten Fahrzeugbatterien.

Gegen 2030 wird eine starke Dominanz der NMC-Technologie (Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Batterien) erwartet (► *Abbildung 1 unten*), bedingt durch die Marktdominanz der elektromobilen Anwendung. Diese lässt sich direkt in den rasanten Anstieg von Lithium- und Kobaltbedarf übersetzen.

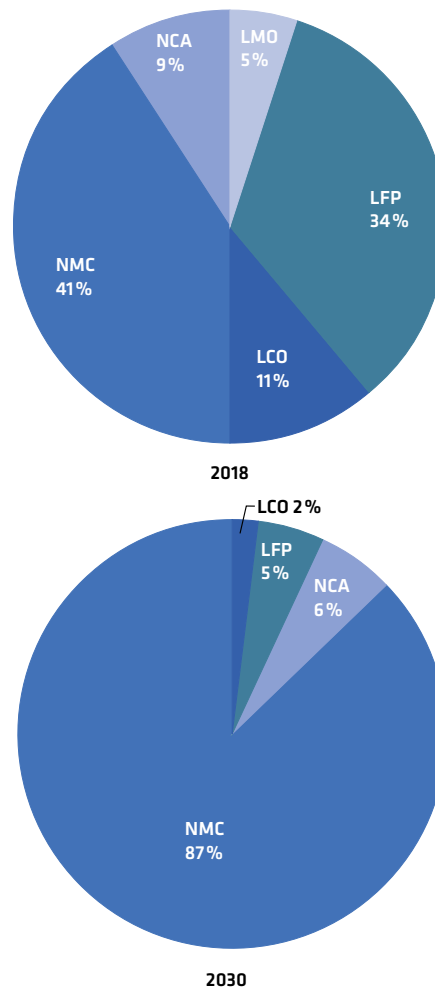
Wie man der ► *Abbildung 2* entnehmen kann, hat Lithium zwar das höchste Redoxpotenzial, seine Vorräte sind aber am geringsten. Außerdem ist die Gewinnung der beiden kritischen Metalle, Lithium und Kobalt, geographisch eingeschränkt, da die meisten Lithiumreserven in Südamerika zu finden sind und 90% der Kobaltreserven in den potenziell instabilen Ländern Kongo und Sambia konzentriert sind. Dementsprechend zwingt der prognostizierte Rohstoffbedarf die F&E immer mehr nach alternativen Post-Lithium-Ionen- und Post-Lithium-Technologien zu suchen, welche in ► *Abbildung 1* noch gar keinen oder keinen sichtbaren Marktanteil zeigen.

Nachfolgend werden die zwei wichtigsten Herausforderungen bei den aktuell verwendeten Batterien untersucht: Alterung und Sicherheit. Anschließend werden einige Beispiele aus der Forschung zur Post-Lithium-Ionen- und Post-Lithium-Technologien näher betrachtet.

Herausforderungen bei der Technologie im Einsatz

Alterung

Lithium-Ionen-Batterien haben in den letzten Jahren eine bedeutende Technologieentwicklung erlebt. So werden die von den Automobilherstellern vorgegebenen Betriebszyklen von bis zu mehreren Tausend mittlerweile von Batteriezellen mit mittleren Energiedichten leicht erreicht, bei einem Kapazitätsverlust von 20–25%. Dabei sinkt die Restkapazität auf Werte



Fraunhofer ISE

Dr. Nina Kevlishvili
nina.kevlshvili@ise.fraunhofer.de

HZB

Dr. Sebastian Risse
sebastian.risse@helmholtz-berlin.de

FZ Jülich

Prof. Dr. Egbert Figgemeier
e.figgemeier@fz-juelich.de

KIT

Prof. Dr. Helmut Ehrenberg
helmut.ehrenberg@kit.edu

Prof. Dr. Maximilian Fichtner
maximilian.fichtner@kit.edu

ZAE

Michael Brüitting
michael.brueitting@zae-bayern.de

Abbildung 1

Verteilung des Kathodenmaterials

(oben: in 2018, unten: in 2030)

NMC: Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt

NCA: Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid
LMO: Lithium-Mangan-Oxid-Spinell

LFP: Lithium-Eisen-Phosphat

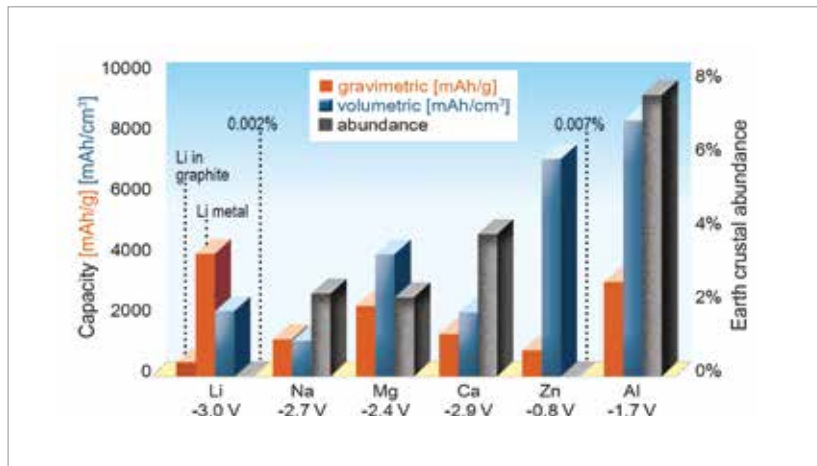
LCO: Lithium-Cobalt-Oxid

[AVICENNE ENERGY 2019]

Batterie-Rohstoffe nach Kapazitätsdichte und Häufigkeit

[G.A. Elia, et int., S. Passerini, R. Hahn, Adv. Mater. 2016]

Abbildung 2



um die 80%. Diese Tatsache sagt allerdings wenig über die Alterungsprozesse aus, insbesondere im niedrigeren Restkapazitätsbereichen der Zweitnutzung, d.h. unter der 80%- bzw. 75%-Grenze der ursprünglichen Kapazität.

Das heutige Verständnis der Alterungsprozesse baut auf den Einzelkenntnissen des Verhaltens der Zellkomponenten, empirischen Untersuchungen der Abhängigkeit von Zellperipherie und äußeren Bedingungen im oberen Ladezustandsbereich auf. Die Vielfalt der Zellen und der riesige Parameterraum der Einflussfaktoren in der Batterie erschwert die Modellierung des jeweiligen Verhaltens. Die zuverlässigen Voraussagen des Ladezustands, der Lebensdauer und der Betriebssicherheitsgrenze fordern weiteren Forschungsaufwand für die Erstanwendung und den gezielte Wissensaufbau für die Zweitnutzung.

So muss zum Beispiel die durch Zellaufladung verursachte Expansion und Kontraktion der Anode als wesentlicher mechanischer Degradationsmechanismus mitberücksichtigt werden. Die Folgen solcher Degradation wurden anhand Mikro-Röntgen-Computertomographie (CT) an zylindrischen Zellen untersucht

(► *Abbildung 3 links*), welche zwischen 5 und 15% des State of Charge (SOC) zyklisiert wurden. Dieser Ladezustandsbereich ist durch wesentliche Volumenänderung der Graphitanode geprägt. Die CT-Aufnahmen bestätigen die großflächigen Verformung der Anode bei der Zelle mit verdächtigem Alterungsverhalten (► *Abbildung 3 rechts, Verhalten entlang der 0°-Linie*). Solch eine Verformung kann Einfluss auf das Sicherheitsverhalten der Zelle entweder durch offensichtliches Strukturversagen oder durch Entstehung von lokalen Überladungen an der Anode haben. Die Letzteren können die Kupferauflösung als Folge haben (Figgemeier et al., Journal of The Electrochemical Society, 166 (14) A1-A8, 2019).

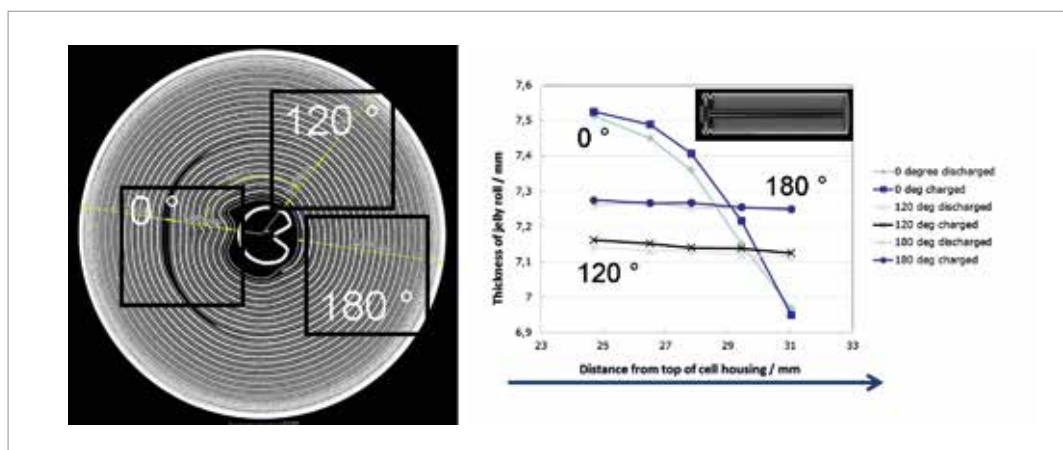
Die Ermüdungs- und Alterungserscheinungen der Graphitanode führen nur in seltenen Fällen zu solchen dramatischen Verformungen. Dagegen ist ein Einfluss auf die Lithium-Verteilung in der Anode immer zu erwarten. Dies wurde mit einem räumlich aufgelösten Neutronenstrahl anhand neuer und gealterter Zellen (1000 Zyklen bei 25°C Umgebungstemperatur) untersucht. Die Ergebnisse in ► *Abbildung 4* zeigen die Reduktion der Lithiumkonzentration, welche direkt mit der Anodenermüdung zusammenhängt,

Mechanische Alterung der Graphitanode

links: Aufnahme der Mikro-Röntgen-Computertomographie
rechts: Verteilung der Schichtdicke von sieben inneren Schichten entlang der Zelllänge

[Figgemeier et al., Journal of The Electrochemical Society, 166 (14) A1-A8, 2019]

Abbildung 3



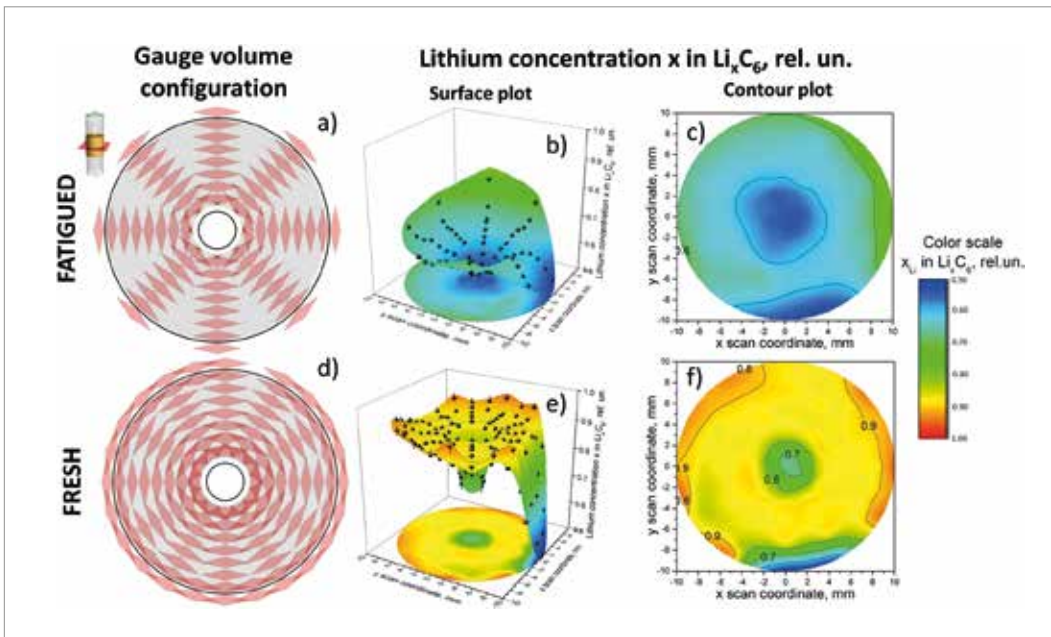


Abbildung 4
Lithium-Verteilung in der Graphitanode
in gealterten Zellen (a,b,c) und in neuen Zellen (d,e,f)
[M. J. Mühlbauer et al., J. Power Sources 348, 2017, 145]

als auch die räumliche Inhomogenität der Verteilung, welche auf das SEI-Wachstum (Solid Electrolyte Interface) und die ungleichmäßige Elektrolytverteilung zurückzuführen ist (M. J. Mühlbauer et al., J. Power Sources 348, 2017, 145).

Sicherheit

Die meisten Sicherheitsfragestellungen in Bezug auf Batterien sind kein F&E-Gegenstand mehr. Die Ausnahme stellt der interne Kurzschluss dar (► *Abbildung 6*).

Von allen Außenbedingungen hat die Temperatur der Zellen im Betrieb den stärksten Einfluss auf die Batteriealterung. Diesem Einfluss kann nur durch Temperierung auf Systemebene entgegen gewirkt werden. Es werden zurzeit zahlreiche Temperier-Konzepte ausprobiert und gegenübergestellt, wie z.B. aktive Fluidkühlung, passive PCM (Phase Change Materials) oder Heat-Pipes. Die Suche nach effektiven Thermomanagement-Lösungen benötigt verlässliche Prozessparameter welche mit unterschiedlichen Charakterisierungsmethoden bestimmt werden (► *Abbildung 5*).

Der interne Kurzschluss ist entweder auf intrinsische Fehler (verursacht durch die Fertigung) oder auf die Alterung zurückzuführen. Daher wird er nie ganz ausgeschlossen werden können, wobei durch eine Verbesserung der Qualitätskontrolle und eine intensive Untersuchung der Additive eine wesentliche Reduktion der Vorfälle erreicht wird.

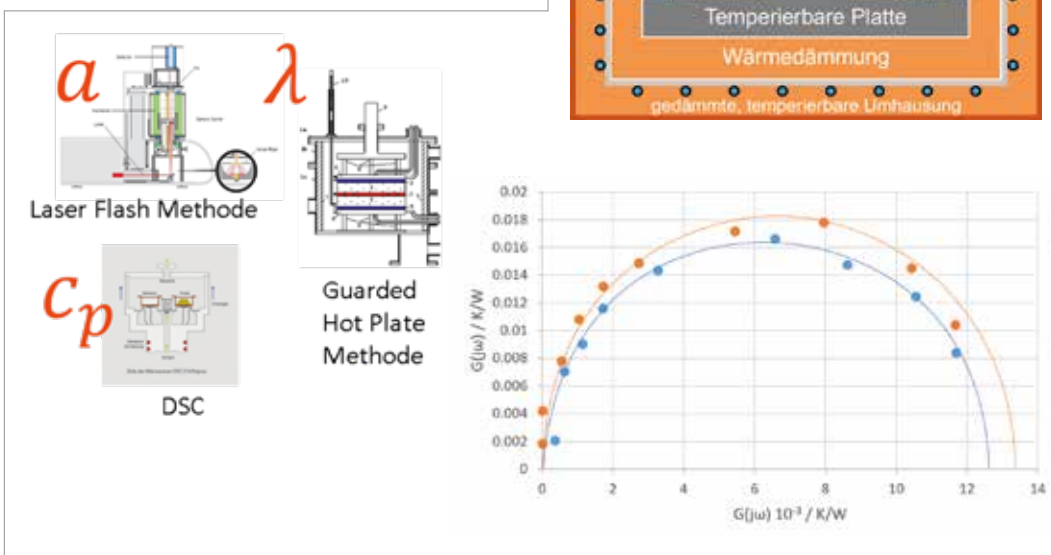
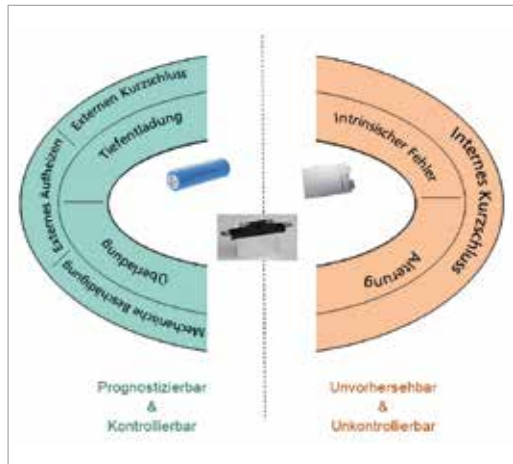


Abbildung 5
Methoden zur Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften
[ZAE]

Abbildung 6
Ursachen des kritischen Versagens der Zellen
 [Fraunhofer ISE]



Im Kontrast dazu nimmt die Vorfalldenscheinlichkeit mit immer höherer Energiedichte der Zellen zu. Eine weitere Verschärfung ist mit verbreiteter Nutzung der Batterien in der Zweitanwendung zu erwarten. Als Lösung wird die Unterbindung einer Kettenreaktion (Einbindung weiterer Zellen in den thermischen Prozess), die Propagationshemmung, gesehen, welche auf der kontrollierten Energiefreisetzung aufbaut.

Trotz erhöhter Aufmerksamkeit ist dieser Aspekt der Batteriesicherheit bisher wenig verstanden und als Gegenmaßnahmen sind nur vereinzelte Insellösungen vorhanden, welche sich entweder auf die Unterbindung der Wärmeübertragung, auf das kontrollierte Gasablassen, oder auf die Brandverhinderung konzentrieren.

Die Findung von konsolidierten Lösungen benötigt die systematische Untersuchung der Prozesse beim thermischen Durchgehen unter kontrollierten Laborbedingungen. Dies wird allerdings durch eine Vielfalt von Zellen und durch fehlende realitätsnahe Initiierungsmethoden erschwert. Die aktuell etablierte Methoden der mechanischen (nageln, quetschen) und thermischen (Heizfolie, Heizdraht) Initiierung, sowie exotische Methoden (Kupfer Tab, Nickelpartikel, Einbau von Mikroheizern in die Elektrode, Lasererwärmung etc.) bilden die Prozesse beim internen Kurzschluss nur bedingt genau ab.

Technologien der Zukunft

Die F&E-Aktivitäten der Zukunft kann man in drei Kategorien unterteilen:

- **Advanced Lithium-Ion**
 (z.B. Hochenergie NMC-Kathode „Nickel-rich“, Si/C-Hochkapazitätsanode mit bis zu 20% Si-Anteil, Feststoffelektrolyt, etc.)
- **Post-Lithium-Ion**
 (z.B. Festkörperelektrolyt mit metallischer Anode, Lithium-Schwefel, etc.)
- **Post-Lithium**
 (z.B. Natrium-Ionen, Zink-Luft, Magnesium-Schwefel, etc.)

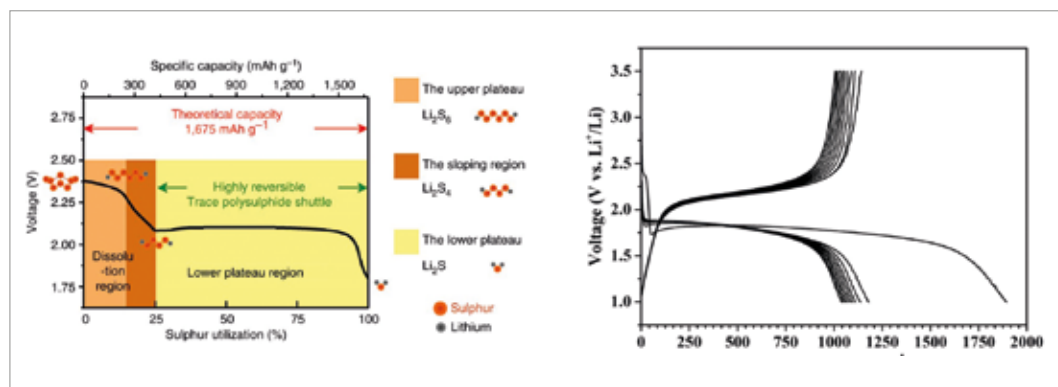
Hier konzentrieren wir uns auf den zwei letzten Gruppen anhand konkreter Beispiele von Lithium-Schwefel- und Magnesium-Schwefel-Batterien.

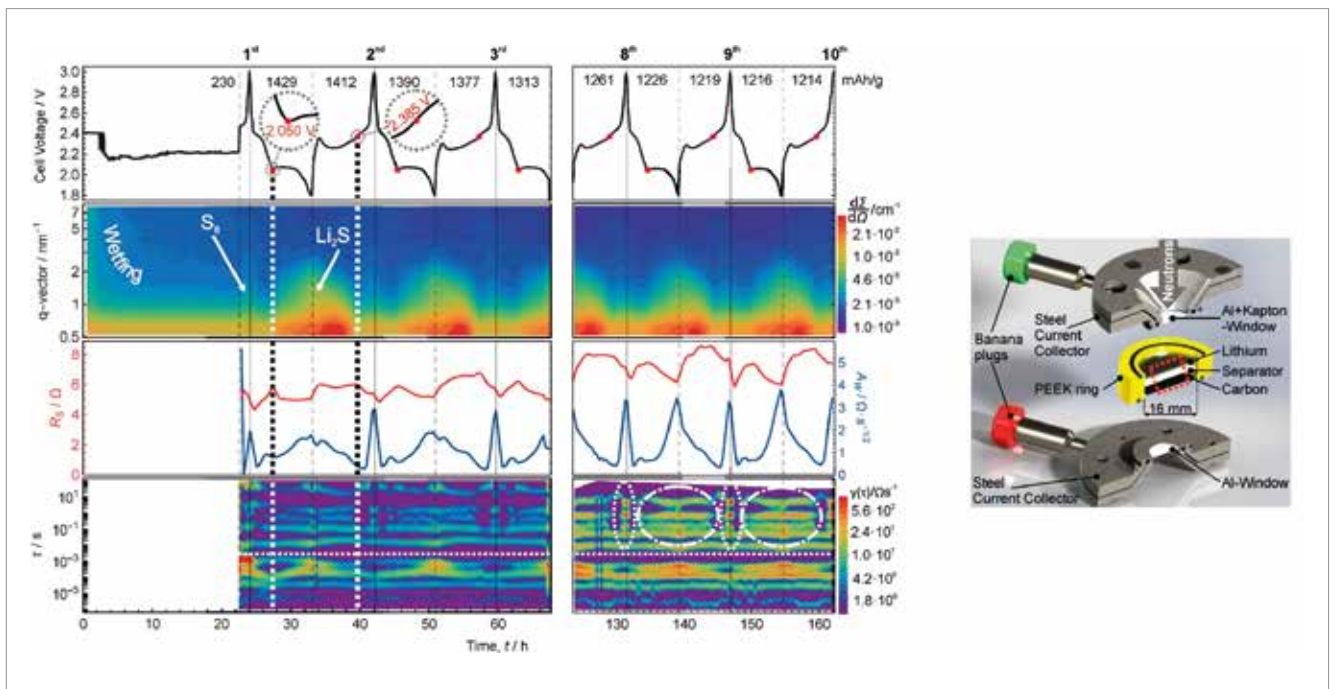
Post-Lithium-Ionen-Batterien

Eine vielversprechende Post-Lithium-Ionen-Technologie ist die Lithium-Schwefel-Batterie. Das Hauptproblem stellen die Polysulfide dar (Li_2S_x , $x=4-8$), welche sich in Elektrolyt lösen und zur Selbstentladung und Kapazitätsverlust beitragen (► [Abbildung 7 links](#)).

In dieser Batterie erfolgt die Entladung stufenweise: Oberes Plateau, fallender Bereich und unteres Plateau. Wie man ► [Abbildung 7](#) entnehmen kann, entspricht jede Stufe der Formierung von Aktivmaterial. Damit stellt der Elektrolyt immer eine Mischung von verschiedenen Polysulfid-Zwischenprodukten dar. Die Polysulfide höheren Grades sind im organischen Elektrolyt hochlöslich und tragen dadurch zum Kapazitätsverlust bei. Außerdem diffundieren die Zwischenprodukte zur Lithiumanode, wo Li_2S und Li_2S_2 erzeugt werden, die wiederum zurück zur Schwefelkathode wandern und zurück in die Polysulfide konvertiert werden (Shuttle-Verhalten). Ein Teil der nicht-löslichen Polysulfide (Li_2S und Li_2S_2) sammelt sich auf der Anode und erzeugt eine Isolierschicht, wodurch die Zelleistung sinkt (Y.-S. Su et al., Nature 2013).

Abbildung 7
Formierung von Polysulfiden in Lithium-Schwefel-Batterien
 links: Y.-S. Su et al., Nature (2013),
 rechts: M. Helen, M. Fichtner et al., Scientific Reports (2015))





Durch die Weiterentwicklung der Kathode kann dieses Verhalten verbessert werden. Konkret wurde aus Kokosnussschalen ein mikroporiger Kohlenstoff vorbereitet (Porengröße ca. 0,5 nm), welcher als Wirtsmaterial für Schwefel eingesetzt wurde. Als Folge passen in diese Poren nur die kleine S_4 -, S_3 - und S_2 -Allotrope hinein und entsprechend werden beim Entladen nur Polysulfide niedriger Ordnung formiert. Auf ► **Abbildung 7 rechts** sind 10 Lade-/Entladeprofile dargestellt. Im ersten Zyklus sind immer noch zwei Plateaus beim Entladen zu erkennen, dabei reagiert Lithium mit Kohle in der Composite-Kathode. Im weiteren Verlauf verschwindet das erste Plateau und der Kapazitätsverlust verlangsamt sich erheblich (M. Helen, M. Fichtner et al., Scientific Reports 2015).

Es wurde eine Untersuchung mit operando Neutronenkleinwinkelstreuung durchgeführt, um zu prüfen ob S_8 - und Li_2S -Polysulfide sich an der Kathode in den Mikroporen des Kohlenstoffmaterials abscheiden oder nicht. Die Zelle wurde zehnmals zyklisiert. In ► **Abbildung 8** sind die Messergebnisse für die ersten und die letzten drei Zyklen dargestellt. Die obere Reihe zeigt den Spannungsverlauf während der Zyklisierung, die zweite Reihe die Streuungsintensität. Der sich wiederholende Verlauf der Streuungsintensität demonstriert die Reversibilität der Prozesse bei der Ladung und Entladung. Die lokalen Maxima entsprechen geladenem (S_8 – weniger ausgedruckter Pick) und ungeladenem (Li_2S – deutlicher Pick) Zustand. Diese Aussagen sind durch EIS-Messungen (Electrochemical-Impedanz-Spectroscopy) bestätigt. Dies ist in den zwei unteren Reihen auf ► **Abbildung 8** dargestellt (S. Risse et al., ACS Nano 13, 10233-10241, 2019).

Post-Lithium-Systeme

Die Batterien die auf multivalenten Metallen basieren, werden als Technologien der nächsten Generation, Post-Lithium, gesehen. Die meisten dieser Technologien liegen zurzeit mehrere Jahre von der Marktreife entfernt, da sie neue Elektrodenmaterialien, neue Elektrolyte und manche sogar neue Zelldesignkonzepte benötigen.

Eine vielversprechende Technologie baut auf der Verwendung von Magnesium als Anodenmaterial auf. Magnesium zeigt zwar etwas niedriges Redoxpotential von -2,37V, hat aber dafür eine hohe theoretische Kapazität von 3833 mAh/cm^3 und ist außerdem frei von Dendritenbildung. Die Herausforderung ist hier die Findung von effizienten, chemisch stabilen Elektrolyten und passenden Kathodenmaterialien mit hoher Spannung und Kapazität.

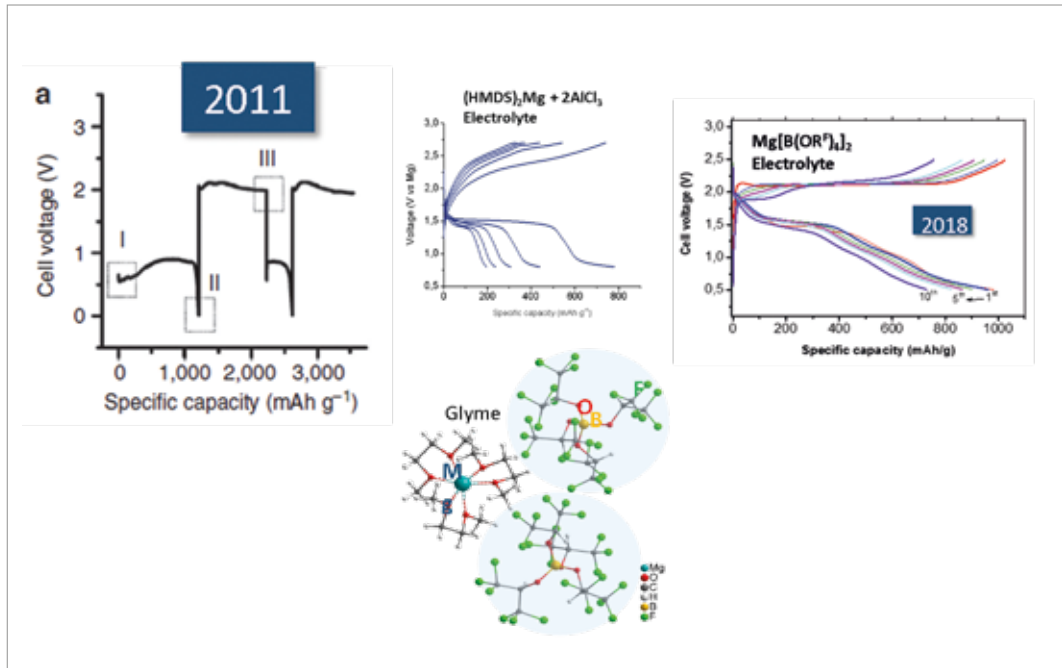
► **Abbildung 9** zeigt die Entwicklung des Elektrolyten für Magnesium-Schwefel Batterien seit 2011. Als Kathodenmaterial wurde dabei Schwefel mit Aktivkohlegewebe als Wirtsmaterial verwendet. Mit ursprünglich eingesetztem Chlorid-haltigen Elektrolyt zeigte die Zelle eine niedrige Leerlaufspannung von 0,5V und die Entladespannung von nur 0,89V. Was noch wichtiger ist, es waren nur wenige Zyklen möglich, wobei die Zelle beim ersten Entladen 1200 mAh/g Kapazität lieferte, im zweiten Zyklus aber nur noch 394 mAh/g. Diese schnelle Degradation wurde auf das Shuttle-Verhalten der Polysulfide zurückgeführt. Das Ersetzen von Chlorid durch Magnesium erhöhte zwar die Leerlaufspannung auf 2V, verringerte aber sofort die Entladekapazität. Weitere Addi-

Abbildung 8

Lithium-Schwefel-Batterie:

Untersuchung mit operando Neutronenkleinwinkelstreuung in neuen und gealterten Zellen (S. Risse et al., ACS Nano 13, 10233-10241, 2019)

Abbildung 9
**Elektrolytentwicklung
 für Magnesium-
 Schwefel Batterien**
 (Zh. Zhao-Karger, M. Fichtner
 et al., ACS Energy Letters 2018)



tive verbesserten die anfängliche Entladekapazität von 250 mAh/g auf ca. 800 mAh/g. Die aktuelle Verwendung von Chlorid-freien Magnesium-Borat-Salzen verbessert die Zyklenfestigkeit bemerkenswert. Nach 30 Zyklen ist immer noch ca. 400 mAh/g Kapazität bei niedrigen Stromraten vorhanden.

Ein bisher ungelöstes Problem stellt die Zersetzung von Elektrolyt und Magnesium-Anode durch die Polysulfide dar.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde einen Überblick über die aktuellen F&E-Aktivitäten in der Batterieentwicklung gegeben. Wie in der Einleitung geschildert, wird die Nachfrage nach Batterien in den kommenden Jahren drastisch zunehmen. Gleichzeitig werden sich bald die Mängel der zurzeit auf dem Markt vorhandenen Technologien, wie Ausschöpfung von Leistungspotenzialen und begrenzte Rohstoffvorkommen, bemerkbar machen.

Der erste Schritt wird von der Advanced-Lithium-Ionen-Batterie mit erhöhter Energiedichte erwartet, gefolgt von den alternativen kobaltfreien Post-Lithium-Ionen- und Post-Lithium-Technologien, bei welchen auch die Lithium-Rohstoffprobleme gelöst sein werden. Die dafür notwendigen Forschungsanstrengungen schließen Zellmaterial-, Zellkomponenten- und Zelldesignentwicklung, sowie Anpassung der Produktionstechnologie ein. Trotz einer Vielzahl von bisher ungelösten Herausforderungen ist immer noch eine große Palette an alternativen Technologien mit vielversprechenden Leistungsparametern im Rennen und es werden wesentliche Durchbrüche erwartet.

Breitbandnetzausbau & Wärmewende: Synergien für die geothermische Exploration urbaner Räume

Klimaschutzlücke

Das global noch verfügbare CO₂-Restbudget zur Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C ermöglicht bei gleichbleibendem Verbrauch entsprechende Emissionen für weniger als eine weitere Dekade (IPCC, 2019). Die skizzierte Klimaschutzlücke ist evident und der Bedarf für ein klimaneutrales Energiesystem impliziert maximalen Handlungsdruck. Betrachtet man sektorenübergreifend die verbrauchte Endenergie für das Jahr 2018, entfällt die Hälfte hierbei auf die Bereitstellung von Wärme oder Kälte (BMWi/AGEB-Stat, 07/2018).

Wärmemarkt

Für eine nachhaltige und sichere Wärmeversorgung ohne klimaschädliches Kohlendioxid liegt unsere vielleicht wichtigste Zukunftsoption in den großen heimischen Potenzialen der Geothermie. Deren Anteil an regenerativ erzeugter Wärme ist allerdings immer noch gering und liegt im Promillebereich des ausschöpfbaren Potenzials.

Die Ballungszentren in Deutschland sind noch weit von klimaverträglichen Heizformen entfernt. Berlin beispielsweise erzeugt aktuell weiterhin mehr als 99% der Wärme fossil und nicht regenerativ.

Die Kälteversorgung findet überwiegend aus Strom statt, hängt beim derzeitigen Strommix also immer noch in wesentlichen Teilen an Kernenergie oder Braunkohleverstromung.

Das Ziel einer Dekarbonisierung des Wärmemarktes kann hierbei nur über die Umstellung auf erneuerbare Energieträger und damit einhergehenden CO₂-Reduktionen erreicht werden. Die Umstellung von Kohle auf solar-, bio- oder geothermische Wärme könnten Reduktionen auf weit unter 10% ermöglichen (DENA, 2018). Dies setzt voraus, dass die Wärmequellen innerstädtisch zur Verfügung stehen und nach Möglichkeit ohne verlustreiche lange Strecken innerstädtisch verteilt werden können.

Geothermische Wärmebereitstellung

Die geothermische Wärmebereitstellung ist 24/7 grundlastfähig und weist damit im Vergleich zu Wind, Solar und anderen regenerativen Wärmequellen entscheidende Vorteile auf.

Mit Wärme aus oberflächennahen Quellen werden bundesweit derzeit schon mehrere Gigawatt bereitgestellt. Obwohl tiefe geothermische Systeme im Vergleich zu oberflächennahen Anlagen um eine Größenordnung bessere Leistungszahlen relativ zur erzeugten thermischen Leistung aufweisen, ist die tiefe Geothermie noch weit von der 1-Gigawatt-Schwelle entfernt.

Die geothermische Speicherung von Wärme kann darüber hinaus beispielsweise als Stromsenke funktionieren und überschüssige Wärme für den winterlichen Bedarf zwischenspeichern.

Beispiele für geothermische Förder- oder Speicheranwendungen sind im urbanen Raum vorhanden – etwa der Energiespeicher des Deutschen Reichstages in Berlin mit einem saisonal wechselnden Speicherbetrieb von Wärme und Kälte in maximal 315 m Tiefe. Eine flächendeckende Wärmeversorgung aus geothermischer Energie scheidet bisher jedoch aus mehreren Gründen. Der Sanierungsstau in den Fernwärmenetzen (Hoch- zu Niedertemperatur-Netze), Folge hoher Investitionskosten und langer Amortisierungszeiten, bietet wenig Anreiz zur Entwicklung einer auf solche Netze angewiesenen hydrothermalen Versorgungs- oder Aquifer-Wärmespeichertechnologie. Vor allem jedoch führt der flächendeckend dürftige Erkundungsstand von Reservoir-Strukturen und petrophysikalischen Eigenschaften des Untergrundes zu einem Fündigkeits- und somit bedeutendem Investitionsrisiko, welches die kommerzielle Entwicklung hemmt.

Unsicherheiten in der Untergrunderkundung

Die innerstädtische Erkundung des Untergrundes erfordert Mess-Technologien, die wegen der vorhandenen Bebauung auf geringem Platz realisiert werden müssen und trotzdem ein möglichst genaues



GFZ

Dr. Sven Fuchs
sven.fuchs@gfz-potsdam.de

Dr. Thomas Reinsch
thomas.reinsch@gfz-potsdam.de

Prof. Dr. Ernst Huenges
ernst.huenges@gfz-potsdam.de

Dr. Philippe Jousset
philippe.jousset@gfz-potsdam.de

Prof. Dr. Charlotte Krawczyk
charlotte.krawczyk@gfz-potsdam.de

KIT
Prof. Dr. Thomas Kohl
thomas.kohl@kit.edu

Prof. Dr. Eva Schill
eva.schill@kit.edu

Abbildung 1
**Seismische
 Messkampagne**
 entlang von
 faseroptischen Tele-
 kommunikationskabeln
 (schematischer Aufbau)
 [Abb.: B. Schöbel, GFZ]

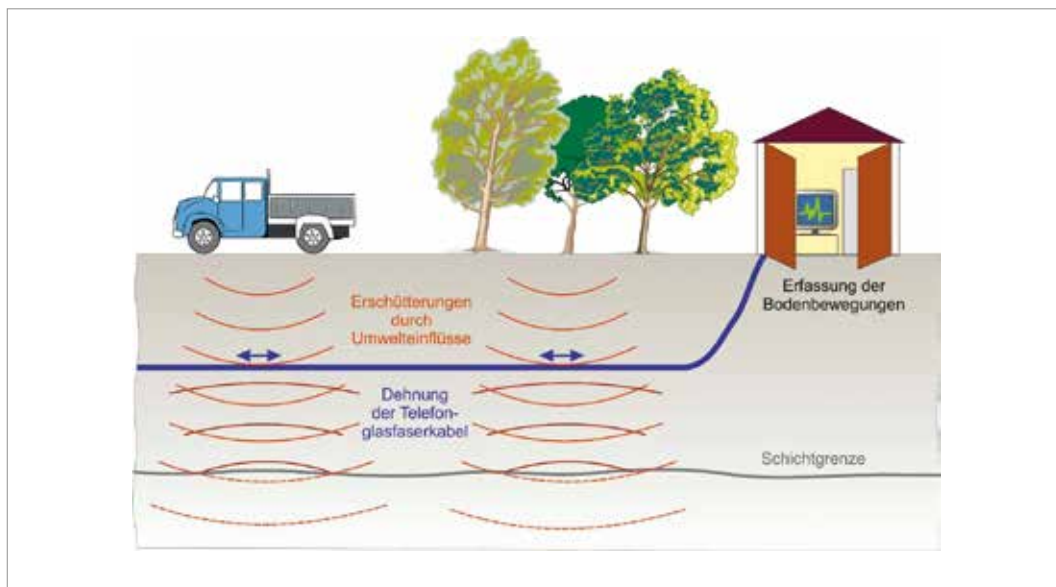


Bild des Untergrundes aufzeichnen sollen. Solche Messverfahren müssen möglichst unempfindlich gegenüber dem vielschichtigen Rauschen der Großstadt sein. Trotz methodischer Fortschritte sind elektromagnetische Sondierungsverfahren hierfür bisher nur eingeschränkt nutzbar. Seismische Erkundungsmethoden hingegen sind verhältnismäßig gut geeignet, allerdings häufig nur mit großem Aufwand realisierbar.

Infolge der vielfältigen Einschränkungen von geologisch-geophysikalischen Erkundungen des tiefen städtischen Untergrundes sind die verfügbaren Daten in der Regel spärlich oder fehlen sogar gänzlich. Auf Grund der fehlenden planungssicheren Übertragbarkeit der ortsspezifischen Kenntnisse über die Beschaffenheit von Nutzungsreservoirien muss die Erkundung für jeden Standort individuell durchgeführt werden. Die Lösung dieses Zielkonflikts zwischen flächigem Erkundungsbedarf in der Stadt und Platzangebot/ Prozessakzeptanz ist evident zur Etablierung von geothermischen Wärmeversorgungs-systemen im urbanen Raum.

Erprobte und neue Erkundungstechnologien

Um die Unsicherheiten in Tiefenlage, Struktur und Eigenschaften potenzieller geothermischer Reservoirien zu reduzieren und entsprechende geothermische Technologien planungssicher einzusetzen, sind neue Erkundungstechnologien notwendig. Ähnlich einer medizinischen Ultraschalluntersuchung zur Bildgebung einzelner Strukturen im Körperinneren, können seismische Beobachtungen helfen, den Untergrund zu charakterisieren und einzelne Prozesse

abzubilden. Um eine hoch aufgelöste Beobachtung seismischer Wellen zu ermöglichen, wird die Auslage eines dichten Netzwerkes an Sensoren benötigt. Für die flächige Auflösung von Untergrundstrukturen in Tiefen bis zu einigen Kilometern werden dabei einige Tausend benötigt. Die Auslage eines dichten Messnetzes in urbanen Räumen ist durch die vorhandene Infrastruktur sowie gesellschaftlicher Vorbehalte stark eingeschränkt. Neben der Auslage von Empfängern werden darüber hinaus auch seismische Quellen an der Oberfläche benötigt. Dies sind in der Regel schwere LKW-basierte Vibratoren, die im Messnetz an vorgegebenen Punkten ein Signal in den Untergrund bringen, welches von den vorhandenen Strukturen reflektiert und gestreut wird. Diese seismischen Signale ermöglichen Rückschlüsse auf die geologischen Formationen wie z. B. auf Erdwärmevorkommen.

Seismische Signale, bzw. Schwingungen des Untergrundes, werden auch durch natürliche oder anthropogene Einflüsse erzeugt. Zum Beispiel erzeugen Wind oder der Straßenverkehr Bewegungen an der Oberfläche, welche sich als elastische Wellen in den Boden fortpflanzen. Jede geologische Schicht und Struktur im Untergrund bedingt eine spezifische Ausbreitung der Wellen, was zu einem charakteristischen Bewegungsbild führt. Die Auswertung solcher passiv erzeugten Bodenbewegungen erfordert in der Regel eine lange Messzeit von mehreren Tagen und Wochen.

Zur Aufzeichnung dieser Bodenbewegungen können neben klassischen seismischen Sensoren auch erdverlegte Glasfaserkabel genutzt werden (► **Abbildung 1**). Seismische Wellen führen in Glasfaserkabeln zu minimalen Dehnungsänderungen (Kompression/Exten-



Traditionelle seismische 2D Erkundung



Breitbandnetzausbau 1&1 versatel



Abbildung 2

Vergleich des Ausbaustands von Messnetzen:

links: Erkundungslinien für 2D-Seismik
rechts: dichtes Breitbandnetz eines Anbieters

(links: <https://nibis.lbeg.de/car-domap3/>; Abruf 09/2019)

(rechts: <https://www.1und1.net/business/kompetenz/glasfaser/>; Abruf 09/2019)

sion), welche mit einem geeigneten faseroptischen Messaufbau mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung aufgezeichnet werden können. Räumliche Auflösungen von unter einem Meter bei einer gesamten Messlänge von mehreren Kilometern sind dabei keine Seltenheit.

Geothermische Exploration und Breitbandnetze

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass auch vorhandene, konventionelle Glasfaser-Telekommunikationskabel für seismische Messungen genutzt werden können (Jousset et al., 2018). Besonders der Ausbau der Breitbandinfrastruktur hat dafür gesorgt, dass verschiedenste Telekommunikationsanbieter ein dichtes Netz an Glasfaserkabeln besonders in urbanen Räumen aufgebaut haben, die über die räumliche Verteilung von vorhandenen seismischen Erkundungslinien weit hinausgehen (► *Abbildung 2*).

Die Nutzung dieser Kabel ermöglicht eine hochauflösende Erfassung von Bodenbewegungen ohne die Notwendigkeit ein dezidiertes Sensornetzwerk aufbauen zu müssen. Dadurch, dass mehrere Tausend einzelne Messpunkte entlang einer Glasfaserstrecke mit Hilfe eines einzigen Messgerätes aufgezeichnet werden können, beschränkt sich der Messaufwand lediglich auf die Installation und Wartung eines einzelnen Messgerätes entlang einer definierten Messstrecke. Im Vergleich zu konventionellen seismischen Messkampagnen können hierbei durch einen reduzierten Einsatz von Personal und Infrastruktur die Kosten für die Datenerfassung signifikant reduziert werden.

Risikominimierung

Die vereinfachte Erfassung seismischer Untergrundinformationen kann die Planungssicherheit für den

Bau und Betrieb einer geothermischen Anlage erhöhen. Für den Fall einer unzureichenden Netzabdeckung kann eine Messung entlang faseroptischer Telekommunikationskabel trotzdem einen ersten Anhaltspunkt für die Tiefenlage sowie die Eigenschaften potenzieller Reservoirgesteine geben. Basierend hierauf können konventionelle Messkampagnen optimiert werden. Neben der Lokalisation von Strukturen im Untergrund ermöglicht das Messverfahren auch eine dauerhafte Überwachung von Untertageinfrastrukturen, sofern diese mit seismischen Verfahren auflösbar sind. Durch die Erhöhung der Informationsdichte und Qualität über die Eigenschaften des geologischen Untergrundes wird die Effizienz und die Sicherheit bei Planung, Bau und Betrieb einer geothermischen Anlage deutlich erhöht und das Investitionsrisiko für den Betreiber deutlich gesenkt.

Referenzen

- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.
- Jousset, P., Reinsch, T., Ryberg, T., Blanck, H., Clarke, A., Aghayev, R., Hersir, G. P., Hennings, J., Weber, M., Krawczyk, C. (2018): Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features. – Nature Communications, 9, 2509
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2018 und Vorjahre, 19. Juni 2019. [Online]. Verfügbar unter: www.ag-energiebilanzen.de. [Zugegriffen: 19. Juni 2019].
- Deutsche Energie-Agentur (2018): dena-Leitstudie: Integrierte Energiewende – Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen. 52S.

Thermische Energiespeicher für Elektrizitätserzeugung und industrielle Anwendungen



ZAE
Dr. Andreas Hauer
andreas.hauer@zae-bayern.de

DLR
Dr. Dan Philipp Bauer
dan.bauer@dlr.de

KIT
Prof. Dr. Thomas Wetzel
thomas.wetzel@kit.edu

Thermische Energiespeicher – Motivation

Energiespeicher erfüllen die Funktion, einen zeitlichen Versatz zwischen Energieangebot und dem tatsächlichen Energiebedarf zu überbrücken. Diese Aufgabe gewinnt in einem Energiesystem, das immer mehr fluktuierende erneuerbare Energiequellen integrieren und gleichzeitig die Energieeffizienz steigern muss, zunehmend an Bedeutung.

In der bisherigen öffentlichen Diskussion werden Energiespeicher oft mit elektrischen Speichern gleichgesetzt. Auch die Energiewende wurde bisher meist verkürzt als „Elektrizitätswende“ verstanden. Betrachtet man jedoch unseren Endenergiebedarf, stellt man fest, dass Wärme und Kälte im Gebäude- und Industriebereich mit ca. 60% den größten Anteil darstellen.

Auch wenn man die CO₂-Emissionen auf die unterschiedlichen Sektoren (Elektrizität, Mobilität und Wärme) verteilt, sieht man, dass der Wärmesektor für über 50% der Emissionen verantwortlich ist, die Sektoren Mobilität und Strom hingegen nur für jeweils 25%. Das spricht deutlich dafür, jetzt verstärkt die „Wärmewende“ in den Fokus zu nehmen. In diesem Zusammenhang werden thermische Energiespeicher zukünftig stark an Relevanz gewinnen.

Thermische Energiespeicher – Technologien

Thermische Energiespeicher können einen weiten Temperaturbereich abdecken:

- Kältespeicher für Temperaturen zwischen -40°C und 6°C
- Wärmespeicher für Heizung und Warmwasser zwischen 30°C und 90°C
- Speicher für Prozesswärme werden in der Regel über 100°C betrieben,
- Hochtemperaturspeicher mit Betriebstemperatur oberhalb von 350°C

Dafür stehen auch verschiedene Methoden der Speicherung von Kälte und Wärme zur Verfügung (mit steigender Speicherkapazität):

- Bei der sensiblen Speicherung thermischer Energie wird ein Speichermaterial erwärmt oder abgekühlt.

- Bei der latenten Speicherung thermischer Energie findet beim Erwärmen oder Abkühlen auch ein Phasenwechsel des Speichermaterials statt.
- Bei der thermochemischen Speicherung thermischer Energie werden chemische Reaktionen oder Sorptionsprozesse genutzt.

Im vorliegenden Artikel liegt der Fokus auf den Hochtemperaturanwendungen. Mit dieser Art thermischer Speicher lässt sich z.B. effizient Elektrizität erzeugen. Gleichzeitig können Hochtemperaturspeicher auch in industriellen Prozessen mit hoher Temperatur eingesetzt werden.

Hochtemperatur-Wärmespeicher – Anwendungsbeispiele

Energiespeicher, die eine bestimmte Energieform aufnehmen, z.B. Strom oder Wärme, geben in der Regel auch diese wieder ab. Allerdings ist es auch möglich, dass ein Hochtemperatur-Wärmespeicher seine Wärme an eine Turbine abgibt und damit Elektrizität erzeugt. Er stellt also letzten Endes Strom zur Verfügung. Genauso kann ein thermischer Speicher auch Strom aufnehmen, in dem dieser z.B. in einer Wärmepumpe, in Wärme verwandelt wird.

Es gibt also mehrere Pfade von der Energiequelle zum Verbraucher, auf denen thermische Energiespeicher (TES) eine Rolle spielen:

Quelle		Speicher		Nutzer
Wärme	→	TES	→	Wärme
Wärme	→	TES	→	Strom
Strom	→	TES	→	Wärme
Strom	→	TES	→	Strom

- Der klassische Wärmespeicher nimmt z.B. Abwärme auf und stellt zu einem späteren Zeitpunkt Prozesswärme bereit.
- Es gibt auch die Möglichkeit, Wärme aufzunehmen und später damit Strom zu erzeugen, wie es z.B. in solarthermischen Kraftwerken geschieht, wenn nachts Strom produziert wird.
- Unter dem Schlagwort der „Sektorkopplung“ oder

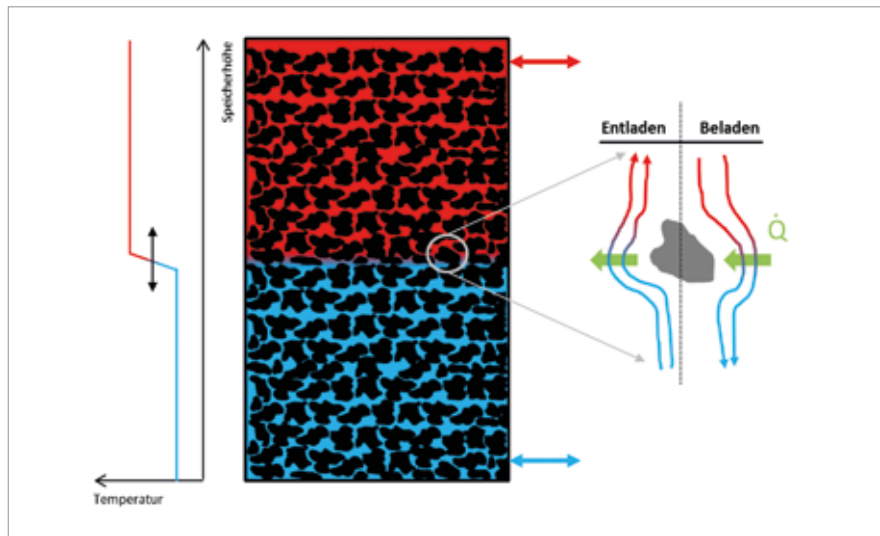


Abbildung 1

Zwei-Stoff-Speicher
in der Gießerei
Heunisch
(schematische
Darstellung)
[ZAE Bayern]

„Power-to-Heat“ kann auch aktuell nicht nutzbarer Strom in thermischen Speichern auf seine Nutzung als Wärme warten.

- Und zu guter Letzt kann man Strom in Wärme umwandeln, speichern und bei Bedarf wieder in Strom zurückwandeln.

Wärmerückgewinnung durch Zwei-Stoff-Wärmespeicher

Die Gießerei Heunisch in Bad Windsheim betreibt sogenannte Kupolöfen, in denen Metalle für den Eisenguss geschmolzen werden. Das ZAE Bayern baut dort einen thermischen Speicher zur Nutzung der Abwärme des Ofens auf. Die Abwärme soll in der Zeit, in der der Ofen nicht betrieben wird (10 Stunden pro Tag), Wärme bereitstellen, die für Trocknungsprozesse benötigt wird, bzw. über eine Absorptionskältemaschine Kälte produzieren.

Das Speichermedium ist eine Gesteinsschüttung, die von Thermalöl umspült wird. Das Thermalöl dient als Wärmeträgerfluid, um die Wärme in und aus dem Speicher zu transportieren.

Die Abwärme steht bei knapp über 200 °C zur Verfügung. In der geplanten Anlage sollen ca. 12 MWh Wärme gespeichert werden. Die Anlage besteht aus drei zylindrischen Modulen mit jeweils 12 m Höhe und einem Durchmesser von fast 3 m. Darin befinden sich 75 t Gestein. Die Anlage wird Anfang 2020 aufgebaut und in Betrieb genommen.

Eintank-Flüssigsalz-Wärmespeicher

Ein sehr ähnlicher Ansatz, allerdings für deutlich höhere Temperaturen, wird vom DLR verfolgt. Der weltweit größte thermische Speicher der Thermocline-Flüssigsalz-Technologie hat eine Speicherkapazität

von 4 MWh und wird bei 290/560 °C betrieben. Diese Technologie basiert auch auf zwei Speichermedien: Flüssigem Salz und Gestein. Auch hier dient die flüssige Komponente dem Wärmetransport. Das Gestein dient der Kostenreduktion, indem es das teurere Flüssigsalz zu einem großen Teil ersetzt. In neun thermischen Zyklen mit Temperaturwechselschicht unter typischen Betriebsrandbedingungen konnte ein stabiler Betrieb erfolgreich demonstriert werden.

Hochtemperatur-Flüssigmetall- Festbettwärmespeicher

Am KIT wurde ebenfalls ein Thermocline-Speicher untersucht. Allerdings wurde hier flüssiges Metall eingesetzt. Mit der Versuchsanlage THEADES am Karlsruher Flüssigmetalllabor KALLA wird zur experi-

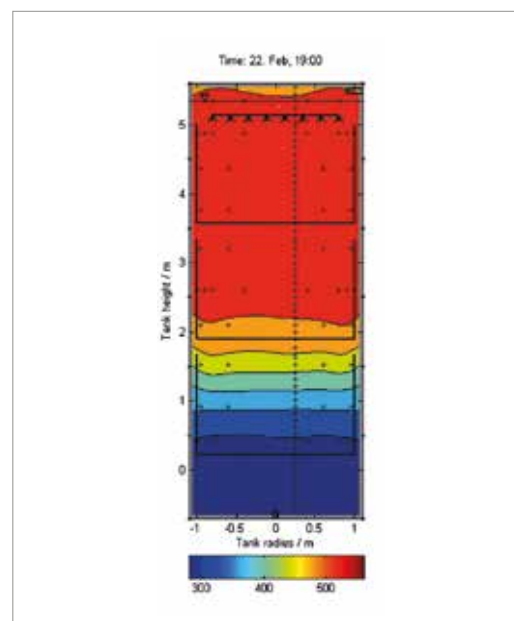
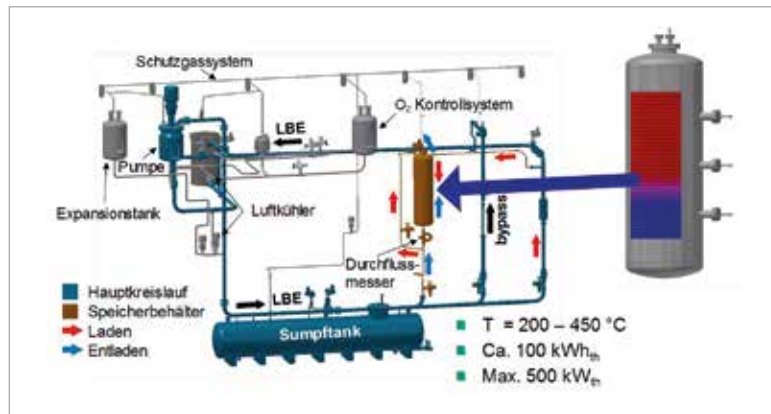


Abbildung 2

**Eintank-
Flüssigsalzspeicher**
mit stabiler
Temperaturschichtung
[DLR]

Abbildung 3
Hochtemperatur-Flüssigmetall-Festbett-Wärmespeicher
 in der Versuchsanlage THEADES
 [KIT]



mentellen Validierung eine Kreislaufanlage mit eutektischer Blei-Wismut-Legierung bei Temperaturen zwischen 200°C und 450°C betrieben. Hier wird ein Speicher mit einer Kapazität von 100kWh und einer thermischen Leistungen von 500kW integriert.

Geplant ist, weiter mit Flüssigmetall zu arbeiten und dabei Temperaturen > 650 °C zu erreichen. Als mögliche Anwendungen können solarthermische Kraftwerke oder industrielle Hochtemperaturprozesse in Frage kommen.

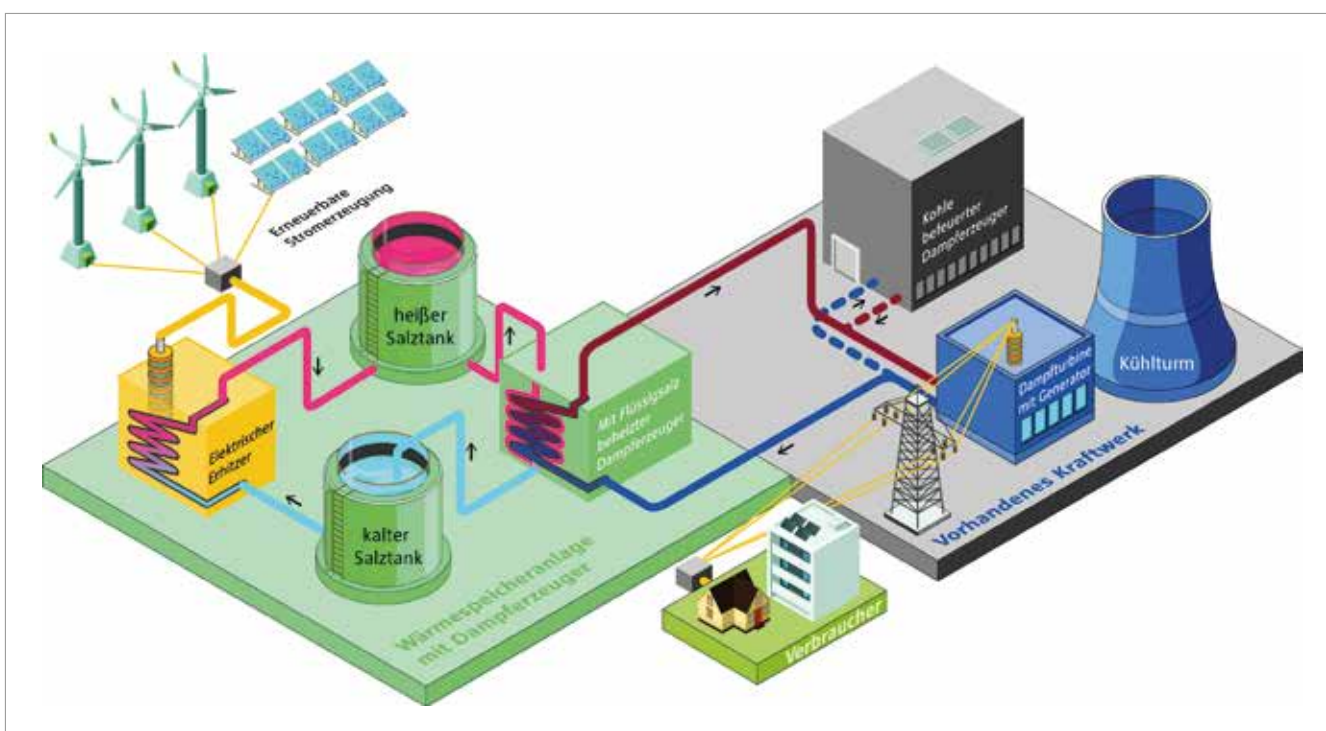
Flüssige Metalle sind bis weit über 600°C stabil und haben eine hohe Wärmeleitfähigkeit, was zu hoher Prozesseffizienz und kleinen Wärmeübertragern führen kann. Gleichzeitig beeinträchtigt diese allerdings auch, wie in den vorherigen Beispielen, die Temperaturschichtung, weswegen auch hier ein Festbett mit niedriger Wärmeleitfähigkeit eingesetzt wird (Thermocline-Prinzip).

Wärmespeicherkraftwerk – StoreToPower

Dieses Projekt des DLR soll ein Wärmespeichermodul auf Basis von Flüssigsalz oder Feststoff in einem großen Braunkohlekraftwerksblock zur Erzeugung von Frischdampf integrieren. Zunächst soll der Nachweis der technischen Machbarkeit des Anlagenkonzepts und Demonstration des Zusammenspiels mit einem Bestandskraftwerk und der Eignung des untersuchten Konzepts unter realen kommerziellen Einsatzbedingungen erbracht werden. Darüber hinaus sollen die Wirtschaftlichkeit abgeschätzt und regulatorischen Hürden identifiziert werden.

Schrittweise soll ein bestehendes Kraftwerk mit Braunkohle als Brennstoff zu einer Pilotanlage zum Nachweis der Machbarkeit von Wärmespeicherkraftwerken umgebaut werden.

Abbildung 4
Wärmespeicherkraftwerk StoreToPower
 (schematische Darstellung)
 [RWE]



Im Nachkohlzeitalter könnte dann das Kraftwerk in kommerzieller Größe im reinen Speicherbetrieb mit Nutzung von erneuerbaren Energien betrieben werden.

Forschungsinfrastruktur NADINE

Zur weiteren Untersuchung von Wärmespeichern soll eine Forschungsinfrastruktur (NADINE) in Stuttgart und Karlsruhe aufgebaut werden. Der permanente experimentelle Aufbau wird von KIT, DLR und Uni Stuttgart gemeinsam geplant und soll auch für andere Institute und die Industrie nutzbar sein. Untersuchungen können vom Material über Komponenten bis zu Systemen im MW- und MWh-Maßstab durchgeführt werden.

Für die unterschiedlichen Temperaturbereiche sind verschiedene Institute verantwortlich.



Zusammenfassung

Energiespeicher im Allgemeinen und thermische Energiespeicher im Besonderen werden eine wichtige Rolle im Energiesystem der Zukunft spielen. Speicherung ist unabdingbar für die erfolgreiche Integration erneuerbarer Energie sowie für die notwendige Steigerung der Energieeffizienz.

Zahlreiche Hochtemperatur-Speichertechnologien stehen für viele verschiedene Anwendungen zur Elektrizitätserzeugung und im industriellen Bereich zur Verfügung. Dabei ist es entscheidend, für jede Anwendung die passende Speichertechnologie zu identifizieren.

Viele Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten laufen derzeit auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Wärmespeicherung. In nächster Zeit ist mit zukunftsweisenden Pilot- und Demonstrationsanlagen zu rechnen.

Chemische Energiespeicher als Wegbereiter zur Treibhausgasneutralität – Herausforderungen und Chancen



FZ Jülich
Dr. Heidi U. Heinrichs
h.heinrichs@fz-juelich.de

Prof. Dr. Ralf Peters
ra.peters@fz-juelich.de

Dr. Martin Robinius
m.robinius@fz-juelich.de

Prof. Dr. Detlef Stolten
d.stolten@fz-juelich.de

Dr. Petra Zapp
p.zapp@fz-juelich.de

DBFZ
Jörg Kretzschmar
joerg.kretzschmar@dbfz.de

HZB
Dr. Sonya Calnan
sonya.calnan@helmholtz-berlin.de

Prof. Dr. Roel van de Krol
roel.vandekrol@helmholtz-berlin.de

Fraunhofer IEE
Dr. Ramona Schróer
ramona.schroer@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE
Dr. Achim Schaadt
achim.schaadt@ise.fraunhofer.de

IZES
Dr. Bodo Groß
gross@izes.de

KIT
Dr. Siegfried Bajohr
siegfried.bajohr@kit.edu

Prof. Dr. Roland Dittmeyer
roland.dittmeyer@kit.edu

Prof. Dr. Thomas Kolb
thomas.kolb@kit.edu

1. Herausforderung Treibhausgasneutralität

Ein wesentliches Ziel der deutschen Energiewende ist die Reduktion der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland um 80 bis 95 % bis 2050 gegenüber 1990 [1]. Daneben erfordert die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C ohne oder mit begrenztem Überschreiten laut IPCC [2] einen sofortigen Beginn der Reduktion von CO₂-Emissionen, das Erreichen von globalen Netto-Null-CO₂-Emissionen bis ca. 2050 und parallel die drastische Reduktion der anderen Treibhausgasemissionen ebenfalls bis ca. 2050.

Eine Betrachtung der heutigen Treibhausgasemissionen ergibt die in ► **Abbildung 1** gezeigte sektorale Aufteilung. Um die zuvor genannten Reduktionsziele zu erreichen, müssen in allen Sektoren Emissionsreduktionen erfolgen [3]. Diese Anforderung verdeutlicht die bedeutende Rolle der Sektorenkopplung auf dem Weg hin zu einer Treibhausgasneutralität, da durch sie nahezu alle Sektoren für Treibhausgasreduktionen erschlossen werden [4]. Weiterhin ist ersichtlich, dass die Reduktion von heute bis 2050 ca. 1,5- bis 2-mal schneller erfolgen muss im Vergleich zur Reduktion zwischen 1990 und 2018.

Um die Herausforderung hin zur Treibhausgasneutralität anzugehen, stehen verschiedene sich gegenseitig unterstützende Optionen zur Verfügung. Diese sind vor allem die nahezu treibhausgasneutrale Energiebereitstellung¹, worunter erneuerbare Energien wie auch Formen der Kernenergie fallen und die Reduktion der Energienachfrage. Wobei Letzteres ohne z.B. erneuerbare Energien nur zur Minderung von Treibhausgasemissionen beitragen kann, aber nicht zur Erreichung einer Treibhausgasneutralität ausreicht. Vor dem Hintergrund der deutschen Energiewende und dem Thema dieses Beitrags wird hier auf erneuerbare Energien und ihr Wechselspiel mit chemischen Energiespeichern fokussiert. Um mittels erneuerbarer Energien eine annähernde oder vollständige Treibhausgasneutralität zu erreichen, wird ein massiver Ausbau oder Import erneuerbarer Energien erforderlich. Die volatilen erneuerbaren Energien wie Wind- und Solarenergie erfordern dabei zur Erhaltung einer

hohen Versorgungssicherheit Energiespeicher über verschiedene Zeitspannen. Für diese verschiedenen Versorgungsaufgaben über unterschiedliche Zeitspannen hinweg stehen prinzipiell eine Reihe von Energiespeichern zur Verfügung (► **Abbildung 2**). Darunter eignen sich chemische Energiespeicher wie z.B. Wasserstoff oder Methan vor allem zur Überbrückung von saisonalen Schwankungen volatiler erneuerbarer Energien.

► **Abbildung 3** zeigt unten das Power-to-X-Konzept: Hier wird (meist erneuerbarer) Strom in eine andere Energieform wie z.B. Wärme oder chemische Energieträger umgewandelt. Der obere Teil von ► **Abbildung 3** beleuchtet dabei genauer den Teilaspekt Power-to-Fuel.

Die chemischen Energiespeicher (H₂: Wasserstoff, LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carrier, CH₄: Methan, CH₃OH: Methanol) sind ein wesentlicher Teil des Power-to-X Konzeptes, da sie verschiedene Energienachfragen in den Endenergiesektoren bedienen können. So können über sie Kraftstoffe für den Verkehrssektor sowie Endenergien und Chemikalien in den Sektoren Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Industrie bereitgestellt werden.

Der Transport der unterschiedlichen chemischen Energieträger kann dabei entweder auf bestehende Infrastrukturen zurückgreifen (z.B. Einspeisung von „grünem“ Methan in das Erdgasnetz) oder erfordert eine Veränderung oder Neubau der entsprechenden Transportoptionen (z.B. Transport via Lkw, Umbau des Erdgasnetzes auf Methan-Wasserstoff-Mischungen oder reinen Wasserstoff).

Wie im Bereich „Primärenergie“ der ► **Abbildung 3** gezeigt, können chemische Energiespeicher sowohl mittels konventioneller Kraftwerke als auch über erneuerbare Energien hergestellt werden. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf den erneuerbaren Energien. [4]

2. Forschungsergebnisse und Beiträge aus der Forschung

Um das Potenzial chemischer Energiespeicher als Wegbereiter zur Treibhausgasneutralität erschließen zu können, sind noch vielfältige Technologieentwicklungen und Systemanalysen notwendig.

1. Hierbei müssen in tiefergehenden Analysen auch die Treibhausgasemissionen der Anlagenherstellung und -entsorgung mitbetrachtet werden.

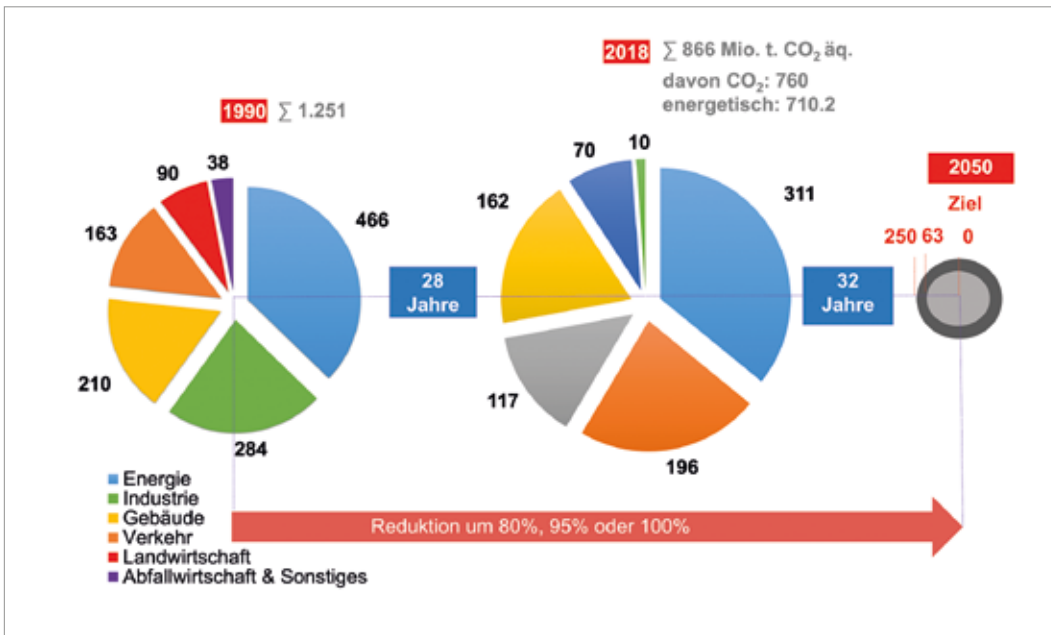


Abbildung 1
Sektorale Treibhausgasemissionen in Deutschland in 1990, 2018 und 2050 [3]

Aus beiden Forschungsbereichen werden im Folgenden Beispiele aufgezeigt.

2.1 Modulare Fischer-Tropsch Reaktortechnologie

Am Karlsruher Institut für Mikroverfahrenstechnik (KIT-IMVT) werden gemeinsam mit dem eigenen Spin-Off INERATEC GmbH² modulare Reaktortechnologien für die Fischer-Tropsch (FT)-Synthese vom Labor bis zum Maßstab 1500L/Tag (1 MW) entwickelt (► *Abbildung 4*).

² INERATEC hat inzwischen 30 fest angestellte Mitarbeiter*innen und zahlreiche Preise gewonnen, u.a. den deutschen Gründerpreis in der Kategorie Start-Up.

Parallel werden auch Reaktortechnologien für andere exotherme Kraftstoffsynthesen wie z.B. von Methanol, Dimethylether (DME) und auch für die Methanisierung entwickelt. In zahlreichen Projekten (BMBF, BMWi, Land BaWü, Helmholtz) wird dazu gemeinsam mit Partnern (u.a. Climeworks und Sunfire) auch an der stofflichen und thermischen Integration der Einzeltechnologien in die jeweiligen Power-to-Liquid (PtL)-Prozessketten gearbeitet, immer mit dem Ziel die stoffliche und energetische Effizienz zu maximieren und die Kosten zu verringern. Dezentrale Anwendungen, bei denen ein dynamischer Betrieb vorteilhaft oder evtl. sogar zwingend erforderlich ist, stehen dabei aktuell im Mittelpunkt. Neben der hier gezeigten Anlage, die im Rahmen des Energy Lab 2.0 am KIT aufgebaut wurde, ist ergänzend die weltweit erste integrierte PtL-Anlage zu nennen, die CO₂ aus der

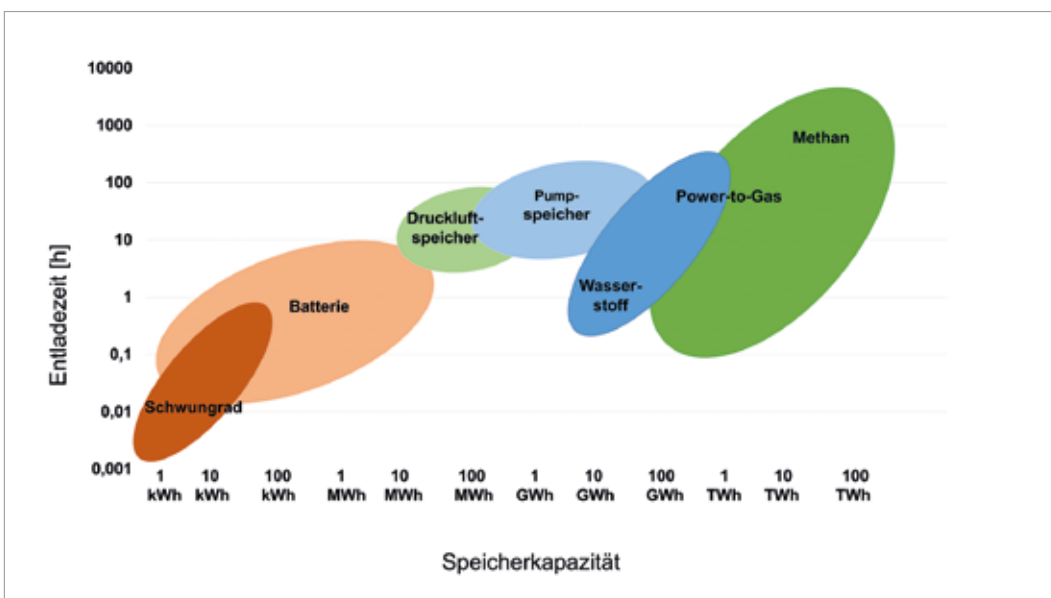
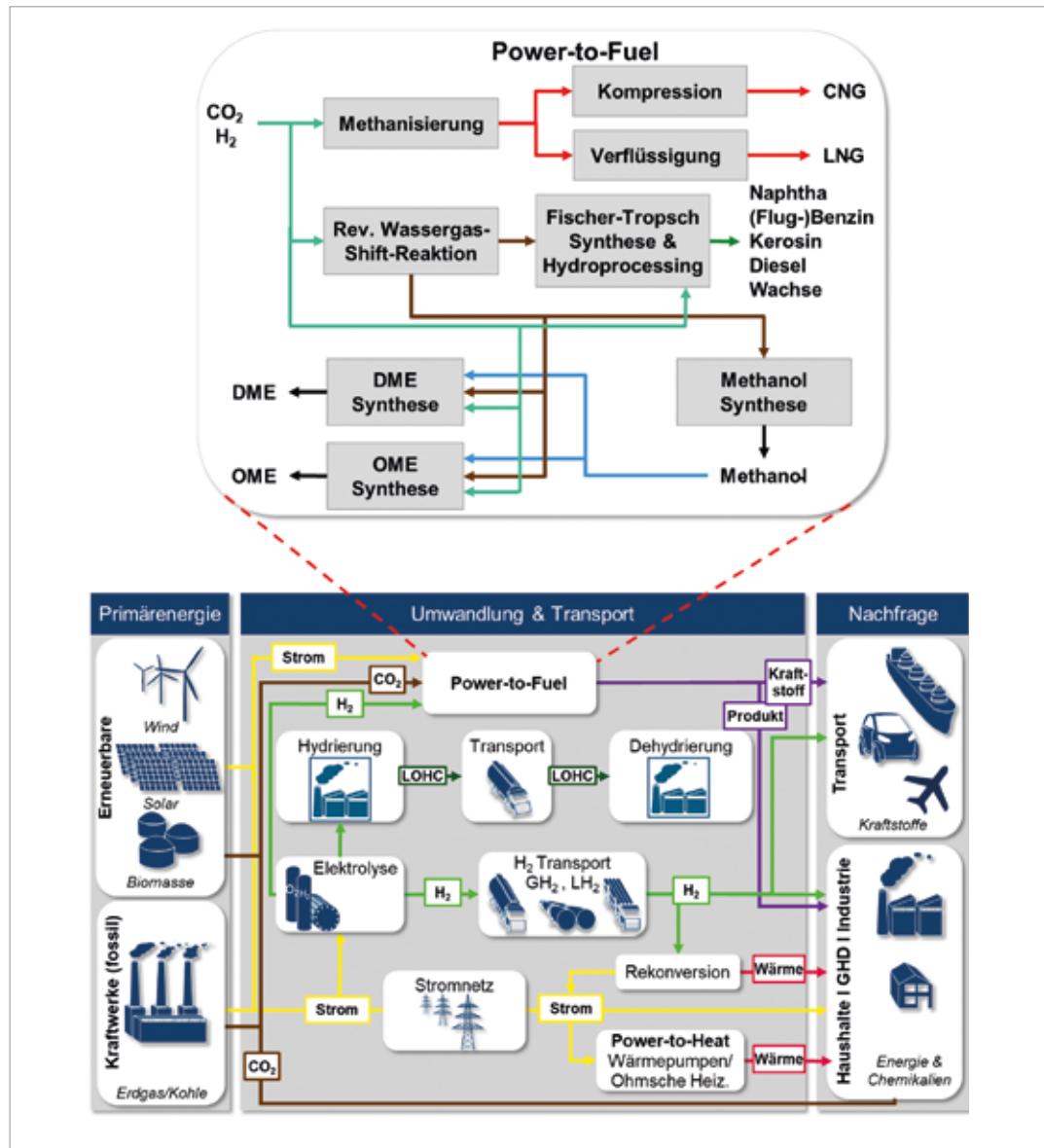


Abbildung 2
Überblick über Energiespeicher als Funktion ihrer Entladezeit und Speicherkapazität [5]

Abbildung 3
Chemische Energiespeicher
 als Teil des
 Power-to-X Konzeptes
 im Energiesystem
 sowie im
 Power-to-Fuel Konzept
 [4]



Luft in FT-Kraftstoffe umwandelt und die im Kopernikus-Projekt P2X entwickelt wird. [6-8]

2.2 Dreiphasen-Reaktorkonzepte für lastflexible Methanisierung

Bei der Synthese chemischer Energieträger als Speichermedium für volatile elektrische Energie ist vor allem die begrenzte Dynamikfähigkeit der „state of the art“ katalytischen Syntheseprozesse eine der großen Herausforderungen. Etablierte Syntheseprozesse werden im Normalbetrieb üblicherweise keinen oder nur sehr langsamen Lastwechseln unterzogen, da die mit schnellen Änderungen verbundenen Temperaturspitzen auf Grund der Exothermie der Methanisierung zu thermischen Problemen bis hin zu instabilen Betriebszuständen führen können [9–11]. Weiterhin können diese Effekte zur beschleunigten Katalysator-

desaktivierung und zu schwankenden Produktzusammensetzungen führen, die das Einhalten der geltenden Einspeiserichtlinien erschweren [12, 13].

Um Lösungen für die speziellen Herausforderungen des dynamischen Betriebs katalytischer Reaktoren – speziell für die Methanisierung und die Methanolsynthese – zu finden, werden am KIT-EBI ceb seit einigen Jahren Dreiphasen-Reaktorkonzepte entwickelt und theoretisch und experimentell untersucht [11–14]. Für die Anwendung als hochdynamisch betreibbarer Methanisierungsreaktor sind speziell Blasensäulenreaktoren geeignet, in welchen die festen Katalysatorpartikel in einer geeigneten Flüssigphase suspendiert und durch die Eduktgase indirekt fluidisiert werden. Die in situ am Katalysator vorliegende Flüssigphase ermöglicht effiziente Wärmeabfuhr und Temperaturkontrolle im Reaktor, da aus dem dreiphasigen System eine deutlich verbesserte Wärmeabfuhr unter statio-

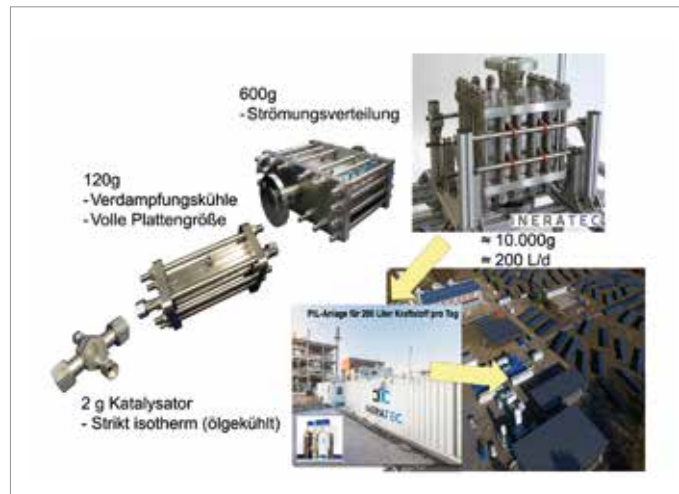


Abbildung 4

**Modulare
Fischer-Tropsch
Reaktortechnologie [6]**

nären und dynamischen Bedingungen erfolgen kann, als dies bei herkömmlichen Festbett-Reaktorkonzepten der Fall ist.

Der Reaktor selbst ist sehr einfach aufgebaut und damit kostengünstig in Fertigung, Betrieb und Wartung. Die Auslegung und speziell das Scale-up von Dreiphasen-Reaktoren sind jedoch sehr aufwändig und erfordern ein hohes Maß an Knowhow und Zugriff auf geeignete Stoffdaten und zuverlässige experimentelle Daten speziell zur Hydrodynamik und zur Reaktionskinetik.

Aktuelle Forschungsprojekte und Grundlagenuntersuchungen am EBI ceb setzen die Arbeit der vergangenen Jahre fort und finden in der in ► **Abbildung 5** gezeigten Pilotanlage zur Dreiphasen-Methanisierung am KIT Energy Lab 2.0 ihren bisherigen Höhepunkt. Es handelt sich dabei um die weltweit erste Anlage ihrer Art und speziell durch den Schritt vom kleinskaligen Laborreaktor hin zum technisch relevanten Pilotmaßstab und die damit einhergehende Vermeidung von Wandeffekten auf Hydrodynamik und Stofftransport werden experimentelle Ergebnisse von hoher wissenschaftlicher Relevanz erzielt.

Nach ihrer Fertigstellung und Inbetriebnahme im Sommer 2019 konnte die Anlage in einer ersten mehrtägigen Messkampagne im Oktober den Nach-

weis der Dynamikfähigkeit liefern. Über einen Zeitraum von mehr als 100 Stunden wurde Methan aus Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff zuverlässig und mit hoher Ausbeute erzeugt. Die Anlage zeichnete sich dabei durch ihre hohe Robustheit bezüglich schneller Lastwechsel aus und lässt auf interessante Ergebnisse in den nächsten Versuchskampagnen hoffen.

Die Forschungsarbeiten zur Dreiphasen-Methanisierung am Energy Lab 2.0 sind vor allem in die laufenden Projekte „MethQuest (BMW)“, „Energiesystemintegration & Sektorkopplung (BMBF)“ und „RegEnZell (BMW)“ eingebunden und werden durch begleitende Grundlagenuntersuchungen und Studien am EBI ceb und bei der DVGW-Forschungsstelle am EBI ergänzt. [15]

2.3 Kostenvergleich H₂-basierter Kraftstoffe

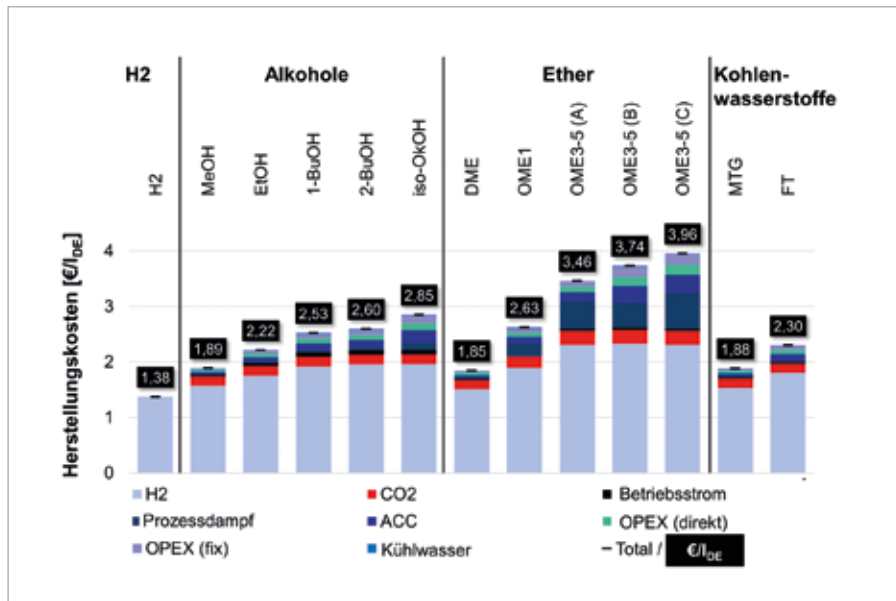
Bei einem Kostenvergleich verschiedener wasserstoff-basierter Kraftstoffe (Wasserstoff, Alkohole, Ether und Kohlenwasserstoffe) wurde eine hohe Spannweite in den Kosten von 1,85 bis 3,96 Euro pro Liter auf Basis von ASPEN-Prozesssimulationen ermittelt (► **Abbildung 6**).



Abbildung 5

**Dreiphasen-
Methanisierungsanlage
des EBI ceb am
KIT Energy Lab 2.0 [15]**

Abbildung 6
**Kostenvergleich
H₂-basierter Kraftstoffe**
[16]



Von den einzelnen Kostenbestandteilen ist der Anteil dominierend, der auf die Wasserstoffproduktion entfällt. Ab einem Preis von ca. 2 Euro pro kg Wasserstoff könnten Kraftstoffkosten von ca. 1 Euro/L erreicht werden, was als kostenkompetitiv zu herkömmlichen Kraftstoffen angesehen werden könnte. Bei diesem Vergleich ist aber insbesondere zu beachten, dass diese Kosten die Herstellkosten der unterschiedlichen Kraftstoffe beschreiben, nicht aber die kilometerspezifischen Kosten. Würden die stark unterschiedliche Effizienz von Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen mitberücksichtigt, würde sich der Vergleich stark zugunsten des Wasserstoffs bzw. der Brennstoffzellenfahrzeuge verschieben. [16]

2.4 Zur Rolle von Biogasaufbereitungsanlagen

Aktuell existieren ungefähr 200 Biogasanlagen mit Biogasaufbereitung in Deutschland (~9,8 TWh_{H₂} in 2018) [17] und es gibt eine Stagnation bei einem weiteren Ausbau aufgrund geringer Vergütungssätze [18] bzw. von Gebotsobergrenzen [19].

Biomethan kann aufgrund seiner einfachen Speicher- und Transportfähigkeit (Gasnetz) einen entscheidenden Beitrag zum Ausgleich fluktuierender erneuerbarer Stromerzeuger leisten. Es besteht hier auch ein gewisses Ausbaupotenzial im Anlagenbestand insofern ca. 300–600 bestehende Biogasanlagen auf Biomethanerzeugung umgestellt werden könnten [18]. Diese Zahl beinhaltet bereits eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (im Vergleich zu bestehenden Biomethananlagen) und die Berücksichtigung von Restriktionen bezüglich des Gasnetz Zugangs, da nicht überall wo Biogasanlagen an einer Erdgasleitung stehen, unbegrenzt viel Biomethan ins Netz eingespeist werden kann (► *Abbildung 7*).

Ergänzend wäre Biomethan aus Reststoffen im Sinne der Renewable Energy Directive II [20] ein äußerst interessanter Kraftstoff, da es als „advanced biofuel“ definiert werden könnte. Daraus ergeben sich Vorteile bei der Vermarktung, da hier mit höheren Erlösen bei den CO₂-Quoten und evtl. mit der Anrechnung des doppelten Energiegehalts gerechnet werden kann. Allerdings steht die nationale Umsetzung noch aus. Hauptproblem bei dieser Betrachtung ist, dass es derzeit keinen Markt für Biomethan bzw. Erdgas im Kraftstoffsektor gibt. Hier müssten politische Signale gesetzt werden.

Eine interessante Möglichkeit der Flexibilisierung von Biogasanlagen im Kontext Biomethan wäre die Auf-

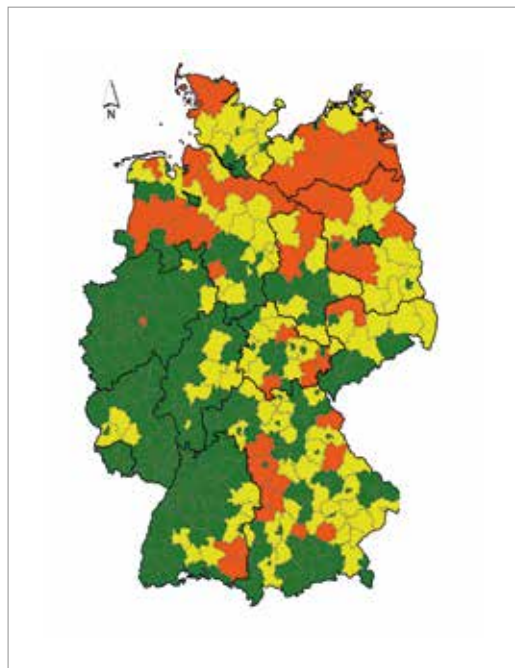
Abbildung 7
**Abgleich der
Biogasproduktion
mit den
Gasnetzkapazitäten
auf Verteilnetzebene**
[21]:

Biogasproduktion 2015
abzgl. Gasnetzkapazitäten
2020 [MWh_{H₂}]

- <0
- > 1-100.000
- 1-100.000

Bereitstellung von Biogas in (MWh_{H₂}) basierend auf der Stromerzeugung für Biogas im Jahr 2015 und einem durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad von 38%.

Berücksichtigt werden nur Daten mit einer Bemessungsleistung ≥400 kW_{el} und einem KWK-Anteil <25%



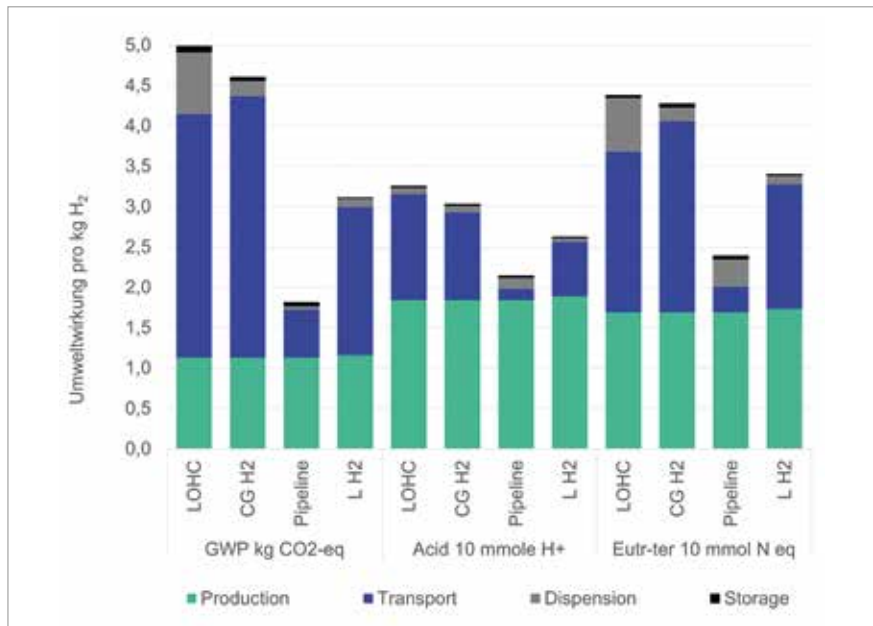


Abbildung 8
Ökologischer Vergleich von H₂-Transportoptionen für Mobilität 2050 [22]

Untersuchte Umweltwirkungen:

- „Global Warming Potential“ (GWP)
- Versauerung (Acid)
- terrestrische Eutrophierung (Eutr.-ter.).

rüstung bestehender Biogasanlagen mit Aufbereitungstechnologie, so dass diese Biogasanlagen in Zeiten niedriger Strompreise Biomethan erzeugen können welches zwischengespeichert und für lokale Fuhrparks (z.B. in der Landwirtschaft oder im ÖPNV) genutzt werden kann. Die regelmäßige Abnahme spielt hier aber eine besondere Rolle, da so die notwendigen Speicherkapazitäten für Biomethan geringgehalten werden können.

2.5 Ökologischer Vergleich von H₂-Transportoptionen für Mobilität 2050

Ein Vergleich ausgewählter ökologischer Implikationen von verschiedenen Wasserstoff-Transportoptionen zur Deckung eines Mobilitätsbedarfs in 2050 ist in ► **Abbildung 8** gezeigt.

Dabei wurde angenommen, dass der Wasserstoff in Elektrolyseuren mit Strom aus Windenergie produziert sowie mit 700 bar an der Tankstelle zur Verfügung gestellt wird. Darüber hinaus werden Salzkaavernen als saisonale Speicher für Wasserstoff genutzt. Der Transport von Wasserstoff über 400km erfolgt entweder per Lkw oder Pipeline.

Der Transport mittels Lkw wurde weiterhin differenziert zwischen LOHC, in Hochdrucktanks (CG H₂) und in Flüssigtanks (L H₂).

Als Umweltwirkungen wurden das „Global Warming Potential“, die Versauerung und die terrestrische Eutrophierung untersucht. Die Untersuchung ergab, dass in allen drei Umweltwirkungen der Pipelinetransport am besten abschneidet. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Wahl der H₂-Transportoption auch maßgeblich von der räumlichen Verteilung der Nachfrage abhängt. [22]

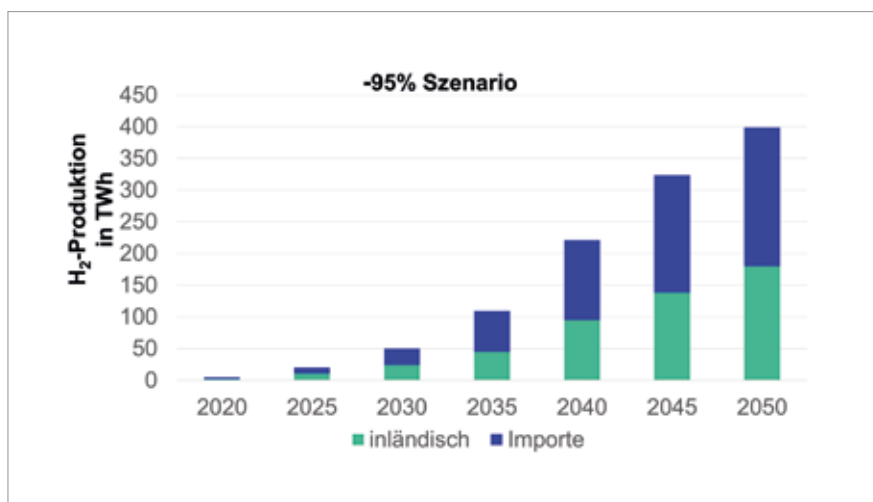


Abbildung 9
Wasserstoffbedarf in Deutschland bei einer Treibhausgasreduktion um -95% bis 2050 [23]

2.6 Szenarien zur Rolle von H₂ im deutschen Energiesystem in 2050

In einer aktuellen Szenarienstudie zu Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem [23] zeigt sich, dass bei einer Reduktion der Treibhausgase bis 2050 um 80% sich eine Wasserstoffnachfrage primär im Verkehrssektor ergibt. Wird hingegen ein Szenario mit einer Treibhausgasreduktion um 95% bis 2050 betrachtet, so wird Wasserstoff von verschiedenen Endenergiesektoren nachgefragt und ein wesentlicher Teil dieses nachgefragten Wasserstoffs wird nicht in Deutschland produziert, sondern importiert (► *Abbildung 9*). Biomethan hingegen spielt eine vergleichsweise geringe Rolle (~40 TWh in 2050) und dies auch nur im „-95%-Szenario“. Im Vergleich dieser Ergebnisse mit internationalen Energieszenarien fällt auf, dass sehr hohe Treibhausgasreduktionen oft mit einer Wasserstoffnutzung einhergehen [24].

3. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Um den Klimawandel zu verringern, ist eine zügige Reduktion der Treibhausgasemissionen hin zur Treibhausgasneutralität bis ca. 2050 erforderlich. Dies erfordert eine massive Erhöhung der Geschwindigkeit von Treibhausgasreduktionen in allen Sektoren. Hierbei können die vielfältigen chemischen Energiespeicher, die insbesondere auch die saisonale Speicherung ermöglichen, die Treibhausgasneutralität in vielen Sektoren des Energiesystems via Sektorkopplung unterstützen bzw. ermöglichen.

Die Forschung unterstützt die Nutzbarmachung von chemischen Energiespeichern sowohl durch Technologieentwicklung als auch durch systemanalytische Untersuchungen.

Bei der Technologieentwicklung liegt das Augenmerk derzeit insbesondere auf dynamischen und modularen Prozessen wie z.B. die weltweit erste komplette Power-to-Liquid-Prozesskette oder ein Dreiphasen-Reaktorkonzept zur lastflexiblen Methanisierung. Die systemanalytischen Forschungsbeiträge beleuchten insbesondere ökonomische Aspekte von e-Kraftstoffen, Substitutionsoptionen für Biomethan, ökologische Einflüsse von H₂-Transportoptionen und die stark steigende H₂-Nachfrage bei -95% Treibhausgasreduktion bis 2050.

4. Quellen

- [1] Pfluger, B., et al., Reduktion der Treibhausgasemissionen in Deutschland um 95% bis 2050 – Grundsätzliche Überlegungen zu Optionen und Hemmnissen Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland – Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie 2017. Modul 10a: p. 1.
- [2] IPCC, Global Warming of 1.5 °C. 2019.
- [3] Emele, L., et al., Projektionsbericht 2019 für Deutschland – Zusammenfassung in der Struktur des Klimaschutzplans. Climate Change 33/2019, 2019.
- [4] Robinius, M., et al., Linking the Power and Transport Sectors – Part 1: The Principle of Sector Coupling. energies, 2017.
- [5] Rosemarie Benndorf, M.B., Andreas Bertram, Wolfgang Butz, Folke Dettling, Johannes Drotleff, Cornelia Elsner, Eric Fee, Christopher Gabler, Christine Galander, Yvonne Hargita, Reinhard Herbener, Tim Hermann, Fabian Jäger, Judith Kanthak, Hermann Kessler, Yvonne Koch, David Kuntze, Martin Lambrecht, Christian Lehmann, Harry Lehmann, Sandra Leuthold, Benjamin Lünenbürger, Insa Lütkehus, Kerstin Martens, Felix Müller, Klaus Müschen, Diana Nissler, Sebastian Plickert, Katja Purr, Almut Reichart, Jens Reichel, Hanno Salecker, Sven Schneider, Jens Schuberth, Dietrich Schulz, Marlene Sieck, Ulla Strenge, Bärbel Westermann, Kathrin Werner, Christine Winde, Dietmar Wunderlich, Brigitte Zietlow, Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. 2014.
- [6] Piermartini, P., et al., Influence of Channel Geometry on Fischer-Tropsch Synthesis in Microstructured Reactors. The chemical engineering journal, 2017. 313: p. 328–335.
- [7] Dittmeyer, R., et al., Micro and micro membrane reactors for advanced applications in chemical energy conversion. Micro and micro membrane reactors for advanced applications in chemical energy conversion, 2017. 17: p. 108–125.
- [8] Pfeifer, P., et al., Patent WO 2017013003 A1. 2017.
- [9] Lefebvre, J., et al., A comparison of two-phase and three phase CO₂ methanation reaction kinetics. Fuel, 2019. 239: p. 869–904.
- [10] Lefebvre, J., et al., A study of three-phase CO₂ methanation reactions kinetics in a continuous stirred-tank slurry reactor. Fuel, 2018. 217: p. 151–159.
- [11] Lefebvre, J., Three-phase CO₂ methanation reaction kinetics and transient behavior of a slurry bubble column reactor 2019.

- [12] DVGW Deutscher Verein des Gas und Wasserfaches e.V. Technisch-wissenschaftlicher Verein. DVGW-Arbeitsblatt G 260 „Gasbeschaffenheit“, 2013.
- [13] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Technisch-wissenschaftlicher Verein. DVGW-Arbeitsblatt G 262 „Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung“, 2011.
- [14] Götz, M., et al., Methanisierung im Dreiphasenreaktor. 2015.
- [15] <https://www.elab2.kit.edu/144.php>
- [16] Schemme, S., et al., H₂-based synthetic fuels: A techno-economic comparison of alcohol, ether and hydrocarbon production. International Journal of Hydrogen Energy, 2019.
- [17] Beil, et al., Schlussbericht zum Vorhaben "Effiziente MikroBiogasaufbereitungsanlagen". 2019.
- [18] §37 Abs. 1–4 Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Bundesgesetzblatt, 2014: p. 1066.
- [19] §39 Abs. 4 Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Bundesgesetzblatt, 2017: p. 2258.
- [20] EU, Renewable Energy Directive II.
- [21] Bundesnetzagentur, Stamm- und Bewegungsdaten der Übertragungsnetzbetreiber 2007–2015. 2016.
- [22] Wulf, C., et al., Life Cycle Assessment of hydrogen transport and distribution options. Journal of Cleaner Production, 2018. 199: p. 431–443.
- [23] Robinius, M., et al., Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050 (Kurzfassung). 2019.
- [24] Quarton, C., et al., The curious case of the conflicting roles of hydrogen in global energy scenarios. Sustainable Energy and Fuels, 2019.

Flexibilisierungspotenziale in der Industrie



Fraunhofer IPA /
Universität Stuttgart
Dennis Bauer
dennis.bauer@ipa.fraunhofer.de

Prof. Dr. Alexander Sauer
alexander.sauer@ipa.fraunhofer.de

DLR
Dr. Ralph-Uwe Dietrich
ralph-uwe.dietrich@dlr.de

GFZ
Dr. Cornelia Schmidt-Hattenberger
cornelia.schmidt-hattenberger@gfz-potsdam.de

FZ Jülich
Fritz Roeben
f.roeben@fz-juelich.de

Dr. Manuel Dahmen
m.dahmen@fz-juelich.de

KIT
Dr. Bernhard Schäfer
bernhard.schaefer@kit.edu

Wuppertal Institut
Clemens Schneider
clemens.schneider@wupperinst.org

ZAE
Richard Gurtner
richard.gurtner@zoe-bayern.de

1. Einleitung

Initiiert durch das Pariser Abkommen zum Klimaschutz der Vereinten Nationen mit der Begrenzung der globalen Erderwärmung auf maximal 2°C und das Energiekonzept der deutschen Bundesregierung, soll der Anteil erneuerbarer Energien am deutschen Bruttostromverbrauch bis 2050 auf 80 Prozent steigen [1, 2]. Dies bedeutet einen massiven Ausbau der Solar-, Wind- und Biomasse-Energie [3–5].

Mit einem steigenden Anteil an erneuerbaren Energien steigt jedoch auch, bedingt durch deren Wetterabhängigkeit, die Volatilität der Stromversorgung [6] (► *Abbildung 1*). Der Abgleich zwischen Stromerzeugung und Stromnachfrage stellt deshalb eine zunehmende Herausforderung im Stromnetz dar. Um dem gestiegenen Anteil an Wind- und Solarenergie gerecht zu werden, bemühen sich die Netzbetreiber daher verstärkt um die Gewährleistung der Netzstabilität durch temporäre Aktivierung von Reserven oder Abschaltung von Kraftwerken. Die Kosten für solche Maßnahmen haben sich in den letzten fünf Jahren mehr als verdoppelt [7].

Neben Maßnahmen auf der Erzeugungsseite, deren Verfügbarkeit durch die Abschaltung konventioneller Kraftwerke in den nächsten Jahren sinken wird, rücken zunehmend drei Lösungsmöglichkeiten in den Fokus:

1. Speicherung von Energie
2. Ausbau großregionaler Ausgleichsräume
3. Nutzung von Flexibilität auf der Nachfrageseite, also Demand-Side-Management (DSM)

DSM zielt darauf ab, den Abgleich zwischen Stromnachfrage und Stromerzeugung durch Flexibilitätsmaßnahmen auf der Nachfrageseite anzupassen. Ausgelöst wird diese Anpassung durch ein Trigger-signal, beispielsweise die Notwendigkeit zur Netzstabilisierung oder den Preis [8]. Im Vergleich zu den anderen Maßnahmen zeichnet sich das DSM durch eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz aus. Mit einem Anteil von 44 Prozent am deutschen Strombedarf kommt hierfür insbesondere der Industrie eine signifikante Bedeutung zu [9].

2. DSM-Potenzial der deutschen Industrie

Diverse Studien haben bereits das DSM-Potenzial der deutschen Industrie ermittelt, dabei jedoch maßgeblich energieintensive Branchen betrachtet. Des Weiteren lag der Fokus dieser Studien oftmals auf Lastverzicht für Zeiträume kleiner fünf Stunden [10].

Im Kopernikus-Projekt SynErgie wurde deshalb das DSM-Potenzial der deutschen Industrie anhand von 17 charakteristischen Prozessen in acht Wirtschaftszweigen ermittelt [11]:

1. Herstellung von chemischen Erzeugnissen
2. Metallerzeugung und -bearbeitung
3. Herstellung von Glaswaren, Keramik
4. Verarbeitung von Steinen und Erden
5. Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen
6. Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln
7. Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus
8. Herstellung von Metallerzeugnissen, Maschinenbau

Für einen Zeitraum von bis zu 15 Minuten liegt dieses Flexibilitätspotenzial für die Reduzierung der elektrischen Last bei mindestens 2,45 Gigawatt und für die Erhöhung der elektrischen Last bei mindestens 1,09 Gigawatt.

(Für kürzere Zeiträume von 1,2 Minuten ergibt sich für die elektrische Lasterhöhung ein Flexibilitätspotenzial von 2,71 Gigawatt und damit mehr als eine Verdopplung, bei 5 Minuten für den elektrischen Lastverzicht von 3,98 Gigawatt. Für längere Zeiträume über mehrere Stunden und Tage existieren derzeit noch wenige Technologien, um diese realisieren zu können.)

Das Flexibilisierungspotenzial für einen Zeitraum bis zu 15 Minuten ist vergleichbar mit der installierten Leistung des größten deutschen Pumpspeicherkraftwerks bzw. entspricht etwa dem 1,2-fachen der installierten Leistung des größten deutschen Gaskraftwerks. Die jährlich verschiebbare Energiemenge beträgt 3,37 Terawattstunden bei Lasterhöhung bzw. 7,52 Terawattstunden bei Lastverzicht. Das heißt: zwei Drittel der realisierten Erzeugung aus deutschen Pumpspeicherkraftwerken im Jahr 2018 könnten durch eine flexible Stromnachfrage der Industrie ersetzt werden.

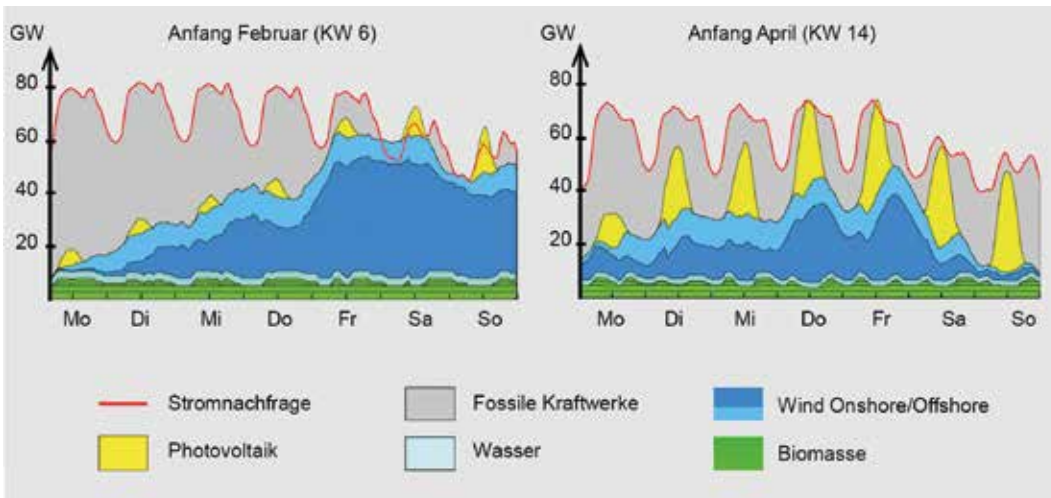


Abbildung 1
Volatilität der Stromerzeugung und Stromnachfrage im Jahr 2022
(Agora Energiewende, [6])

Die deutsche Industrie könnte deshalb durch die Stromnachfrageflexibilisierung einen maßgeblichen Beitrag zum Gelingen der Energiewende leisten. Um diese Flexibilität lang- bis mittelfristig auch tatsächlich nutzen zu können, ist jedoch die Erforschung und Weiterentwicklung von Technologien, deren Automatisierung sowie der Abbau von Hemmnissen notwendig [11, 12].

3. Anwendungsbeispiele für DSM

Die Industrie bietet eine Vielfalt von Möglichkeiten zur Energieflexibilisierung, in den Produktionsprozessen und der Produktionsinfrastruktur [11, 13, 14]. Drei beispielhafte Anwendungen werden nachfolgend vorgestellt:

3.1 Energieflexibilität in der Luftzerlegung

Aktuelle Luftzerlegungsanlagen sind meist auf einen stationären Betrieb ausgelegt. Häufige, schnell spürbare Lastwechsel im Rahmen der Lastflexibilisierung könnten die Anlagenkomponenten stark beanspruchen. Zusätzlich kann ein Verlassen des Auslegungspunktes mit einem signifikanten Effizienzverlust einhergehen.

Um die Ausrichtung des Betriebes an eine Stromerzeugung aus regenerativen Quellen auch wirtschaftlich attraktiv zu gestalten, kann die Produktion von Luftgasen an Preisschwankungen in den Energiemärkten angepasst werden. Auf Basis von Leistungsdaten der Anlagen wird über die Verwendung numerischer Verfahren der optimale Anlagenbetrieb für vorliegenden Kundenbedarf sowie Vorhersagen über den Strommarkt ermittelt.

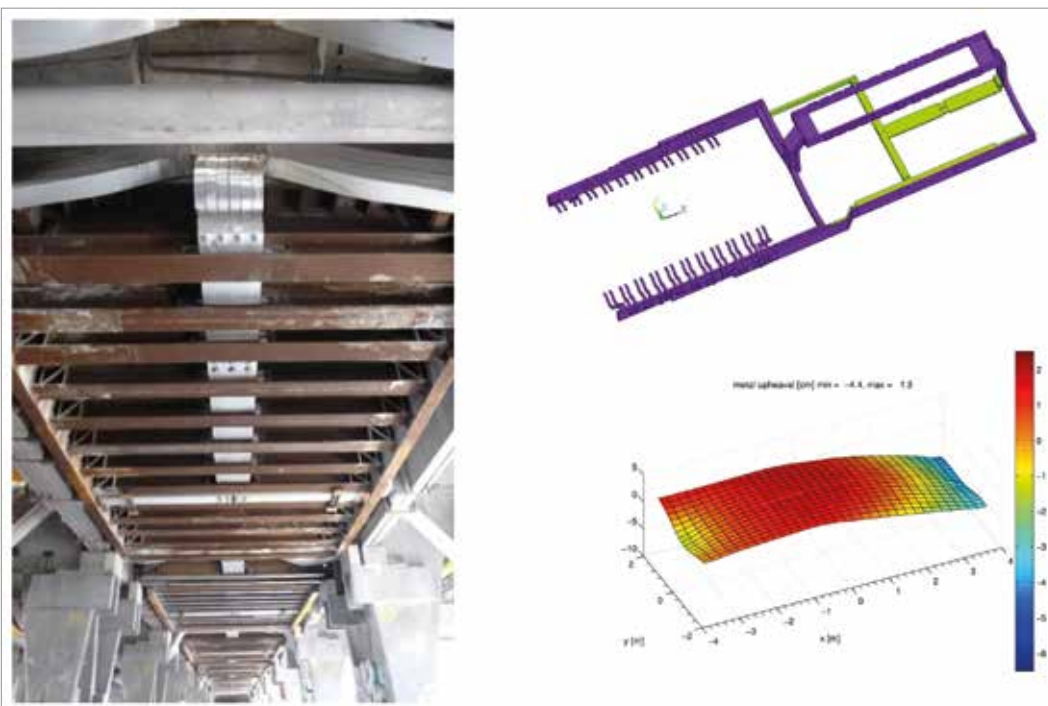


Abbildung 2
Flexibilisierte Aluminiumelektrolyse: Magnetfeldkompensation (re.) durch Installationen von Stromschienen (li.) [11]

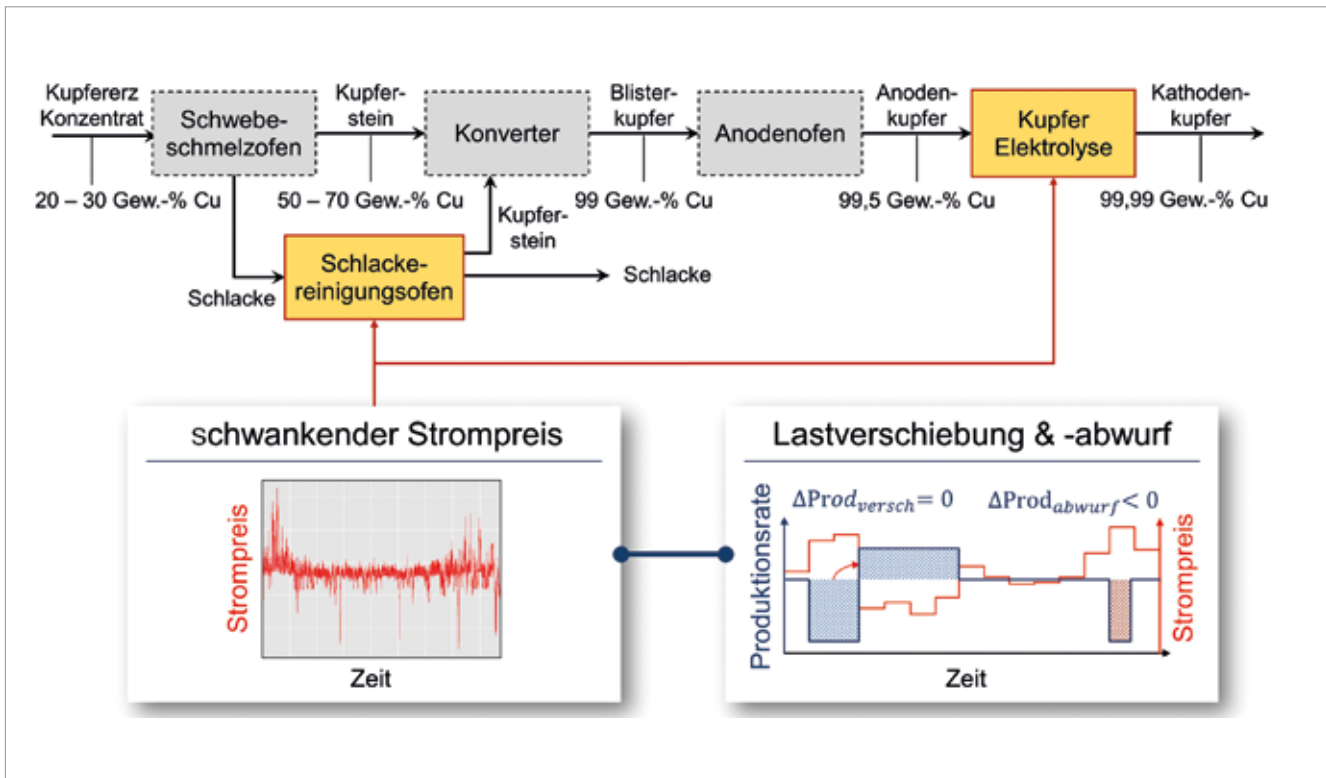


Abbildung 3
DSM-Maßnahmen in der Kupferproduktion bei schwankendem Strompreis
 (repräsentatives Flussdiagramm)
 (adaptiert von [15])

Eine derart optimierte Produktionsplanung identifiziert bereits bei heutigen Preisschwankungen vielversprechende Potenziale zur Reduktion der Energiekosten. Zusätzlich erlauben mögliche Weiterentwicklungen (robustere Wärmetauscher, erweiterte Teillastbereiche, größere Produktspeicher, etc.) eine weitergehende Flexibilisierung.

Am Beispiel des Wärmetauschers bedeutet dies, dass im lastflexiblen Betrieb ungleichmäßige Temperaturverteilungen über das Bauteil mit zum Teil sehr hohen räumlichen und zeitlichen Gradienten entstehen können. Die hervorgerufenen Thermospannungen können die Lebensdauer der Wärmeübertrager verringern. Durch konstruktive Änderungen und intelligente Betriebsweisen kann dem erhöhten Verschleiß bei flexiblem Betrieb entgegengewirkt werden. Daher wurde zum einen eine detaillierte Modellbasis geschaffen, welche die simulative Untersuchung und Optimierung von Strategien für den lastflexiblen Betrieb ermöglicht (»FlexASU«). Zum anderen erlaubt ein Teststand entsprechende Weiterentwicklungen experimentell zu untersuchen. Künftige Wärmeübertrager-Generationen werden daher eine gesteigerte Robustheit gegenüber Ermüdungsschäden bei hohen Lastspielzahlen zeigen.

3.2 Energieflexibilität in der Aluminiumelektrolyse durch Magnetfeldkompensation

Aluminium wird global ausschließlich nach dem Hall-Héroult-Verfahren der Schmelzflusselektrolyse aus

Aluminiumoxid gewonnen. Zu den Idealbedingungen des traditionellen Elektrolysebetriebes zählt die rund um die Uhr konstante Stromabnahme. Bei einer volatilen Stromversorgung wäre der Elektrolysebetrieb daher nicht aufrecht zu erhalten.

Um das Flexibilisierungspotenzial der Aluminiumelektrolyse nutzen zu können, wurde am TRIMET-Standort Essen eine innovative Aufrüstung einer der bestehenden Elektrolysehallen unternommen, die in dieser Form weltweit einmalig ist. Eins der drei Aluminiumelektrolyse-Systeme wurde zur Ermöglichung eines flexiblen Betriebes (»FLEX-Elektrolyse«) mit einer sogenannten Magnetfeldkompensation ausgerüstet, um die störenden Effekte des prozessbedingt starken Gleichstrom-Magnetfeldes zu verringern (► *Abbildung 2*). Als Ergebnis dieser Magnetfeldkompensation werden die durch einen veränderlichen Elektrolysestrom verursachten magnetischen Störungen des Prozesses weitgehend eliminiert und so die Voraussetzungen für eine Flexibilisierung geschaffen.

Durch die Technologieentwicklung wurde die Möglichkeit geschaffen, die Nominalleistung der Linie von ca. 90 MW um bis zu ± 20% zu variieren, um je nach Versorgungssituation im Netz bis zu 18 MW Leistungsüberschuss aufzunehmen bzw. bei Versorgungsengpässen durch Drosselung der Produktion dem Netz zur Verfügung zu stellen. Dabei muss die Effizienz und Stabilität des elektrolytischen Produktionsprozesses weiterhin gewahrt bleiben. Das Energieverschiebepotenzial beläuft sich dabei auf ± 72 MWh.

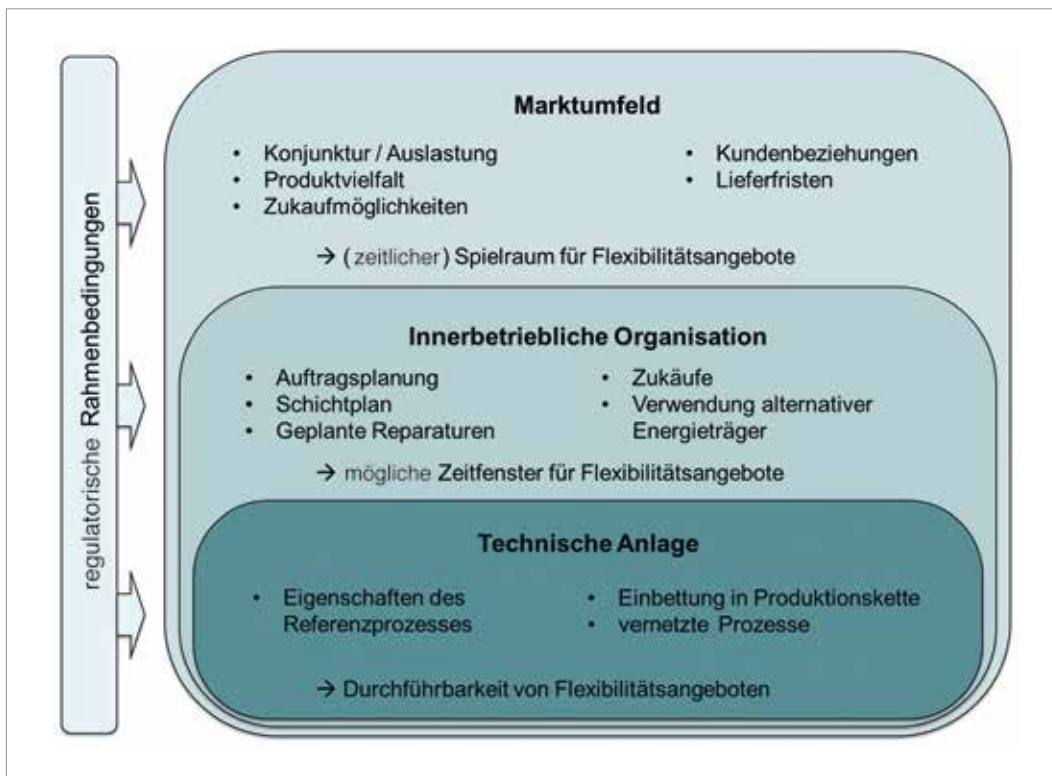


Abbildung 4

Mehr-Ebenenmodell der Energieflexibilität**3.3 Energieflexibilität in der Kupferproduktion**

Das Schmelzen und Raffinieren von Kupfer ist ein energieintensiver Prozess, der sowohl hohe Mengen an Erdgas als auch Strom verbraucht. Der hohe Strombedarf deutet auf ein hohes DSM-Potenzial hin. Es ist jedoch schwierig, das branchenweite DSM-Potenzial zu quantifizieren, da die meisten Kupferhütten und -raffinerien über individuelle Produktionsanlagen verfügen.

Um dennoch erste Einblicke in das DSM-Potenzial zu gewinnen, wurde ein repräsentativer Kupferproduktionsprozess im Rahmen des Helmholtz „Energy Systems Integration“-Projekts analysiert, ([15], ► *Abbildung 3*). Im Mittelpunkt der Analyse standen Lastverschiebung und Lastabwurf in zwei energieintensiven Prozessschritten: der elektrolytischen Raffination von Kupfer und dem elektrischen Schlackereinigungsöfen.

Zunächst wurde dabei eine Obergrenze für das techno-ökonomische Potenzial der Lastverschiebung quantifiziert. Anschließend wurden die Opportunitätskosten bestimmt, welche mit einem Lastabwurf verbunden sind. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Lastverschiebung ein hohes ökonomisches Potenzial aufweist, der Lastabwurf im aktuellen Marktumfeld hingegen keine profitable Strategie darstellt [15]. Die flexible Anpassung der Produktion an schwankende Strompreise reduziert in beiden Prozessschritten sowohl die jährlichen Stromkosten als auch die indirekten Treibhausgasemissionen [15].

4. Hemmnisse

Um die beschriebenen Anwendungsbeispiele für DSM lang- bis mittelfristig auch tatsächlich nutzen zu können, ist der Abbau von Hemmnissen notwendig [11, 13].

Aus einer Literaturrecherche sowie Gesprächen mit relevanten Akteuren sind zunächst einige grundlegende Vorbedingungen für die Bereitstellung von Flexibilität durch die Grundstoffindustrie abgeleitet worden. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die technische Anlage darf keinen Schaden nehmen.
- Die Kundenzufriedenheit muss gewährleistet bleiben.
- Die Produktqualität darf nicht leiden.
- Lieferfristen müssen eingehalten werden.
- Die Produktionsmenge wird durch die Nachfrage bestimmt. Entsprechend kommt in der Grundstoffindustrie meist als einzige Form der Laständerung eine Lastverschiebung in Betracht.
- Die (regelmäßige) Durchführung von Flexibilitätsmaßnahmen muss in (angepasste) innerbetriebliche Abläufe integriert werden können.
- Bestehende regulatorische Rahmenbedingungen müssen berücksichtigt werden.
- Es muss für das Unternehmen wirtschaftlich sein.
- Zuvorderst muss natürlich die technische Machbarkeit der Flexibilisierung gegeben sein; manche Prozesse sind nicht teillastfähig oder unterliegen anderen technischen, etwa sicherheitsbedingten, Anforderungen.

Aus diesen Vorbedingungen ergab sich über mehrere iterative Schritte eine Differenzierung möglicher Hemmnisse auf drei verschiedenen zeitlich-organisatorischen Ebenen, eingerahmt von regulatorischen Rahmenbedingungen, die zu beachten sind (► *Abbildung 4*).

Regulatorischer Änderungsbedarf besteht deshalb darin, zukünftig widersprüchliche Anreize zu vermeiden sowie sinnvolle Flexibilitätsbereitstellung nicht durch Begrenzungstatbestände zu verhindern. Des Weiteren müssen die Möglichkeiten zur Flexibilitätsbereitstellung unabhängig von Energieintensivität und Größe der Unternehmen erweitert werden. Außerdem sind Anreize zu setzen, den Stromverbrauch zu passenden Zeitpunkten zu reduzieren und zu anderen Zeitpunkten zu erhöhen [16].

Nur so werden Anreize für die Industrie geschaffen, Energieflexibilität bereitzustellen und damit einen maßgeblichen Beitrag zur Energiewende zu leisten.

5. Literatur

- [1] UNFCCC. The Paris Agreement, 2018 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [2] BMWI. Energiekonzept. für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, 2010 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- [3] Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 13. Mai 2019 (BGBl. I S. 706) geändert worden ist. EEG, 2019
- [4] BUNDESNETZAGENTUR. Windenergieanlagen auf See, 2018 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Offshore/offshore-node.html
- [5] BMWI. Entwicklung der Stromerzeugung und der installierten Leistung von Wasserkraftanlagen, 2019 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Textbausteine/Banner/banner_wasserkraft.html
- [6] BAAKE, R. 12 Thesen zur Energiewende. Vortrag auf der 3. Thüringer Erneuerbare-Energien-Konferenz am 25.02.2013 in Weimar, 2013 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin2/Projekte/2012/12-Thesen/Agora_12_Thesen_Praesentation_Vollstaendige_Praesentation_der_Zusammenfassung_RB_25022013.pdf
- [7] BUNDESNETZAGENTUR. Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen: Gesamtjahr und Viertes Quartal 2018, 2019 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2019/Quartalsbericht_Q4_2018.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- [8] PALENSKY, P. und D. Dietrich. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(3), 381-388. Verfügbar unter: doi:10.1109/TII.2011.2158841
- [9] UMWELTBUNDESAMT. Stromverbrauch, 2019 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch>
- [10] EISENHAEUER, S., REICHART, M., SAUER, A., WECKMANN, S. und F. Zimmermann. Energieflexibilität in der Industrie. Eine Metastudie, 2018 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/84E8EBDE385D6DDEE0539A695E867D37/current/document/Metastudie_Energieflexibilitaet-in-der-Industrie.pdf
- [11] SAUER, A., ABELE, E. und H. Ulrich Buhl, Hg. Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2019. ISBN 978-3-8396-1479-2
- [12] ROESCH, M., BAUER, D., HAUPT, L., KELLER, R., BAUERNHANSL, T., FRIDGEN, G., REINHART, G. und A. Sauer. Harnessing the Full Potential of Industrial Demand-Side Flexibility: An End-to-End Approach Connecting Machines with Markets through Service-Oriented IT Platforms. Applied Sciences, 2019, 9(18), 3796. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/app9183796>
- [13] AUSFELDER, F., SEITZ, A. und S. von Roon, Hg. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie. Methodik, Potenziale, Hemmnisse. Frankfurt am Main: DECHEMA e.V, 2018. ISBN 978-3-89746-206-9
- [14] AUSFELDER, F., VON ROON, S. und A. Seitz. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie II. Methodik, Potenziale, Hemmnisse. 2. Auflage. Frankfurt am Main: DECHEMA e.V, 2019. ISBN 978-3-89746-219-9
- [15] RÖBEN, F.T.C., BAU, U., DAHMEN, M., REUTER, M.A. und A. Bardow. Demand Side Management Potential of Primary Copper Production. 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Breslau, Polen, 23-28 Juni 2019, 2019
- [16] SYNERGIE. Positionspapier zu regulatorischen Änderungen, 2019. https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/8A7B1981D3AD5C60E0539A695E86C978/live/document/20190123_-_SynErgie_Positionspapier_Regulatorische_Rahmenbedingungen.pdf [Zugriff am: 11. September 2019] ZAE

Potenziale im Gebäudesektor für effiziente Energieverwendung

Einleitung

Vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels ist die Zielstellung „klimaneutraler Gebäudebestand in 2050“ [1] nach wie vor von größter Bedeutung. Der Sektor umfasst Wohn- und Nichtwohngebäude, deren größte Energiebedarfe in den Bereichen Raumwärme und Klimakälte sowie Warmwasser verortet sind.

Nur durch eine Kombination von Energieeffizienz sowie den Einsatz erneuerbarer Energien kann diese Zielstellung wirtschaftlich erreicht werden [2].

Trotz fortschreitender Steigerung der Effizienz im Gebäudesektor kann aber keine Reduktion des Endenergiebedarfes in den letzten Jahren beobachtet werden. Nach 36% im Jahr 2016 blieb der Anteil des Gebäudesektors am Endenergieverbrauch Deutschlands im Jahr 2017 mit 35% auf einem nahezu konstanten Niveau. Denn die Effizienzvorteile wurden durch eine gesteigerte Wohnfläche pro Kopf sowie Rebound-Effekte kompensiert. Suffizienz sollte nicht als Verzicht interpretiert werden, sondern vielmehr muss die Frage „Was ist genug?“ in der Breite der Gesellschaft diskutiert und beantwortet werden.

Darüber hinaus sind allerdings auch Defizite im Bereich der Energieeffizienz der Gebäude zu identifizieren: Die realisierte Sanierungsquote liegt seit 15 Jahren unter 1%, wohingegen gemäß verschiedenster Studien Sanierungsquoten von 2–2,5% für die gesetzten Zielstellungen notwendig wären [3].

Dass diese Ziele mit entsprechender Entschlossenheit und Tatkraft umsetzbar sind, zeigt der Blick in die Vergangenheit nach der deutschen Einheit. Zur Mitte der 90er Jahre lag die Sanierungsrate in den neuen Ländern mehrere Jahre lang über 3% [4].

Neben der Effizienz stagniert auch der Anteil erneuerbarer Energien im Wärmesektor seit einigen Jahren bei 14%, die sich zudem wesentlich im Verheizen von Biomasse begründen. Dass ein Drittel aller Neubauten im Jahr 2018 mit dem Energieträger Erdgas zum Heizen ausgestattet werden, ist vor dem Hintergrund der langen Lebenszyklen im Gebäudesektor kritisch zu betrachten, da heute der Gebäudebestand von 2050 gebaut wird und bessere technologiereife Optionen existieren.

Mit dem jüngst vorgeschlagenen Gebäudeenergiegesetz (GEG) soll das Langfristziel „Klimaneutraler Gebäudebestand“ umgesetzt werden. Allerdings wurde die Effizianzforderung im Neubau für nearly zero energy buildings (nZEB) schrittweise auf das bestehende Niveau der EnEV 2016 (KfW 70) nach oben korrigiert und liegt damit weit hinter dem Stand der Technik (z.B. Plus-Energiehaus, Passivhaus) zurück.

Die Energieeffizienzpotenziale im Gebäudesektor lassen sich in drei Bereiche unterteilen:

1. Gebäudehülle
2. Gebäude- und Regelungstechnik
3. übergeordnete Rolle der Gebäude in einer effizienten dezentralen Energieversorgung

Entsprechend dieser Aufteilung werden im Folgenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der FVEE-Institute vorgestellt.

1. Gebäudehülle: Potenziale für die Primärenergieeinsparung im Gebäudebestand sowie im Neubau

In Deutschland existieren derzeit ca. 1,8 Mio. Nichtwohngebäude, was einem Anteil von ca. 10% am gesamten Gebäudebestand entspricht, wohingegen deren Energieverbrauch rund 35% im Gebäudesektor ausmacht [5]. Gerade im Nichtwohnbereich kommt somit der signifikanten Erhöhung der derzeit nicht ausreichenden Sanierungsquote eine bedeutende Rolle zu.

Fassadensystem „EE-Modul“

Unter Federführung des Fraunhofer-Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) wird derzeit im Forschungsprojekt „EE-Modul“ mit Projektpartnern aus der Fassaden- und Anlagenindustrie ein neuartiges Fassadensystem entwickelt. Der Systemansatz vereint dabei die anlagentechnischen Funktionen Heizen, Kühlen, Lüften und Energieerzeugen in einer elementierten Modulfassade. Mit diesem Ansatz kann der Bauprozess im Neubau – vor allem aber im Sanierungsbereich – erheblich beschleunigt werden.

Die technischen Funktionen müssen somit nicht wie üblich vom Gebäudekern ausgehend bereitgestellt



ZAE

Dr. Bastian Büttner
bastian.buettner@zae-bayern.de

DBFZ

Dr. Volker Lenz
volker.lenz@dbfz.de

Fraunhofer IEE

Dr. Michael Krause
michael.krause@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE

Dr. Bruno Bueno
bruno.bueno@ise.fraunhofer.de

Dr. Tilmann Kuhn

tilmann.kuhn@ise.fraunhofer.de

ISFH

Dr. Federico Giovannetti
f.giovannetti@isfh.de

Michael Knoop
m.knoop@isfh.de

FZ Jülich

Dr. Leander Kotzur
l.kotzur@fz-juelich.de

Dr. Martin Robinius

m.robinus@fz-juelich.de

ZSW

Ruben Rongstock
ruben.rongstock@zsw-bw.de

Abbildung 1
PVT-Testanlage und
Aufbau eines PVT-
Prototypes
[©ISFH]



werden, sondern können direkt in die Gebäudehülle integriert werden und kommen, abgesehen von einer Stromleitung, vollständig ohne weitere Versorgungsleitungen aus. Kern der Entwicklung ist ein standardisiertes Fassadensystem, welches um ein anlagentechnisches Modul erweitert wird, das ein Lüftungssystem, eine Luft/Luft-Wärmepumpe und ein Photovoltaikpaneel enthält. Der dezentrale anlagentechnische Ansatz ermöglicht damit eine individuelle Anpassung auf die dynamischen Anforderungen eines jeden Raums. Durch ein extrem hohes Maß an Vorfertigung in Verbindung mit einem multifunktionalen Ansatz verspricht das System eine hohe Bauqualität bei gleichzeitig verringertem Installations- und Abstimmungsaufwand an der Baustelle.

Zusätzlich entfallen aufwändige Arbeiten im Inneren des Gebäudes sowie in den einzelnen Räumen, so dass eine Sanierung auch im laufenden Nutzungsbetrieb des Gebäudes stattfinden kann. Das System zeichnet sich durch eine hohe Kostensicherheit (Investment, Betrieb) sowie einen beschleunigten Bauprozess aus.

PVT-Paneele und solarthermisch-aktive Fassade

Die Integration solarer Technologien in die Gebäudehülle stellt einen weiteren vielversprechenden Weg dar, um die Nutzung erneuerbarer Energien im Gebäudereich zu verstärken. Architektonisch anspruchsvolle Lösungen und konstruktive Synergien ermöglichen dabei die Steigerung der Akzeptanz und die Senkung der Kosten.

Zwei beispielhafte Ansätze zeigen aktuelle Aktivitäten am Institut für Solarenergieforschung Hameln. In Kooperation mit den Partnern Blue Energy Systems und Carsten Grobe Passivhaus sind photovoltaisch-ther-

mische (PVT) Paneele entstanden, deren Wärmeübertrager die Funktion des Tragesystems übernehmen und die als modulare Dachhaut dienen (► *Abbildung 1*). Nach der abgeschlossenen Entwicklungsphase werden die ersten Pilotanlagen errichtet und messtechnisch überwacht, um das Verhalten der PVT-Paneele im realen Betrieb zu analysieren.

In einem zweiten Projekt untersucht ein interdisziplinäres Konsortium aus Fassadenherstellern, Planern und Wohnungswirtschaft die solarthermische Aktivierung vorgehängter hinterlüfteter Fassaden sowie deren Anbindung in das Wärmeversorgungssystem von Geschosswohnungsbauten. Der Ansatz besteht darin, Solartechnik durch konzeptionelle und konstruktive Lösungen unsichtbar zu integrieren, damit das ursprüngliche Erscheinungsbild der Fassade unverändert bleibt. Nach ersten erfolgreichen Ergebnissen mit Glas (► *Abbildung 2*) werden zurzeit solaraktive Fassadenbekleidungen aus verschiedenen Materialien entwickelt und bewertet.

Elektrochrome Verglasungen

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der damit notwendig werdenden Klimaanpassung stellt das Themengebiet der intelligenten, schaltenden Gebäudehülle eine Technologie mit hohem Energieeinsparpotenzial dar. Im Bereich der transparenten Gebäudehülle können elektrochrome Verglasungen den solaren Ertrag ohne mechanische Teile steuern und bieten weiterhin Sichtkontakt nach außen, weshalb sie von Architekten häufig bevorzugt werden. Allerdings bieten sie aufgrund ihrer nicht streuenden Eigenschaften nur einen begrenzten Blendschutz. Die am weitesten verbreitete Technologie sind elek-



Abbildung 2
Testanlage einer solaraktiven Glasfassade und exemplarischer Modulaufbau
 [©ISFH]

trochrome Verglasungen bei welchen die Verringerung der Transmission bzw. Durchsicht über niedrige elektrische Spannungsimpulse erreicht wird.

Weiterhin können elektrochrome Verglasungen in eine übergeordnete Gebäudesteuerung oder in das Internet of Things (IoT) eingebunden werden. Sie ermöglichen die Einfärbung einzelner Scheiben oder ganzer Fensterreihen und die Kopplung mit automatischen Lichtsensorsteuerungen. Am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) werden aktuelle Forschungsfragen dieser Technologie behandelt, etwa die Funktionalität als Blendschutz durch niedrige Transmission im gefärbten Zustand durch den Einsatz innovativer flüssiger Redoxelektrolyte und die Entwicklung fortschrittlicher Regelstrategien.

Schaltbare Wärmedämmung

Neben aktiven Verglasungen kann auch die opake Gebäudehülle schaltbar ausgeführt werden. Am Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern) wird im Rahmen des Projektes VID1 (FKZ 03EGB0005A) eine thermisch schaltbare Wärmedämmung (SWD) auf Basis eines Vakuumisulationspaneels entwickelt. Hierbei macht man sich die innendruckabhängige Wärmeleitfähigkeit des Füllmaterials zu Nutze (► *Abbildung 3*). Durch Erhitzen eines Getters werden geringe Mengen von Wasserstoff in Höhe von etwa 10 mbar im Panel freigesetzt. Die dabei notwendige Leistung beträgt nur wenige Watt pro Quadratmeter Wandfläche. Beim Erkalten nimmt der Getter diese Menge rein passiv wieder auf.

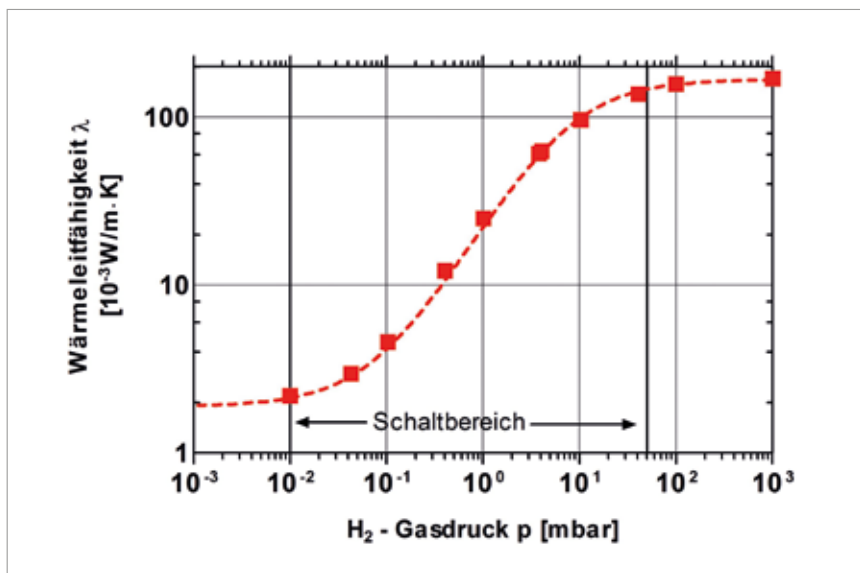


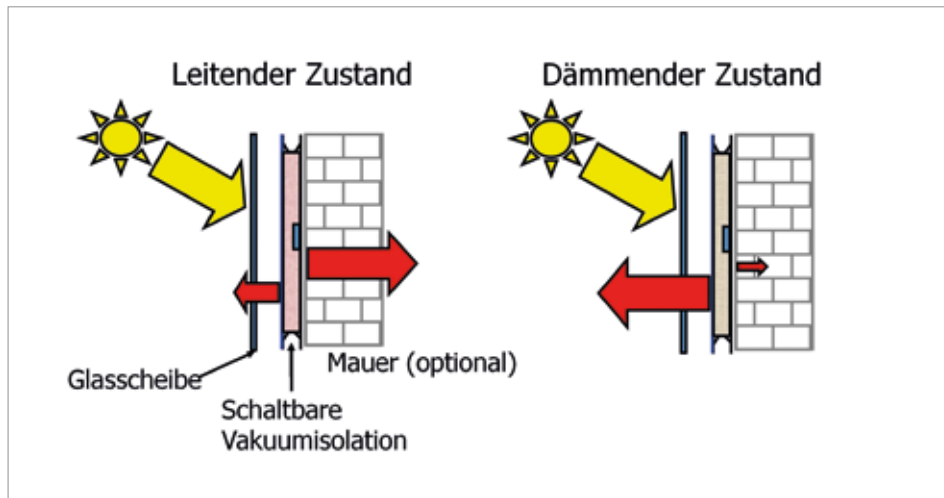
Abbildung 3
Schaltbare Wärmedämmung:
 Die Wärmeleitfähigkeit des Füllmaterials ist vom Gasdruck abhängig.
 [ZAE Bayern]

Abbildung 4

**Schaltbare
Wärmedämmung:**

(links)
Leitfähiger Zustand
zur Gewinnung solarer
Erträge im Winter

(rechts)
Dämmender Zustand
zur Reduktion
der sommerlichen
Überhitzung
[ZAE Bayern]



Im Rahmen des Projektes wurde in einer Ökobilanz „von der Wiege bis zur Bahre“ das entwickelte schaltbare System mit einem System verglichen, das aus herkömmlichem WDVS mit gleichem Dämmwert und Wärmepumpe besteht. Dabei zeigte sich, dass das schaltbare System durch die Nutzung solarer Erträge (► *Abbildung 4*) die Wärme im Vergleich mit einer deutlich höheren Effizienz bereitstellen kann, was zu einer signifikanten CO₂-Einsparung über den Lebenszyklus führt.

2. Gebäude- und Regelungstechnik: Hindernisse und Potenziale für die Reduktion von CO₂-Emissionen

Wärmepumpen-Siedlung

Ein wichtiger Baustein für eine nachhaltige, effiziente Wärmeversorgung im Wohngebäudebereich ist die Wärmepumpe (WP). Unter geringem Stromeinsatz entziehen WP der Umwelt, wie z. B. der Luft, dem Grundwasser oder dem Erdreich, Wärme und machen diese für die Gebäudeheizung oder die Trinkwarmwasserbereitung nutzbar. Entscheidend für einen netzschonenden und umweltverträglichen WP-Betrieb ist die Nutzung von lokal produziertem Strom aus erneuerbaren Energien.

Eine seit 2018 mit Messtechnik ausgestattete WP-Siedlung bei Hameln (► *Abbildung 5*) liefert Erkenntnisse dazu, welcher Anteil des elektrischen Verbrauches im Ortsnetz durch Windkraft (WK)- und Photovoltaik (PV)-Anlagen lokal gedeckt werden kann.

Wird jedes Gebäude (Jahresstromverbrauch: 5,5 MWh/a) mit 5 kW_p PV-Anlage ausgestattet und jedem Gebäude zusätzlich eine anteilige Leistung einer WK-Anlage von 5 kW zugerechnet, so wird mit dieser Anlagenleistung insgesamt ca. 2,7 mal so viel Strom im Quartier erzeugt, wie verbraucht. Durch einen vorrangigen Betrieb der WP zu Zeiten mit PV-Über-

schuss und dezentrale Batteriespeicher (5 kWh pro Gebäude) werden im WP-Quartier lokale erneuerbare Deckungsanteile von fast 90% möglich (Szenario 5 in ► *Abbildung 6*). Eine vollständige erneuerbare Versorgung ist somit bereits mit aktuell verfügbaren Technologien in greifbarer Reichweite.

Latentwärmespeicher

Intelligente Regelungstechnik nimmt eine immer wichtigere Rolle ein, um die Potenziale neuer Technologien voll auszuschöpfen. Ein Beispiel hierfür ist etwa der Einsatz von Latentwärmespeichern, die in ihrem Phasenwechsel eine große Wärmespeicherkapazität in einem kleinen Temperaturbereich aufweisen.

Am Energy Efficiency Center des ZAE Bayern sind unter anderem Latentwärmespeicher in Form von makroverkapselten PCM-Modulen in modifizierten Standard-Kühldecken verbaut [6] und seit 2013 einem intensiven Monitoring unterzogen worden.

Die Funktion der Kühldecke stellt sich folgendermaßen dar: tagsüber erfolgt eine für den Nutzer angenehme passive Raumkühlung durch Aufschmelzen des Materials, welches während dieses Vorgangs seine Temperatur auf der Schmelztemperatur von etwa 22°C stabilisiert. Das in den Makrokapseln verflüssigte Latentwärmespeichermaterial wird darauf folgend nachts per Wasserdurchfluss durch die Kühldecken wieder zum Erstarren gebracht (regeneriert). Dadurch kann eine Kühllastverschiebung sowie eine Kappung von Kühllastspitzen realisiert werden.

Die Umstellung von einer rein zeitgesteuerten auf eine bedarfsgesteuerte Regeneration führte zu einem signifikant höheren Einsparpotenzial. Verglichen mit einem herkömmlichen Kühldeckensystem konnte so bei gleichem thermischen Komfort ein leicht reduzierter Kältebedarf bei gleichzeitig fast vollständiger Lastverschiebung in die Nacht erreicht werden [7]. Dies steigert die Möglichkeiten regenerativer Kältequellen für die Kälteerzeugung und damit weitere Effizienzpotenziale zu erschließen.

Herausforderungen

Außer Potenzialen sind auch aktuelle Hindernisse in der Gebäudetechnik zu identifizieren.

- Basierend auf heutigen und kommenden Regelungen (EnEV bzw. GEG) zum Dämmstandard im Neubau und zu Sanierungspflichten ist nicht davon auszugehen, dass der Wärmebedarf im Gebäudebereich bis 2050 auf weniger als 75% des Wertes von 2008 sinkt. Für einen klimaneutralen Gebäudebestand müsste also der absolute Einsatz erneuerbarer Wärme mindestens verfünffacht werden.
- Dabei ist aufgrund verstärkter Nachfragen nach Biomasse in verschiedenen Anwendungen nicht davon auszugehen, dass der bestehende Mix an Erneuerbaren mit einer Dominanz der biogenen Festbrennstoffe beibehalten werden kann.
- Elektrisch betriebene Wärmepumpen werden voraussichtlich den Großteil des Ausbaus übernehmen müssen. Die derzeitige Tendenz rund die Hälfte der Anlagen als Luft-Wasser-Wärmepumpen auszuführen wird sich voraussichtlich aus verschiedenen Gründen kaum ändern, so dass gerade im Winter extrem hohe Strombedarfe zu erwarten sind (hoher Wärmebedarf, niedrige Arbeitszahlen). Bei niedrigen Solarerträgen und immer wieder auftretenden Windflauten steht ein treibhausgasneutrales Stromsystem vor gewaltigen Herausforderungen.
- Neben dem Einsatz von Spitzenlast GuD-Kraftwerken oder Brennstoffzellen in Einzelgebäuden mit erneuerbaren Gasen, erscheint ein gezielter Einsatz von Biomasse in Kleinstanlagen oder lokalen Wärmenetzen als Spitzenlastoption vielversprechend. Dies hat auch das Projekt BioPlanW von UFZ, DBFZ und Uni Kassel aufgezeigt [8]. Der gezielte Einsatz

von in Wärmepumpen-PV-Systeme eingebundenen Einzelraumfeuerstätten oder Kleinstfeuerungen bzw. Kleinst-Wärmeerkopplungsanlagen kann wesentlich zur Stromnetzstabilisierung beitragen.

- Die richtige Mischung aus Dämmung und erneuerbaren Energien, integrierte Wärmekonzepte und die Weiternutzung bestehender Komponenten verkomplizieren die immer individuelleren Lösungsansätze in einem Maße, dass Nutzer, Entscheider und Heizungsinstallateure einschließlich der Gebäudeplaner in der Breite des Marktes nicht mehr angemessen mit den Herausforderungen umgehen können. Schnell wird dann die komplexe erneuerbare Lösung verworfen und der geringste erlaubte Dämmstandard mit dem billigsten erlaubten Heizungssystem (Gasbrennwert + Solarthermie) installiert. Damit ist dann aber eine treibhausgasneutrale Wärmeversorgung bis 2050 ausgeschlossen!
- Daher müssen alle Optionen der Digitalisierung, des automatisierten Lernens und der künstlichen Intelligenz genutzt werden, um die bestehende Komplexität für alle Akteure so weit hinter Automatismen zu verbergen, dass die notwendige Akzeptanz geschaffen wird. Dazu sind automatisierte Auslegungshilfen, Online-Schritt-für-Schritt Aufbau- und Anschlussanleitungen für Heizungsinstallateure, die Online-Ferneinrichtung und -wartung des Systembetriebs und letztlich auch die Auslagerung von Systemreglern in eine gesicherte Cloud zur Betriebsoptimierung und Kostenreduktion zu entwickeln. Neben öffentlichen, einheitlichen Kommunikationsstandards und flächendeckendem 5G bedarf es zumindest europäisch betriebener sicherer Clouddienstleister.



Abbildung 5

Solarsiedlung
aus 70 Niedrigenergie-Einfamilienhäusern am
Ohrberg bei Hameln
[ISFH]

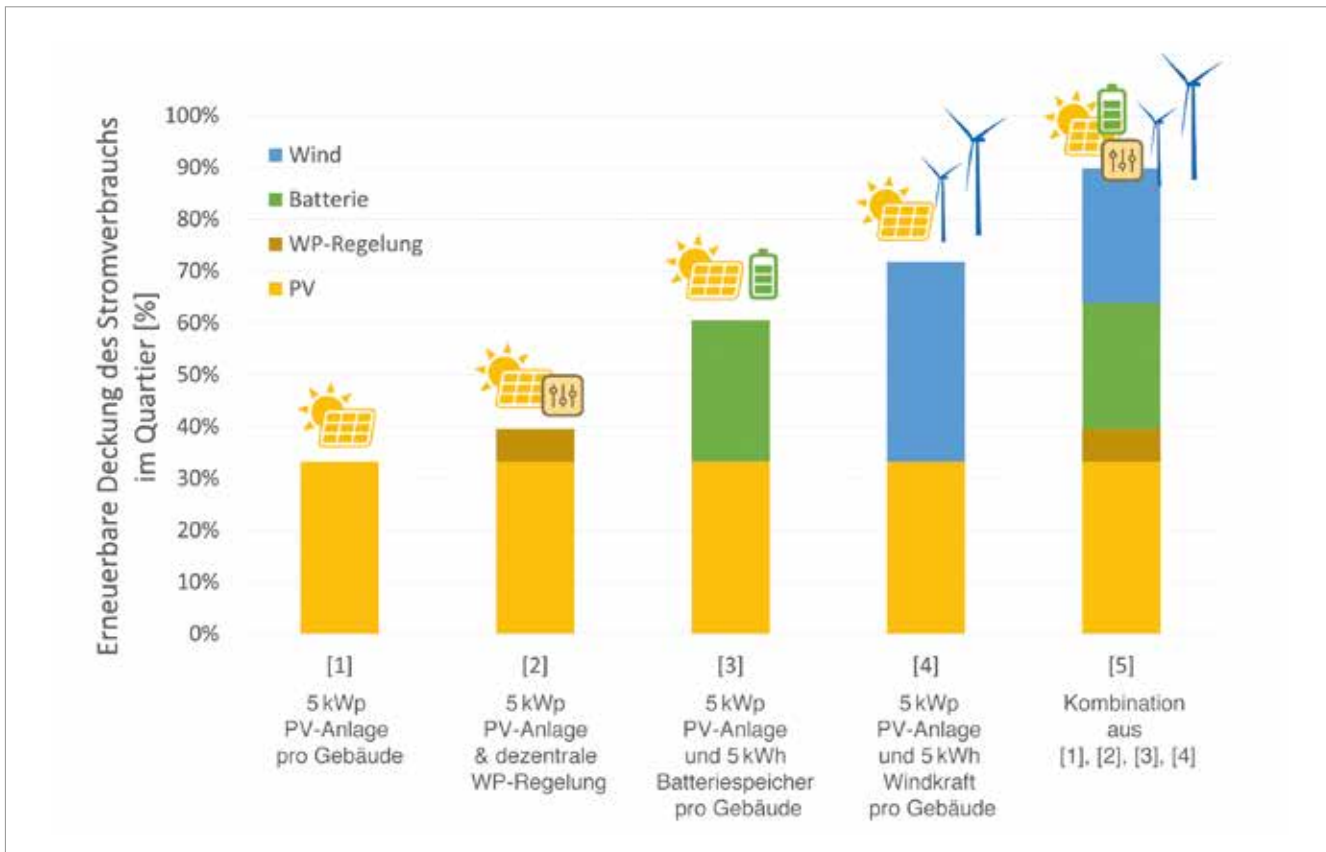


Abbildung 6
Erneuerbare Deckungsanteile des Stromverbrauchs in 5 Versorgungsszenarien für die Ohrbergsiedlung.
 Die Daten basieren auf gemessenen HH-Lastprofilen und simulierten Versorgungskonzepten.
 [©ISFH]

3. Herausforderungen und Hemmnisse beim Übergang zu einer effizienten dezentralen Energieversorgung

Nach derzeitigen Entwicklungspfaden für das Jahr 2050 in Deutschland wird der Anteil steuerbarer Verbraucher wie Wärmepumpen und E-Pkw stark ansteigen (WP: 14 Mio, E-Pkw 33 Mio.) [9].

Um dieses Flexibilitätspotenzial systemdienlich zu nutzen, also zur Balance von Angebot und Nachfrage bei gleichzeitiger Beachtung von (lokalen) Netzrestriktionen, bedarf es der Vernetzung und Koordination der Akteure auf dezentraler Ebene.

Hierfür sollte zum einen die Systemgrenze des dezentralen Energiemanagements erweitert werden, sodass beispielsweise externe Anreizsignale bei der Fahrplanoptimierung mitberücksichtigt werden können. Zum anderen werden als Pendant auf Quartiers-ebene geeignete (ökonomische) Anreiz- und Koordinierungsmechanismen benötigt, die die lokalen Akteure zu netzdienlichem Verhalten stimulieren und deren Beitrag zu einem effizienteren Betrieb des Gesamtsystems dann auch entsprechend entlohnen.

Systemdienliche Fahrplangestaltung

Im Rahmen des Forschungsprojekts ENsource [10] wurde dieses Prinzip auf Basis eines zweistufigen Energiemanagement Ansatzes untersucht [11]. Mit

der Prämisse, Komplexität zu reduzieren und auf dezentraler Ebene einen hohen Grad an Handlungsautonomie zu wahren, wurden die flexiblen, dezentralen Einheiten innerhalb eines Quartiers über Preissignale zu einer koordinierten Fahrplangestaltung angereizt. Im Ergebnis konnten das Erzeugungsdargebot an erneuerbaren Energien besser genutzt, gleichzeitig lokale Leistungsbeschränkungen besser eingehalten und die Gesamtenergiekosten reduziert werden.

Bottom-up Versorgungsmodelle

Der Einsatz von neuen bottom-up Modellen ermöglicht die Analyse, welche Versorgungssysteme regional ökologisch und ökonomisch optimal in Wohngebäuden eingesetzt werden [12]. Dazu werden basierend auf den Zensusdaten und einer räumlichen Aggregation Typgebäude ermittelt, für welche parallel die kostenoptimale Wahl aus Effizienzmaßnahmen und des Betriebs verfügbarer Versorgungstechnologien bestimmt werden. Die erhaltenen Optimierungsergebnisse werden abschließend in einer räumlichen Verteilung abgebildet, um die netzseitigen Nachfragen und Belastungen zu bestimmen.

Die ersten wesentlichen Ergebnisse sind, dass eine Steigerung der Gebäudeeffizienz essentiell ist und Wärmepumpen und Photovoltaik die wichtigsten

Technologien zur Erreichung eines treibhausgasneutralen Gebäudebestandes darstellen. Im kostenoptimalen Optimierungsergebnis ist dabei ein massiver Eigenverbrauch an Photovoltaikstrom möglich, der für Deutschland über 90 TWh/a liegt. Wärmepumpen und Photovoltaik werden allerdings die saisonale Variation der Nachfrage signifikant erhöhen. Zum Ausgleich können jedoch flexible KWK-Technologien eingesetzt werden. Während diese in urbanen Gebieten kosteneffizient sein können, sind sie in ruralen Gebieten ökonomisch schwer abbildbar, weshalb sich dort bedingt durch die Elektrifizierung der Wärme die Spitzenlast im Netz verdoppeln kann. Durch Anreize in der KWK-Förderung kann hierbei die Kosteneffizienz zwischen verstärktem Netzausbau und Einsatz von KWK-Technologien verschoben werden und so als effektiver Hebel identifiziert werden.

Zusammenfassung

Abschließend ist festzustellen, dass ohne weitere Anstrengungen zur Verbesserung der CO₂-Bilanz im Gebäudebereich die Zielstellung „klimaneutraler Gebäudebestand“ nicht erreicht werden wird. Wie in anderen Bereichen ist auch an dieser Stelle das Verfolgen von Nachhaltigkeit bestehend aus Suffizienz, Effizienz und Konsistenz zielführend. Mit dem Klimaschutzgesetz ist die Politik einen Schritt in die richtige Richtung gegangen, wenngleich die CO₂-Bepreisung in der geplanten Höhe von 10 Euro/tCO₂ als zu zaghafte Maßnahme zu bewerten ist.

Die gute Nachricht ist, dass bereits eine Vielzahl technologischer Lösungen existiert, die allerdings auch gefördert und umgesetzt werden sollte. Dabei ist auch die gleichzeitige Weiterentwicklung neuer Innovationen essentiell, um eine höhere Akzeptanz, eine höhere Sanierungsrate und einen geringeren Reboundeffekt zu verwirklichen. Die Mitnahme und das Informieren der Bürger sind von hoher Wichtigkeit. Die Digitalisierung spielt hierbei eine große Rolle, um Zusammenhänge verständlich zu machen, Potenziale zu erschließen und die Sektorenkopplung zu ermöglichen. Dabei ist auf einen hohen Standard im Datenschutz zu achten.

Literaturverzeichnis

- [1] BMWi, „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“, 2010.
- [2] N. Thamling, M. Pehnt und J. Kirchner, „Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude“, IWU, ifeu, PROGNOSE, Berlin, Heidelberg, Darmstadt, 2015.
- [3] T. Hesse, V. Bürger, B. Fries und B. Schломann, „Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 – Gebäudesektor und Stromverbrauch Privathaushalte“, Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI, Freiburg, 2016.
- [4] P. Singhal und J. Stede, „Wärmemonitor 2018: Steigender Heizenergiebedarf, Sanierungsrate sollte höher sein“, DIW-Wochenbericht, Bd. 86, Nr. 36, pp. 619–628, 2019.
- [5] Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI), „Faktencheck: Gebäudeenergieeffizienz“, Berlin, 2013.
- [6] S. Weismann, „Demonstration von Energieeffizienz und des Einsatzes erneuerbarer Energieträger am Neubau eines innovativen Forschungsgebäudes: DEENIF; Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben; Laufzeit: 01.08.2010 – 28.02.2014“, Würzburg, 2014.
- [7] S. Weismann, D. Büttner, B. Chhugani, H.-P. Ebert, U. Heinemann, S. Hippeli, R. Kastner, D. Kranl, W. Körner, F. Klinker, M. Reim, M. Vornberger und H. Weinläder, „Betriebsoptimierung, Monitoring, Entwicklung von interdisziplinären Steuerungs- und Regelungskonzepten und Forschungsbetrieb an innovativen Anlagen und Komponenten eines Forschungs- und Demonstrationsgebäudes (MoniResearch)“, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Würzburg, 2019.
- [8] M. Jordan, V. Lenz, M. Millinger, K. Oehmichen und D. Thrän, „Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach“, Energy, p. 116194, 2019.
- [9] Boston Consulting Group GmbH; PROGNOSE, „Klimapfade für Deutschland“, Bundesverband der deutschen Wirtschaft, 2018.
- [10] ENsource, Projekt, gefördert durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg und den Europäischen Fonds für regionale Entwicklungen (EFRE), Aktenzeichen: FEIH_ZAFH_562822.
- [11] R. Rongstock, D. Pfeiffer, A. Toradmal, H. Frank, J. Binder, M. Becker, B. Thomas und C. Widmann, „District energy system optimisation and communication: a two-level approach“, in 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, 2018.
- [12] L. Kotzur, P. Markewitz, M. Robinius, G. Cardoso, P. Stenzel, M. Heleno und D. Stolten, „Bottom-up energy supply optimization of a national building stock“, Energy and Buildings, 2020.

Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien Standorte der FVEE-Mitgliedseinrichtungen



FVEE-Geschäftsstelle

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE) • Renewable Energy Research Association
 Büro Berlin-Mitte: Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 • 10178 Berlin • Tel.: 030 288-7565-71
 Büro Berlin-Adlershof: Kekuléstr. 7 • 12489 Berlin • Tel.: 030 8062-17138
 E-Mail: fvee@helmholtz-berlin.de • www.fvee.de

Mitgliedseinrichtungen und Ansprechpartner



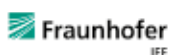
DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
www.dbfz.de
 Torgauer Str. 116 • 04347 Leipzig
 Paul Trainer: Tel. 0341/2434-437
paul.trainer@dbfz.de



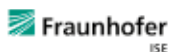
DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft
www.dlr.de
 Zentrum Köln-Porz • 51170 Köln
 Simon Neuenhöfer: Tel. 02203/601-3610
simon.neuenhoefer@dlr.de
 Standort Stuttgart
 Pfaffenwaldring 38-40 • 70569 Stuttgart
 DLR-Projektteam auf der
PSA Plataforma Solar de Almería
 Apartado 39 • E-04200 Tabernas (Almería)



Forschungszentrum Jülich
www.fz-juelich.de
 52425 Jülich
 Dr. Michael Czyperk: Tel. 02461/61-5450
info@fz-juelich.de



Fraunhofer IEE
 Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik
www.iee.fraunhofer.de
 Königstor 59 • 34119 Kassel
 Uwe Kregel: Tel. 0561/7294-319
uwe.kregel@iee.fraunhofer.de



Fraunhofer ISE
 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
www.ise.fraunhofer.de
 Heidenhofstraße 2 • 79110 Freiburg
 Karin Schneider: Tel. 0761/4588-5147
karin.schneider@ise.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP
 Walter-Hülse-Straße 1 • 06120 Halle
 Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM
 Am St.-Niclas-Schacht 13 • 09599 Freiberg
 Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen
 Auf der Reihe 2 • 45884 Gelsenkirchen



Fraunhofer IWES
 Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
www.iwes.fraunhofer.de
 Am Seedeich 45 • 27572 Bremerhaven
 Britta Rollert: Tel. 0471/14290-220
info@iwes.fraunhofer.de



GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam
 Deutsches GeoForschungsZentrum
www.gfz-potsdam.de
 Telegrafenberg • 14473 Potsdam
 Josef Zens: Tel. 0331/2880-1049
josef.zens@gfz-potsdam.de



HZB Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
www.helmholtz-berlin.de
 Lise-Meitner-Campus
 Hahn-Meitner-Platz 1 • 14109 Berlin-Wannsee
 Dr. Ina Helms: Tel. 030/8062-42034
info@helmholtz-berlin.de
 Wilhelm-Conrad-Röntgen-Campus
 Albert-Einstein-Straße 15 • 12489 Berlin-Adlershof
 Institut für Silizium-Photovoltaik
 Kekuléstraße 5 • 12489 Berlin-Adlershof
 PVcomB
 Schwarzschildstraße 3 • 12489 Berlin-Adlershof



ISFH Institut für Solarenergieforschung GmbH
 Hameln/Emmerthal
www.isfh.de
 Am Ohrberg 1 • 31860 Emmerthal
 Dr. Roland Goslich: Tel. 05151/999-302
info@isfh.de



IZES gGmbH
 Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme
www.izes.de/
 Altenkesseler Straße 17 • 66115 Saarbrücken
 Michaela Schlichter: Tel. 0681/844 972-73
schlichter@izes.de



KIT Karlsruher Institut für Technologie
<http://www.kit.edu>
 Kaiserstraße 12 • 76131 Karlsruhe
 Monika Landgraf: Tel. 0721/608-48126
info@kit.edu



UFZ – Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
www.ufz.de
 Permoserstraße 15 • 04318 Leipzig
 Doris Wolst: Tel. 0341/235-1269
info@ufz.de



Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
www.wupperinst.org
 Döppersberg 19 • 42103 Wuppertal
 Christin Hasken: Tel. 0202/2492-187
info@wupperinst.org



ZAE Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.
www.zae-bayern.de
 Anja Matern: Tel. 0931/70564-352
anja.matern@zae-bayern.de
 Standort Garching
 Walther-Meißner-Straße 6 • 85748 Garching
 Standort Würzburg
 Magdalene-Schoch-Straße 3 • 97074 Würzburg
 Standort Erlangen
 Immerwahrstraße 2 • 91058 Erlangen
 Standort Nürnberg
 Fürther Straße 250 • 90429 Nürnberg
 Standort Hof
 Unterkotzauer Weg 25 • 95028 Hof



ZSW Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden Württemberg
 Gemeinnützige Stiftung
www.zsw-bw.de
 Meitnerstraße 1 • 70563 Stuttgart
 Claudia Brusdeylins: Tel. 0711/7870-278
info@zsw-bw.de
 Standort Ulm
 Helmholtzstraße 8 • 89081 Ulm

Impressum

Themen 2019

Energy Research for Future – Forschung für die Herausforderungen der Energiewende

Herausgeber

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE)

Renewable Energy Research Association

Büro Berlin-Mitte: Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 • 10178 Berlin • Tel.: 030 288-7565-71

Büro Berlin-Adlershof: Kekuléstr. 7 • 12489 Berlin

E-Mail: fvee@helmholtz-berlin.de • www.fvee.de

Redaktion

Petra Szczepanski

Franziska Wunschick

Förderung

Die vorliegende Publikation wurde durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) gefördert (FKZ 22012518).

Die Mitgliedseinrichtungen des ForschungsVerbunds Erneuerbare Energien werden durch diese Ministerien gefördert:

- BMWi
- BMBF
- BMU
- BMEL
- BMVI

Layout, Grafik

Sunbeam GmbH

www.sunbeam-communications.com

Druck

Elbe Druckerei Wittenberg GmbH

Berlin, April 2020

ISSN • 0939-7582