

# FVEE-Themen



## Innovationen für die Energiewende

Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2017



Veranstalter



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

Schirmherrschaft und  
Förderung



FVEE • Themen 2017

# Forschung für die Energiewende – Die Gestaltung des Energiesystems

## Jahrestagung 2017

des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien

8. und 9. November 2017

Umweltforum Berlin • Pufendorfstr. 11 • 10249 Berlin

## Wissenschaftliche Leitung

Prof. Frank Baur • IZES

Prof. Dr. Manfred Fishedick • Wuppertal Institut

## Programmkomitee

DBFZ	• Dr. Nora Szarka
DLR	• Dr. Jacob Schmiedt
Fraunhofer ISE	• Gerhard Stryi-Hipp
Fraunhofer IWES	• Prof. Dr. Kurt Rohrig
GFZ	• Prof. Dr. Ernst Huenges
HZB	• Prof. Dr. Rutger Schlatmann
ISFH	• Dr. Raphael Niepelt
IZES gGmbH	• Juri Horst
FZ Jülich	• Dr. Stefan Haas
KIT	• Prof. Dr. Joachim Knebel
UFZ	• Prof. Dr. Erik Gawel
Wuppertal Institut	• Dr. Peter Viebahn
ZAE Bayern	• Dr. Hans-Peter Ebert
ZSW	• Maike Schmidt • Simon Schwarz



Veranstalter



Schirmherrschaft und  
Förderung

Diese Publikation wurde vom BMWi gefördert (Förderkennzeichen 0325829).  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

## ■ Einführung

### 5 Innovationen für die Energiewende

*Prof. Frank Baur • IZES*

*Prof. Dr. Manfred Fishedick • Wuppertal Institut*

## ■ Zentrale Entwicklungen des Energiesystems und Innovationsherausforderungen

### BMW Leitprojekt „Trends und Perspektiven der Energieforschung“

#### 6 Teilprojekt A „Technologien für die Energiewende“: Status und Perspektiven, Innovations- und Marktpotenziale – eine multikriterielle vergleichende Technologieanalyse und -bewertung

*Dr. Peter Viebahn • Wuppertal Institut*

#### 9 Teilprojekt B „EnFo-2030“: Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende

*Prof. Dr. Ulrich Wagner • Technische Universität München*

#### 12 Kopernikus-Projekte für die Energiewende: Ein Überblick

*Prof. Dr. Joachim Knebel • KIT*

## ■ Innovationsbedarfe für das Energiesystem

#### 15 Überlegungen zur Optimierung eines integrierten Energiesystems

*Prof. Dr. Hans-Martin Henning • Fraunhofer ISE*

#### 19 Entscheidungsunterstützung bei Investitionen in innovative, umsetzungsnahe Projekte

*Prof. Dr. Martin Wietschel • Fraunhofer ISI*

#### 23 Raumwirkungen innovativer Konzepte und Technologien

*Prof. Dr. Erik Gawel • UFZ*

## ■ Innovationsbedarfe für Energieeffizienz

#### 28 Energie- und ressourceneffiziente Gebäude – Notwendigkeit, Chance und Herausforderung

*Dr. Hans-Peter Ebert • ZAE*

#### 34 Industrielle Abwärme zur Stromerzeugung: Potenziale und Forschungsbedarf

*Patrick Hoffmann • IZES*

#### 38 Low-Carbon-Industrie: Elektrifizierung und geschlossene Kohlenstoffkreisläufe

*Clemens Schneider • Wuppertal Institut*

## ■ Innovationsbedarfe für Energietransport und -speicher

#### 49 Power-to-X: Technologien für Übermorgen?!

*Simon Schwarz • ZSW*

#### 53 Stromspeicher im Energiesystem der Zukunft

*Maike Schmidt • ZSW*

## ■ Innovationsbedarfe für erneuerbare Energien

### 58 Innovationsbedarfe für Bioenergieanwendungen

*Martin Dotzauer • DBFZ*

### 61 Entwicklungen der Windenergie – wo stehen wir?

*Berthold Hahn • Fraunhofer IEE*

*Dr. Sarina Keller • DLR*

### 67 Forschung und Entwicklung in der Silizium-Photovoltaik: heute und morgen

*Dr. Andreas Bett • Fraunhofer ISE*

### 74 Dünnschichtphotovoltaik – Technologien für die Energiewende

*Dr. Björn Rau • HZB*

### 81 Solare Wärme und Kälte

*Dr. Federico Giovannetti • ISFH*

### 88 Solarthermische Kraftwerke

*Prof. Dr. Robert Pitz-Paal • DLR*

## ■ NREL's Research Activities

### 94 Research for the Transformation of the Global Energy System

*Dr. Martin Keller • National Renewable Energy Laboratory*

## ■ Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien

### 98 Standorte der FVEE-Mitgliedseinrichtungen

### 99 Mitgliedseinrichtungen und Ansprechpartner

### 100 Impressum

# Einführung

## Innovationen für die Energiewende

Die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende braucht eine Vielzahl von Technologien, die unterschiedliche Aufgaben im Energiesystem lösen. In den vergangenen Dekaden wurden dafür vielfältige technische und gesellschaftliche Lösungen entwickelt, die es nun zur Erreichung der globalen und nationalen Ziele in einer insgesamt stimmigen Form umzusetzen gilt. Fehlende Komponenten sind zu ergänzen und Optimierungsprozesse zu implementieren. Technologische Innovationen spielen dabei, unterstützt durch soziale Innovationen, eine zentrale Rolle.

Der FVEE hat mit seiner Jahrestagung 2017 einen Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand und die Perspektiven in den für die Energiewende relevanten Technologiebereichen gegeben. Der vorliegende Tagungsband fasst die Ergebnisse der Konferenz zusammen.

### Forschung für Innovationen und Technologiemarkte

Vorhandene Technologien müssen – aufbauend auf den in den letzten Jahren schon erreichten Fortschritten – noch effizienter und – aus einer gesamtwirtschaftlichen Sicht – kostengünstiger werden. Für einige Problemstellungen sind sogar völlig neue Lösungsansätze erforderlich. Der Umbau der Energiesysteme schafft dabei einen gewaltigen Zukunftsmarkt. Damit deutsche Unternehmen im Wettbewerb erfolgreich sind und ihre Potenziale ausschöpfen können, brauchen sie innovative Produkte. Forschung und Entwicklung liefern die Grundlagen für die besten Innovationen.

### Impulse für die Entwicklung des neuen Energieforschungsprogramms

Die Bundesregierung wird 2018 das 7. Energieforschungsprogramm veröffentlichen, das im Einklang mit den übergeordneten politischen Zielsetzungen stehen soll. Dafür ist eine systematische Neubewertung der verschiedenen Technologien sowie ihres potenziellen Beitrags zur Energiewende notwendig. Mehrere Forschungsprojekte untersuchen systematisch, welche Potenziale die einzelnen Energietechnologien haben und welche Innovationsbedarfe es gibt.

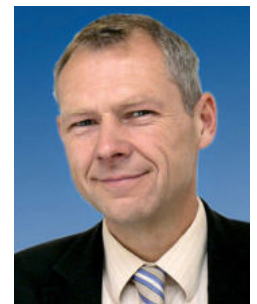
Wesentliche Inputs trägt das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie initiierte strategische Leitprojekt „Trends und Perspektiven der Energieforschung“ bei. Das Leitprojekt gliedert sich in zwei Teilprojekte, von denen ausgewählte Ergebnisse in diesem Tagungsband präsentiert werden.

### Dank

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



*Prof. Frank Baur*  
Wissenschaftliche Tagungsleitung  
IZES  
baur@izes.de



*Prof. Dr. Manfred Fischedick*  
Wissenschaftliche Tagungsleitung  
Wuppertal Institut für Klima,  
Umwelt, Energie  
manfred.fischedick@  
wupperinst.org

# Strategisches Leitprojekt des BMWi „Trends und Perspektiven der Energieforschung“

## Teilprojekt A „Technologien für die Energiewende“: Status und Perspektiven, Innovations- und Marktpotenziale – eine multikriterielle vergleichende Technologieanalyse und -bewertung



*Wuppertal Institut  
Dr. Peter Viebahn  
peter.viebahn@wupperinst.org  
Ole Soukup  
ole.soukup@wupperinst.org*

*Prof. Dr. Manfred Fischedick  
manfred.fischedick@  
wupperinst.org*

*IZES  
Juri Horst  
horst@izes.de*

In dem Forschungsprojekt „Technologien für die Energiewende“ (TF\_Energiewende) bewertet ein Konsortium von drei Verbundpartnern und zehn Technologiepartnern unter der Federführung des Wuppertal Instituts seit Herbst 2016 den mittelfristigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf für die zentralen Technologien, die im Rahmen der Energiewende derzeit und zukünftig benötigt werden.

► Weitere Informationen bietet die Projekt-Website <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/626/>.

Die Ergebnisse dieses vom Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) als Teil des strategischen Leitprojekts „Trends und Perspektiven der Energieforschung“ geförderten Projektes gehen als zentraler wissenschaftlicher Input in die Diskussion des 7. Energieforschungsprogramms (EFP) der Bundesregierung ein. Das neue EFP soll im zweiten Halbjahr 2018 verabschiedet werden und dabei die ambitionierten Ziele der deutschen Energiewende vor dem Hintergrund internationaler Verpflichtungen („Paris-Agreement“) berücksichtigen. Hierzu bedarf es einer systematischen Neubewertung und Aktualisierung hinsichtlich des Entwicklungsstatus und der Perspektiven der verschiedensten Technologien sowie ihres potenziellen Beitrags zur Energiewende. Dabei ist neben der erhöhten Komplexität im Energiesystem mit einer Vielzahl von Wechselwirkungen auch eine Vielfalt an gesellschaftspolitischen Zielsetzungen zu berücksichtigen (z. B. Klimaschutz, gesellschaftliche Akzeptanz, Exportpotenzial oder Innovationstreiber).

Das EFP wird daher in einem breiten Konsultationsprozesses unter Federführung des BMWi vorbereitet. So werden neben TF\_Energiewende und einem weiteren Teilprojekt unter der Leitung der TU München („EnFo-2030“) auch die Bundesländer, die BMWi-Forschungsnetzwerke Energie, die Energiewende-Plattform Forschung & Innovation und weitere Bundesressorts beteiligt.

► Informationen zum Beteiligungsprozess finden sich auf der Website [www.energieforschung.de](http://www.energieforschung.de) des Projektträgers Jülich.

### Technologiefelder

Innerhalb des Projektes TF\_Energiewende werden 31 Technologiefelder analysiert, die sechs Technologiebereiche sowie integrative Aspekte umfassen:

#### 1 Erneuerbare Energien

- 1.1 Biomasse
- 1.2 Tiefengeothermie
- 1.3 Photovoltaik
- 1.4 Solare Wärme und Kälte
- 1.5 Solarthermische Kraftwerke
- 1.6 Windenergie mit Exkurs Meeresenergie
- 1.7 Umweltwärme

#### 2 Konventionelle Kraftwerke

- 2.1 Zentrale Großkraftwerke
- 2.2.a Dezentrale Kraftwerke (Brennstoffzellen)
- 2.2.b Dezentrale Kraftwerke (Motoren und Turbinen)
- 2.3 CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Lagerung (CCS)
- 2.4 CO<sub>2</sub>-Nutzung

#### 3 Infrastruktur

- 3.1 Stromtransport und -verteilung
- 3.2 Wärmetransport und -verteilung
- 3.3.a Energiespeicher (elektrisch und elektrochemisch)
- 3.3.b Energiespeicher (thermisch, thermochemisch und mechanisch)
- 3.4. Nutzung von Erdgas- und Erdölinfrastruktur und Raffinerien für strombasierte Brennstoffe (\*)

#### 4 Technologien für die Sektorkopplung (PtX)

- 4.1 Power-to-gas (Wasserstoff)
- 4.2.a Power-to-gas (Methanisierung chemisch-katalytisch)
- 4.2.b Power-to-gas (Methanisierung biologisch)
- 4.2 Power-to-liquids/chemicals
- 4.3 Verfahren der CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus Faulgasen und Umgebungsluft (\*)

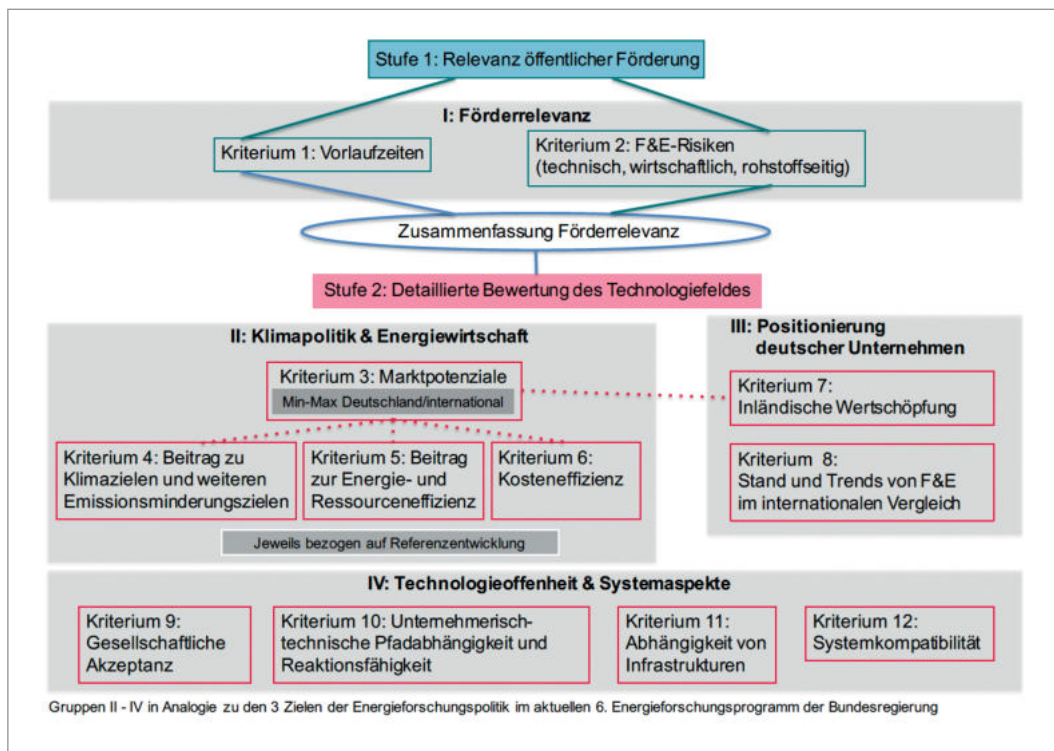


Abbildung 1

Übersicht über die 12 Bewertungskriterien

- 5 **Energie- und Ressourceneffizienz Gebäude**
- 5.1 Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik
- 6 **Energie- und Ressourceneffizienz in der Industrie**
- 6.1 Energieeffiziente Prozesstechnologien
- 6.2 Energieeffiziente Querschnittstechnologien
- 6.3 Technologien zur Abwärmenutzung
- 6.4 Low-carbon- und ressourceneffiziente Industrie
- 7 **Integrative Aspekte**
- 7.1 Elektromobilität – PKW und leichte Nutzfahrzeuge
- 7.2 Elektromobilität – Hybrid-Oberleitungs-LKW
- 7.3 Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK)
- 7.4 Systemintegration, -transformation und -innovation (\*)

### Multikriterielle Bewertung

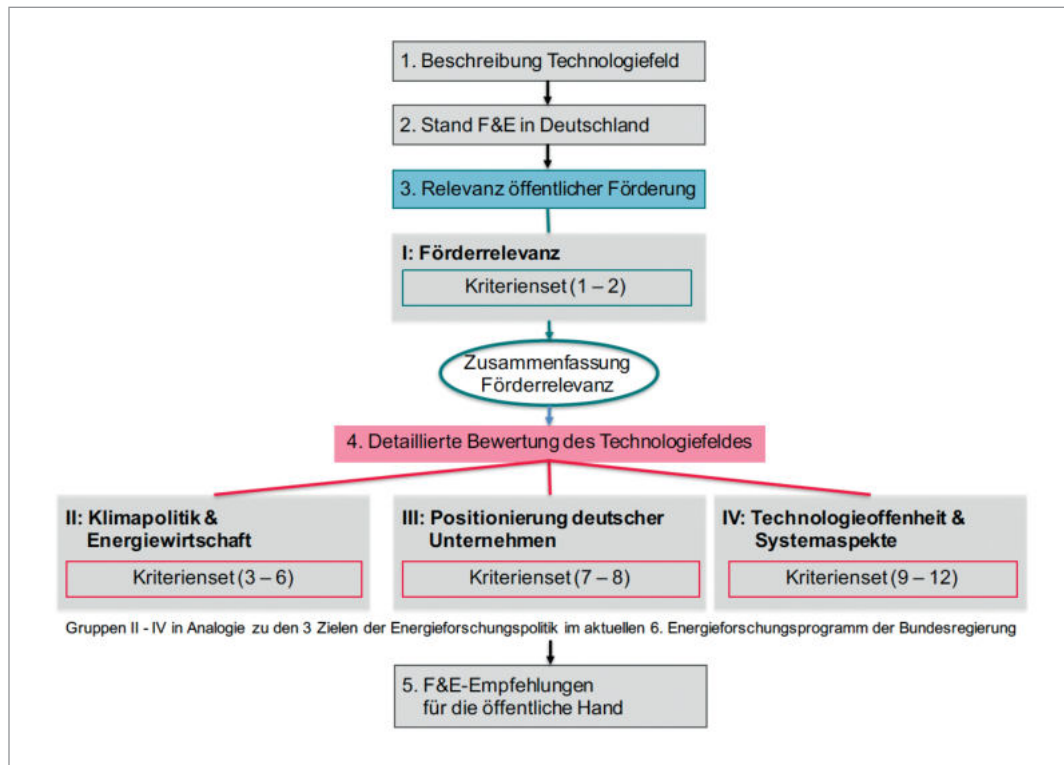
In die Analyse des F&E-Bedarfs fließt eine multikriterielle Bewertung ein. Jedes Technologiefeld wird mit 12 Bewertungskriterien evaluiert, die nach dem klimapolitischen und energiewirtschaftlichen Beitrag der jeweiligen Technologien, der Positionierung deutscher Unternehmen sowie nach Technologieoffenheit und Systemaspekten fragen. Unter die Kriterien fallen beispielsweise die wirtschaftlichen Potenziale, die Treibhausgasminderungswirkung, die gesellschaftliche Akzeptanz oder der Stand von F&E im internationalen Vergleich (► *Abbildung 1*). Auf diese Weise wird gewährleistet, dass die Förderung von Forschung und Entwicklung im Einklang mit übergeordneten politischen Zielsetzungen erfolgt.

Die Ergebnisse aller Technologiefelder werden in umfangreichen Technologieberichten dokumentiert. Jeder Technologiebericht ist nach dem in ► *Abbildung 2* gezeigten Muster aufgebaut.

Die Technologieberichte für 28 der 31 Technologiefelder wurden am 15. Dezember 2017 veröffentlicht. ► siehe [www.energieforschung.de](http://www.energieforschung.de)

Die in der obigen Auflistung mit (\*) markierten Technologiefelder folgen im März 2018. Der Gesamtbericht und ein gekürzter „Politikbericht“ werden Ende April 2018 veröffentlicht werden.

Abbildung 2  
**Aufbau der  
 Technologieberichte**



Ergänzend zur Technologiebewertung wird in TF\_Energiewende zudem eine multikriterielle, transparente und für Entscheider handhabbare Methode entwickelt, um transparente Entscheidungen über vielversprechende Pilot- und Demonstrationsvorhaben in der anwendungsnahen Forschung sowie Modellvorhaben außerhalb dieser zu ermöglichen. Der methodische Ansatz wird beispielhaft an existierenden Projekten getestet (▶ siehe Vortrag von Prof. Martin Wietschel in diesem Tagungsband).



# Strategisches Leitprojekt des BMWi „Trends und Perspektiven der Energieforschung“

## Teilprojekt B „EnFo-2030“:

### Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende

Das 6. Energieforschungsprogramm (EFP) wurde 2011 auf das damalige Energiekonzept der Bundesregierung zugeschnitten und hat seinerzeit wichtige Leitplanken zur Gestaltung der beginnenden Energiewende gesetzt. Es wurden neue strategische Wege in allen Handlungsfeldern besprochen, mit einer großen Bandbreite der förderfähigen Technologien. Nach sechs Jahren Energiewende haben sich wesentliche Änderungen der technischen, wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen ergeben, die im 6. EFP nicht vorhersehbar waren und bei einer Neuauflage berücksichtigt werden müssen.

Einen Ausgangspunkt für die Analyse und Bewertung der Ergebnisse stellt das in ► **Abbildung 1** gezeigte Diagramm dar. Mit Hilfe des dargestellten Status quo und der von der Bundesregierung gesetzten Ziele für einzelne Sektoren im Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Emissionen soll der nötige Handlungsbe-

darf hinsichtlich der zukünftigen Energieforschung identifiziert und diskutiert werden.

Das Teilprojekt „EnFo-2030 – Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende“ des strategischen Leitprojekts des Bundeswirtschaftsministeriums soll in einer Top-Down-Analyse ausgehend von einer sektoralen Betrachtung der Ziele der Energiewende mögliche Eckpunkte für die zukünftige Energieforschung erarbeiten.

Es läuft parallel zu einem weiteren Teilprojekt „Technologien für die Energiewende“, welches in einem Bottom-Up-Ansatz die verfügbaren Technologien und mögliche technische oder ökonomische Verbesserungen erfasst (► **Abbildung 2** und den vorhergehenden Artikel in diesem Band).

Der Schwerpunkt des laufenden Forschungsprojekts „EnFo-2030“ ist die Methodenentwicklung zur



TUM Technische Universität München  
Prof. Dr. Ulrich Wagner  
uwagner@tum.de

Patrick Wimmer  
patrick.wimmer@tum.de

Thomas Zipperle  
thomas.zipperle@tum.de

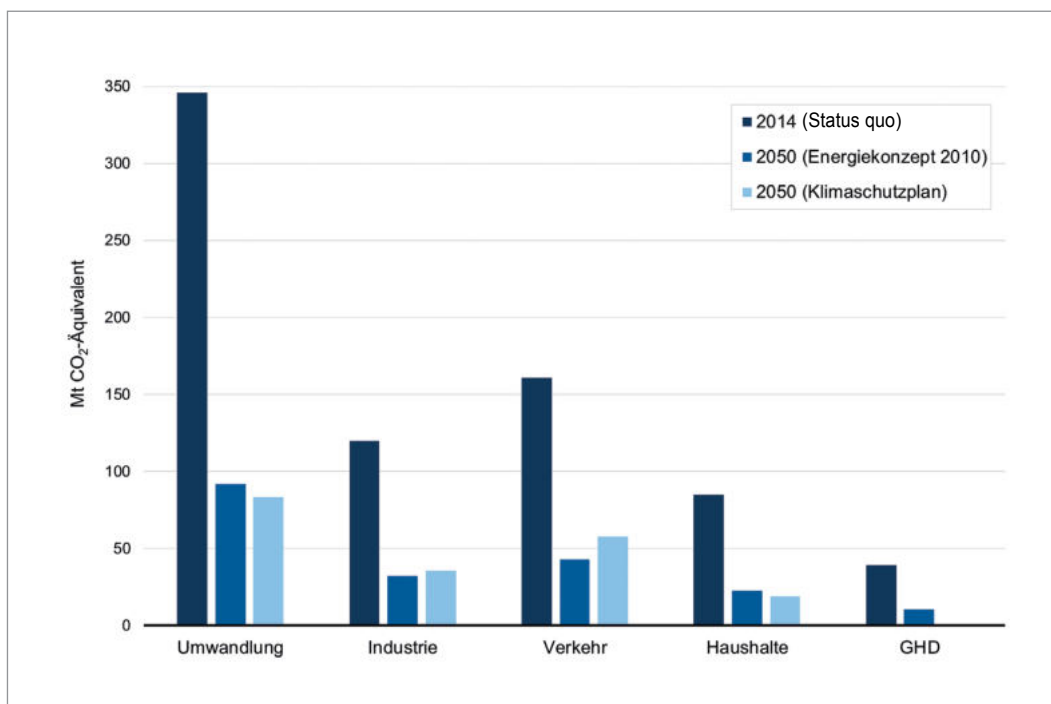
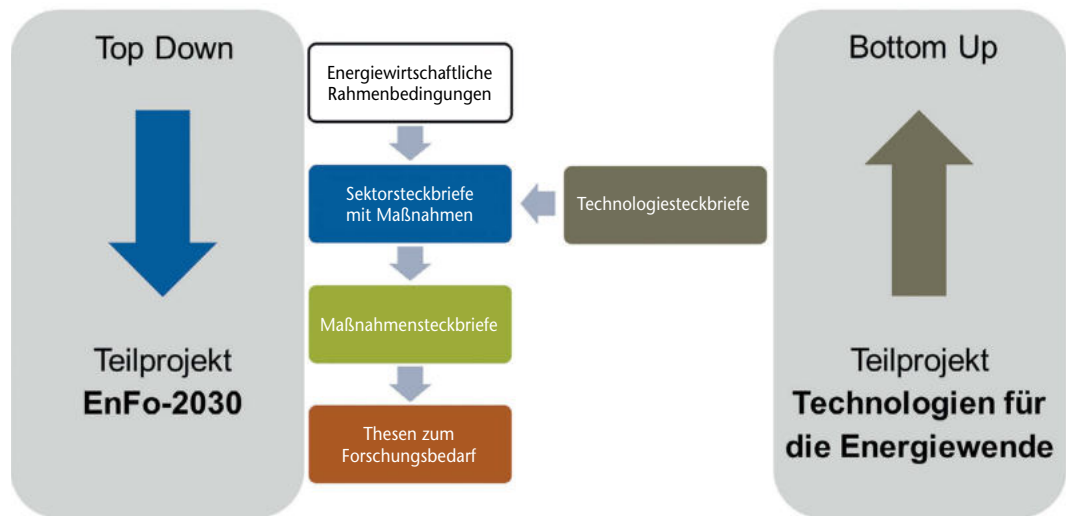


Abbildung 1

Status quo und Ziele 2050 für Treibhausgas-Emissionen

Quellen [1-3]

Abbildung 2  
EnFo-2030  
im Rahmen  
des strategischen  
Leitprojekts



Bestimmung von Thesen für die Energieforschung (► *Abbildung 3*).

In diesem Projekt erfolgt eine Analyse der technischen, ökonomischen, politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen der Energiewirtschaft. Diese werden an veränderten Rahmenbedingungen seit Beginn der Energiewende gespiegelt und bilden somit das Fundament der weiteren Betrachtung.

### Steckbriefe

Die wesentlichen Bestandteile der Methodik sind die blau gefärbten Felder, die einerseits die sektorspezifischen Steckbriefe darstellen und dabei den Energiebereitstellungssektor und die vier Verbrauchersektoren Industrie, Haushalte, GHD (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) und Verkehr beinhalten.

Andererseits gehen die sektorübergreifenden Steckbriefe auf Themenstellungen ein, die sich nicht in einem der genannten Sektoren einordnen lassen. Darin werden Fragestellungen rund um Geschäftsmodelle, Digitalisierung, Akzeptanz und Nachfrageverhalten sowie regulatorischer Rahmen in der Energiewirtschaft thematisiert, die sich zusätzlich zu den Dekarbonisierungsmaßnahmen in den Sektoren als Treiber für die Energiewende identifizieren lassen. Außerdem werden auch Flexibilitätsoptionen für das zukünftige Energieversorgungssystem, unter anderem Speicher und Netze, behandelt.

Die Steckbriefe beinhalten die Herausforderung des jeweiligen Themengebiets zur Erreichung der Energie- und Klimaziele und weisen darauf aufbauend den relevanten Forschungsbedarf für das zukünftige Energiesystem aus.

### Abgleich

Der Abgleich des identifizierten Forschungsbedarfs mit dem 6. EFP erfolgt in zwei Teilen, jeweils sektorspezifisch in den Sektorsteckbriefen sowie in einer übergreifenden Expertise.

### Maßnahmensteckbriefe

In den Maßnahmensteckbriefen (in grün dargestellt) wird der Forschungsbedarf aus den oben genannten Steckbriefen wie folgt kategorisiert:

- Energienachfrage
- Energiebereitstellung
- Querschnittsthemen

Durch diese Kategorisierung erlangt man eine Umgruppierung nach Handlungsfeldern, was einen Perspektivenwechsel darstellt und zu einer weiteren Top-Down-Betrachtung führt, die über die sektorale Sichtweise hinausgeht. Diese Handlungsfelder beschreiben vor allem die Anpassungsmöglichkeiten der Energieeffizienz, Brenn- und Kraftstoffsubstitution und Elektrifizierung, die eine Dekarbonisierung des Energieversorgungssystems im Sinne der vorgegebenen Ziele ermöglichen.

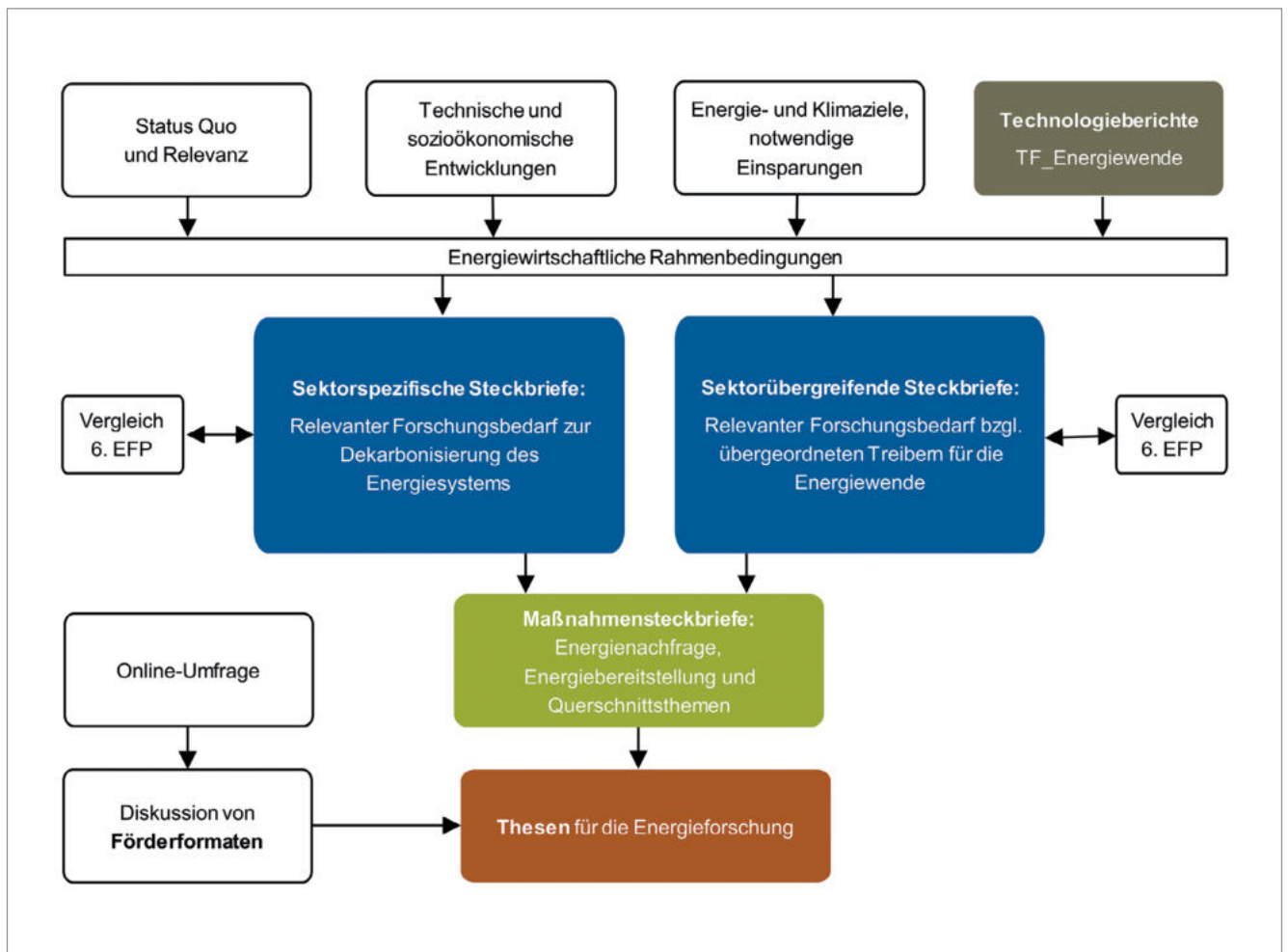


Abbildung 3  
**Methodik**  
zur Bestimmung  
von Thesen für die  
Energieforschung

## Thesen

Die aus den Maßnahmensteckbriefen abgeleiteten Thesen (in orange) bilden das zentrale Ergebnis dieses Forschungsprojekts. Die Thesen beschreiben in kurzen Worten den Status quo, den Handlungsbedarf aus Sicht der Energiewende sowie Handlungsoptionen mit Blick auf die Energieforschung. In den Thesen werden zudem die Förderformate der Energieforschung adressiert, unter anderem mit Hilfe der Online-Umfrage, welche im Rahmen des strategischen Leitprojekts durchgeführt wurde.

## Quellen

- [1] Entwicklung der energiebedingten Treibhausgas-Emissionen nach Quellgruppen, Umweltbundesamt, 2017
- [2] Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2010
- [3] Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie, Umweltbundesamt, 2017

# Kopernikus-Projekte für die Energiewende: Ein Überblick



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

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

**Fraunhofer IWES**  
Prof. Dr. Clemens Hoffmann  
clemens.hoffmann@iwes.fraunhofer.de

**ZSW**  
Maike Schmidt  
maike.schmidt@zsw-bw.de

**WI**  
Dr. Johannes Venjakob  
johannes.venjakob@wupperinst.org

**FZJ**  
Prof. Dr. Rüdiger Eichel  
r.eichel@fz-juelich.de

**RWTH Aachen**  
Prof. Dr. Alexander Mitsos  
alexander.mitsos@avt.rwth-aachen.de  
a.mitsos@fz-juelich.de

In den „Kopernikus-Projekten für die Energiewende“ werden gemeinsam von Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft technologische und wirtschaftliche Lösungen für den Umbau des Energiesystems entwickelt. Mit dem Start der Kopernikus-Projekte geht die größte Forschungsinitiative zur Energiewende in vier Schlüsselbereichen in die Umsetzung:

- **ENSURE:** Entwicklung von Stromnetzen
- **P2X:** Speicherung überschüssiger erneuerbarer Energie durch Umwandlung in andere Energieträger
- **SynErgie:** Neuausrichtung von Industrieprozessen auf eine schwankende Energieversorgung
- **ENavi:** verbessertes Zusammenspiel aller Sektoren des Energiesystems

Die Forschungsthemen der vier Kopernikus-Projekte ENSURE, P2X, SynErgie und ENavi wurden in einem umfassenden Beteiligungsprozess von Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft erarbeitet, die hierfür im „Forschungsforum Energiewende“ zusammengearbeitet haben. Dazu wurden mehr als 90 Institutionen und Organisationen aus allen gesellschaftlichen Bereichen eingebunden.

Durch die zehnjährige Ausrichtung der Projekte und die enge Zusammenarbeit mit der Industrie sollen Ergebnisse aus der Grundlagenforschung bis hin zur Anwendung geführt werden. Die Sozialwissenschaftler und Vertreter der Zivilgesellschaft werden in besonderem Maße eingebunden, um Konzepte zu entwickeln, die mit den Erwartungen der Bürgerinnen und Bürger an die Energiewende vereinbar sind.

Das BMBF stellt für die erste, dreijährige Förderphase bis zu 120 Millionen Euro bereit. Bis 2025 sollen weitere 280 Millionen Euro zur Verfügung gestellt werden. Die Kopernikus-Projekte sind Teil des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“.

► <https://www.kopernikus-projekte.de/start>

## Kopernikus-Projekt „Neue Netzstrukturen“: Neue EnergieNetzStruktURen für die Energiewende (ENSURE)

*Ansprechpartner:*

- *Karlsruher Institut für Technologie,  
Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka*

Die im Rahmen der Energiewende ausgegebenen Zielstellungen bis zum Jahr 2050 können nur erreicht werden, wenn die Anzahl und Leistung der installierten Erneuerbare-Energien-Anlagen erheblich zunimmt. Um die Versorgungssicherheit weiterhin gewährleisten zu können, sind weitreichende Veränderungen des Elektrizitätsversorgungssystems erforderlich. Dies beinhaltet sowohl den weiteren Ausbau eines zentralen Energieverteilungssystems, als auch die Schaffung dezentraler Strukturen auf regionaler Ebene. Alle Maßnahmen zur Optimierung der Energieversorgung werden durch die fortschreitende Digitalisierung der gesamten Energiewirtschaft und eine zunehmende Verknüpfung der verschiedenen Sektoren (Strom, Gas, Wärme, Verkehr) begleitet und vorangetrieben.

Die Forschungsarbeiten werden dazu beitragen, die Energiewende wirtschaftlich erfolgreich zu gestalten. Aus den konkreten Vorschlägen des Projektes für zukünftige Strukturen und Betriebsführungsstrategien wird die Leistungsfähigkeit und Effizienz des Gesamtsystems gesteigert, wodurch Kostenreduktionen für die Betreiber als auch für die Endkunden angestrebt werden.

Um die elektrische Energieversorgung an die mit der Energiewende einhergehenden Veränderungen anzupassen, soll eine sinnvolle Struktur aus zentraler und dezentraler Versorgung identifiziert werden. Das Vorhaben ist durch die Untersuchung neuer Systemstrukturen, stabiler Systemführungsmechanismen und der Integration neuer Technologien in das Versorgungssystem in drei Schwerpunkte aufgeteilt. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die anschließende Realisierung und Erprobung des ganzheitlichen Energieversorgungssystems in Form eines großtechnischen Netzdemonstrators. Alle Arbeiten werden durch eine umfassende Analyse der sozioökonomischen Einflüsse begleitet.

Dieser Teil bindet alle Stakeholder inklusive Prosumer ein und flankiert die zuvor genannten Schwerpunktthemen.

► <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/neue-netzstrukturen>

### Kopernikus-Projekt „Power-to-X“: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X)

*Ansprechpartner:*

- RWTH Aachen, Institut für Technische Chemie und Makromolekulare Chemie (ITMC), Lehrstuhl für Technische Chemie und Petrochemie, Prof. Dr. Walter Leitner
- Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung, Grundlagen der Elektrochemie (IEK-9), Prof. Dr. Rüdiger-A. Eichel

„Power-to-X“ bezeichnet Technologien, die Strom aus erneuerbaren Quellen in stoffliche Energiespeicher, Energieträger und energieintensive Chemieprodukte umwandeln. Damit kann Energie aus erneuerbaren Quellen in Form von maßgeschneiderten Kraftstoffen für Kraftfahrzeuge oder in verbesserten Kunststoffen und Chemieprodukten mit hoher Wertschöpfung genutzt werden.

Im Rahmen des Kopernikus-Programms wird nun für dieses komplexe Themenfeld mit dem ausgewählten Projekt „Power-to-X“ (P2X) eine nationale Forschungsplattform aufgebaut.

Mit „Power-to-X“-Technologien wird zunächst Strom aus erneuerbaren Quellen elektrochemisch umgewandelt in stoffliche Ressourcen wie Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid und Synthesegas. Diese stofflichen Ressourcen müssen anschließend effizient gespeichert und verteilt und in die Endprodukte umgewandelt werden. Dafür bedarf es innovativer Lösungen, die im Projekt zu ökologisch, ökonomisch und gesellschaftlich vorteilhaften Prozessen entwickelt werden sollen. Damit trägt „Power-to-X“ zum Ziel der Dekarbonisierung der Energiesysteme bei, das die Bundesregierung mit der Energiewende anstrebt, und verringert gleichzeitig den Anteil fossiler Rohstoffe in den wichtigen Leitmärkten Transport und Verkehr sowie Chemie.

► <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/power-to-x>

### Kopernikus-Projekt „Industrieprozesse“: Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie)

*Ansprechpartner:*

- Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Aufgrund des immer größer werdenden Anteils schwankend einspeisender Stromerzeuger wird ein effizienter Ausgleich zwischen Energie-Angebot und Energiebedarf erforderlich. In Zukunft ist ein ausgewogener Technologiemitmix notwendig zwischen erneuerbaren Energien, flexiblen konventionellen Kraftwerken, Speichern, Netzausbau und flexiblen Nutzern, um die Versorgungssicherheit zu garantieren. Viele dieser Lösungsbausteine sind mit hohen Kosten verbunden, die auf den Nutzer umgelegt werden, und ziehen gesellschaftliche Akzeptanzprobleme nach sich.

Mit insgesamt 44% des Nettostrombedarfs und 25% des Wärmebedarfs in Deutschland weisen Industrieprozesse und insbesondere große Einzelanlagen in energieintensiven Industriebranchen beträchtliche Flexibilisierungshebel auf. Die mittel- und kurzfristige Flexibilisierung der Stromnachfrage, das sogenannte Demand-Side-Management (DSM), bietet eine Chance, den Umbau des Energiesystems kosteneffizient und gesellschaftlich akzeptiert zu ermöglichen.

SynErgie unterstützt die kosteneffiziente Realisierung der Energiewende auf Basis erneuerbarer Energien und befähigt damit Deutschland, sich zum internationalen Leitanbieter für flexible Industrieprozesse zu entwickeln. Die Forschungsarbeiten starten zunächst mit sieben energieintensiven Branchen: Stahl- und Aluminium-Herstellung, chemische Industrie, Maschinen- und Anlagenbau, Papier-, Lebensmittel-, Zement- und Automobilindustrie. Diese vereinigen rund 90 Prozent des industriellen Nettostrombedarfs.

Das Projekt SynErgie betrachtet die energieintensiven Schlüsselproduktionsprozesse, um deren Energiebedarf mit dem schwankenden Angebot erneuerbarer Energie zu synchronisieren. Dafür sollen die konventionellen, monolithischen Automatisierungsstrukturen aufgebrochen und technologisch angepasst werden. Mit Hilfe moderner Ansätze der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) wird eine hochdynamische Steuerplattform geschaffen.

Sie regelt die Energieverteilung zwischen den Industrieprozessen und berücksichtigt dabei das schwankende Energieangebot.

Neben den technischen und wirtschaftlichen Aspekten integriert das Projekt vor allem rechtliche und sozialgesellschaftliche Perspektiven in seine Lösungen. Als Vorbereitung für eine effiziente Umsetzung der Ergebnisse werden die entwickelten Ansätze modellhaft in der „Energieflexiblen Region Augsburg“ demonstriert und anschließend technisch sowie sozio-ökonomisch evaluiert.

► <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/industrieprozesse>

### Kopernikus-Projekt „Systemintegration“: Energiewende-Navigationssystem (ENavi)

*Ansprechpartner:*

- *Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS), Prof. Dr. Ortwin Renn*

Mit der Energiewende hat sich Deutschland zum Ziel gesetzt, das gegenwärtige Energiesystem in ein weitgehend CO<sub>2</sub>-freies und auf erneuerbaren Energien basierendes System zu transformieren. Ein wirtschaftliches, umweltverträgliches, verlässliches und sozialverträgliches Energiesystem benötigt eine ganzheitliche Betrachtung auf Systemebene. ENavi sieht die Energiewende daher als einen gesamtgesellschaftlichen Transformationsprozess und verknüpft wissenschaftliche Analysen mit politisch-gesellschaftlichen Anforderungen.

Das Projekt ENavi verfolgt diese Ziele:

- ein tieferes Verständnis des komplex vernetzten Energiesystems im Energiebereich und den damit verbundenen Bereichen wie Industrie und Konsum zu gewinnen
- Handlungsoptionen aufzuzeigen, wie die Komponenten des zukünftigen Energiesystems unter Berücksichtigung der energiepolitischen Ziele und (u. a. rechtlichen Rahmen-) und Randbedingungen systemisch integriert werden können
- so präzise wie möglich abzuschätzen, welche Folgen eine bestimmte Maßnahme kurz-, mittel- und langfristig auf das Energiesystem haben würde
- im transdisziplinären Diskurs Optionen für wirksame Maßnahmen zu generieren.

Eines der zentralen Produkte des Projekts ist ein Navigationsinstrument, mit dem die Forscher die Wirkungen und Nebenwirkungen von wirtschaftlichen oder politischen Maßnahmen im Voraus abschätzen wollen. Es soll dabei helfen, die entscheidenden Fragen

zu beantworten: Wie kann man dafür sorgen, dass die Energiewende die einkommensschwachen Gruppen in Deutschland nicht zu stark belastet? Mit welchen Maßnahmen kann man effektiv und effizient die Elektromobilität in Deutschland fördern? Oder: Wie können mehrere zehntausend Lieferanten von Solarstrom auf privaten Dächern sinnvoll synchronisiert werden?

Die Analyse von Maßnahmen über verschiedene Modellregionen hinweg unterstützt zusätzlich das bessere Verständnis der Erfolgsfaktoren für den Umbau des Energiesystems.

► <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/systemintegration>

### Anwendungsbeispiele

Für jedes Kopernikus-Projekt wurde ein kurzes Anwendungsbeispiel gezeigt.

- **ENSURE** präsentierte ein Modell für ein Multiterminal Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetz zur Verbindung von Windparks in der Nordsee und Anbindung an die Anrainerstaaten. Gegenüber dem Konzept einer Punkt-zu-Punkt Anbindung jedes einzelnen Windparks ergibt sich eine Ersparnis an Kabellänge von etwa 28%. Zur Systemführung eines solchen Multiterminal Offshore HGÜ-Netzes wurde ein neuartiger clusterbasierter Algorithmus entwickelt.
- Für **P2X** wird das Realisierungsbeispiel für die Prozessintegration einer ultrakompakten, effizienten Anlage zur Synthese von e-Fuels mit CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft, zusammen mit den Projektpartnern Climeworks, sunfire und INERATEC vorgestellt.
- **SynErgie** zeigt für Schlüsselproduktionsprozesse Simulationen zur technischen Machbarkeit und zu den Konsequenzen (vor allem qualitativ und ökonomisch) einer Umstellung auf einen energieflexiblen Betrieb und die erreichbaren Potenziale. Im Bereich der Produktionsinfrastruktur wird eine Übersicht über derzeit technisch mögliche Wandlungen von Endenergieformen als Nachschlagewerk erstellt.
- Im Rahmen von **ENavi** wird mit dem Sektormodell REMOD-D die Entwicklung der Energiewende über alle Sektoren modelliert. Das Modell optimiert unter einer vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Grenze die Energiesystemzusammensetzung in den Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie unter Berücksichtigung verschiedenster Technologien und Kraftstoffe mit einer Zeitauflösung von einer Stunde. Es werden die Grenzen und Auswirkungen der Szenarien untersucht und definiert.

# Überlegungen zur Optimierung eines integrierten Energiesystems

In den vergangenen zwei Jahren hat sich im Rahmen des Projektes „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS)<sup>1</sup> eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe intensiv mit der Frage beschäftigt, wie ein kostenoptimierter Umbau unseres Energiesystems erfolgen kann, mit dem zugleich die politisch gesetzten Klimaschutzziele erreicht werden und bei dem eine hohe Versorgungssicherheit gewährleistet wird. Die Ergebnisse der Arbeiten wurden in einer Stellungnahme<sup>2</sup> und einem Analysepapier<sup>3</sup> zusammengefasst.

Im Fokus der Untersuchungen stand dabei eine Betrachtung des gesamten Energiesystems unter Einbeziehung aller Verbrauchssektoren und aller Energieträger; dabei wurden Fragen der Sektorkopplung ebenso diskutiert wie unterschiedliche Möglichkeiten volkswirtschaftlicher Instrumente, um eine übergreifende und zugleich möglichst technologieoffene Transformation des Energiesystems zu bewirken. Nachfolgend sind einige zentrale Ergebnisse zusammengefasst.

Die deutschen Klimaschutzziele erfordern einen äußerst ambitionierten Umbau des Energieversorgungssystems in wenigen Jahrzehnten. Lösungswege dafür werden nur bei Anwendung einer systemischen Herangehensweise mit einer integrierten

ganzheitlichen Betrachtung des Energiesystems und seiner zukünftigen Entwicklung sichtbar. In den Sektoren Verkehr, Wärme für Gebäude und Wärme für Industrieprozesse können die im Klimaschutzplan festgelegten Ziele nur erreicht werden, wenn eine weitgehende Kopplung mit der Stromerzeugung stattfindet. Zugleich ist eine wesentlich weitergehende Nutzung von nicht planbaren, volatilen erneuerbaren Energien wie Sonne und Wind nur denkbar mit neuen Stromanwendungen, die zuschaltbare Lasten bereitstellen.

Es gibt verschiedene Optionen der Sektorkopplung:

- 1) direkte Stromnutzung in den Sektoren Mobilität und Wärme
- 2) Erzeugung von Wasserstoff mit
  - a) direkter Nutzung als Endenergie
  - b) Weiterkonversion in unterschiedliche Kohlenwasserstoffe zur Verwendung als Chemierohstoffe sowie Brenn- und Kraftstoffe

Eine Analyse möglicher Systementwicklungen auf Basis dieser verschiedenen Sektorkopplungsoptionen führt zu einigen robusten Erkenntnissen hinsichtlich der Systementwicklung:



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

KIT  
 Prof. Dr. Eberhard Umbach (emer.)  
 eberhard.umbach@kit.edu

1 Das durch das BMBF geförderte Projekt „Energiesysteme der Zukunft“ ESYS bündelt Expertise aus der Energieforschung in Deutschland unter dem Dach der Wissenschaftsakademien. Mehr über ESYS im Internet ► <https://energiesysteme-zukunft.de/>

2 „Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende“. Gemeinsame Veröffentlichung von: Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. ISBN: 978-3-8047-3672-6

3 Ausfelder et al. „Sektorkopplung – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems“. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. ISBN: 978-3-9817048-9-1



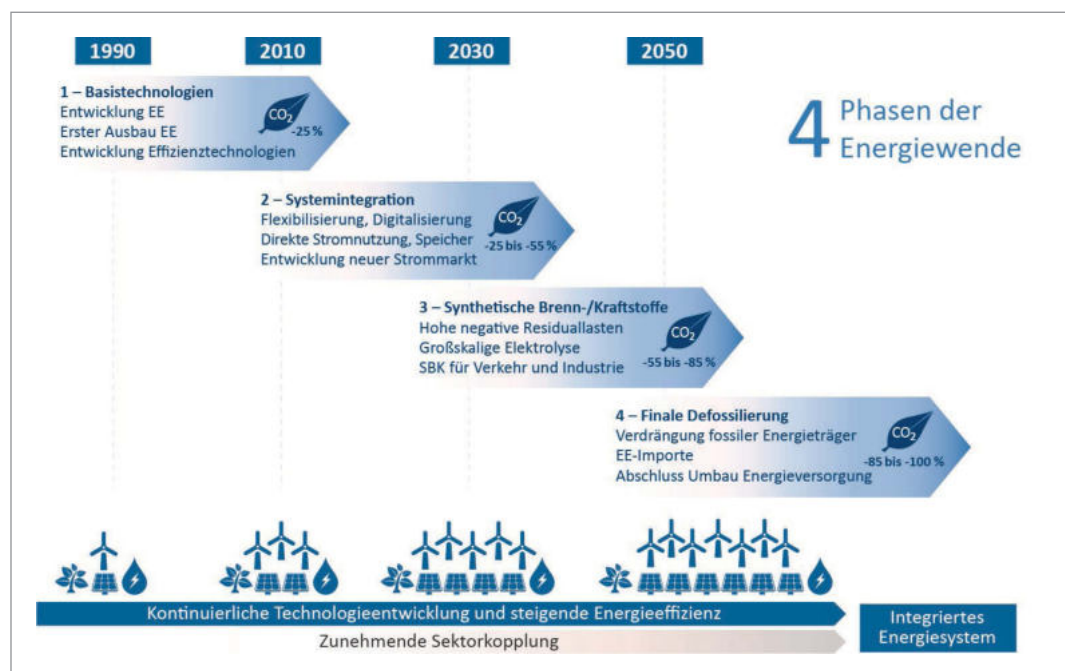
Abbildung 1  
**Entwicklung des Strombedarfs**  
 bei einer Reduktion energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen um jeweils 85%. Dabei wird unterschieden nach Strombedarf für **originäre Stromanwendung** und für Stromanwendungen bei Wärme und Verkehr (**Sektorkopplung**).  
 a) freie Optimierung  
 b) Modellrechnung mit verschiedenen Annahmen, die eine Erreichung der Reduktionsziele wesentlich erleichtern

- Ein **starker Zubau an Anlagen** zur Stromerzeugung aus Sonne und Wind ist unabdingbar, um den insbesondere durch Sektorkopplung aller Voraussicht nach stark steigenden Strombedarf zu decken (► *Abbildung 1*). Sowohl gesellschaftliche Akzeptanzgründe als auch Aspekte der Flächennutzung und des Naturschutzes legen jedoch Systementwicklungen nahe, die diesen Ausbau so gering wie möglich halten.
- **Verbrauchsreduktionen** helfen deutlich bei der Erreichung der Klimaschutzziele, wenn man mit geringeren Mengen an erneuerbaren Energieanlagen auskommen möchte. Sie sind erreichbar durch geändertes Nutzerverhalten oder eine höhere Effizienz auf der Nutzungsseite wie im Fall der energetischen Sanierung von Gebäuden oder durch effizientere Techniken bei der Stromnutzung, etwa LED-Beleuchtungssysteme.
- Auch eine verstärkte Nutzung des gesamten Spektrums erneuerbarer Energien wie **Solarthermie, Geothermie und Biomasse** trägt dazu bei, den notwendigen Ausbau an Wind- und Photovoltaikanlagen zu begrenzen.
- Eine **direkte Nutzung von Strom** sollte überall dort erfolgen, wo diese mit vergleichsweise kleinem Aufwand möglich ist. Dafür spricht eine höhere Effizienz der Wandlungsketten, die mit geringeren Mengen notwendiger Anlagen erneuerbarer Energien und geringeren systemischen Kosten korrespondieren. Dies betrifft insbesondere
  - Wärmepumpen im Bereich der Wärmeversorgung von Gebäuden
  - direkte Nutzung von Strom für industrielle Prozesse
  - Elektrofahrzeuge mit Batteriespeichern
- Die **Erzeugung von Wasserstoff** auf Basis von Elektrolyse mit erneuerbarem Strom ist ab einem gewissen Ausbaugrad der erneuerbaren Energien sinnvoll, um Strom zu nutzen, der ansonsten verworfen werden müsste. Die Auslastung von Elektrolyseanlagen kann dadurch erhöht werden, dass diese auch Strom aus Kurzzeitspeichern wie Pumpspeicherkraftwerken oder Batterien verwenden.
- Für die **Nutzung von Wasserstoff** im Energiesystem gibt es eine Vielzahl von Optionen:
  - direkte Nutzung in industriellen Prozessen, zum Beispiel der Stahlherstellung
  - Nutzung als Kraftstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen
  - Rückverstromung in Brennstoffzellen oder Gasturbinen
  - Weiterkonversion in flüssige oder gasförmige kohlenwasserstoffbasierte Brenn- und Kraftstoffe. Dies erfordert, dass geeignete Kohlenstoffquellen zur Verfügung stehen, wie zum Beispiel CO<sub>2</sub> aus Abgasen von Kraftwerken, die mit fossilen oder biogenen Brennstoffen betrieben werden.

Aus heutiger Sicht können alle denkbaren Optionen für die Anwendung in Deutschland oder als Exporttechnologie für die Anwendung in anderen Regionen eine Rolle spielen und sollten dementsprechend in der Weiterentwicklung unterst tzt werden.

- Trotz des Ausbaus erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung einschließlich der Installation von Kurzzeitspeichern und intelligentem Lastmanagement ist ein **zweiter Kraftwerkspark**

Abbildung 2  
Vier Phasen der Energiewende





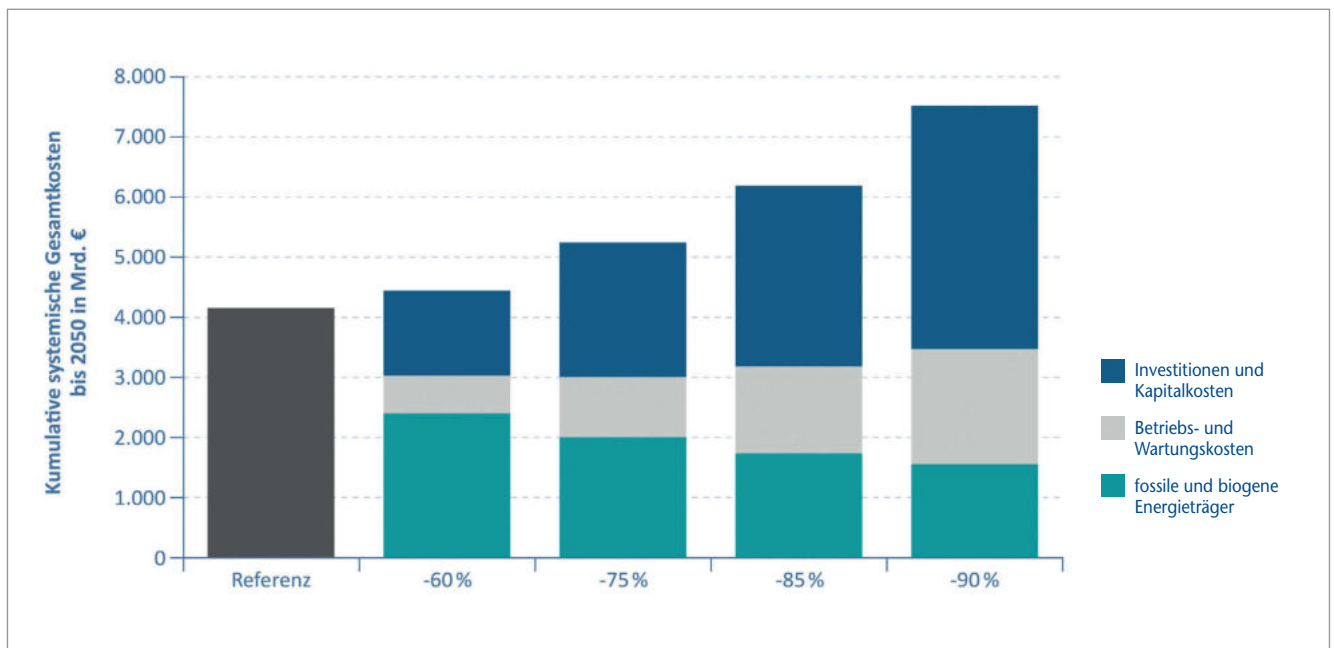


Abbildung 3

**Kumulative systemische Gesamtkosten bis zum Jahr 2050.** Die einzelnen Systementwicklungen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionsziele. Zum Vergleich links eine Referenzentwicklung, bei der die Klimaschutzziele weit verfehlt werden.

notwendig, um eine Versorgungssicherheit zu allen Zeiten – also auch in Phasen sogenannter Dunkelflauten – zu gewährleisten. Dafür ist eine Gesamtleistung notwendig, die in ähnlicher Größenordnung liegt wie die Leistung heutiger konventioneller Kraftwerke.

- Die Analyse der möglichen Transformationspfade legt eine **Entwicklung der Energiewende in vier Hauptphasen** nahe, die jeweils durch wesentliche Strukturmerkmale geprägt sind (► *Abbildung 2*):

- 1) Die erste, im Wesentlichen abgeschlossene Phase war durch die Entwicklung der Basistechnologien sowie einen starken Zubau an Anlagen erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung geprägt.
- 2) Nun folgt eine Phase der umfassenden Systemintegration, in der die Sektorkopplung eine maßgebliche Rolle spielt.
- 3) Es folgt eine dritte Phase, die von einem großskaligen Ausbau von Anlagen zur Herstellung und Nutzung von Wasserstoff geprägt ist.
- 4) Aus heutiger Sicht ist eine vierte Phase, charakterisiert durch die vollständige Verdrängung fossiler Energieträger, für Deutschland nur sinnvoll erreichbar durch Energieträger oder Strom, die in sonnen- und windreichen Zonen hergestellt werden.

## Kostenbetrachtung

Die Energiewende ist kein Selbstläufer, und sie führt in der Phase des Umbaus zu beträchtlichen Mehrkosten im Vergleich zu einem Versorgungssystem, das auch längerfristig überwiegend auf der Nutzung fossiler Energien basiert. Bei aller Unsicherheit, die naturgemäß bei derartig umfänglichen und weitreichenden Entwicklungen gegeben ist, legen unsere Untersuchungen nahe, dass die summarischen Mehrkosten für den Zeitraum bis 2050 je nach Höhe des CO<sub>2</sub>-Reduktionsziels (70 bis 85 Prozent) im Bereich von 1.000 bis 2.000 Milliarden Euro liegen können (► *Abbildung 3*). Dies entspricht im Mittel der nächsten 33 Jahre einem jährlichen Betrag von 30 bis 60 Milliarden Euro und somit rund ein bis zwei Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts des Jahres 2016. Wir halten es für notwendig, solche Zahlen zu nennen, halten es zugleich aber für wichtig, diese im Kontext der Dimension des Projekts Energiewende einzuordnen:

- Ein erheblicher Anteil der genannten Mehrkosten sind **Investitionen in den Umbau** der Energieversorgung auf allen Ebenen und in allen Verbrauchssektoren. Ist der Umbau im Wesentlichen abgeschlossen, reduzieren sich die Investitionen auf Ersatzbeschaffungen, wie sie auch heute erfolgen.
- Die Energiewende ist ein **gesellschaftliches Großprojekt**, das einer Priorisierung von Zielen folgt – nämlich der Erreichung von Emissionsreduktionen klimaschädlicher Spurengase bei unveränderter Versorgungssicherheit zu möglichst

geringen Mehrkosten. Ein vergleichbares gesellschaftliches Großprojekt Deutschlands war die Wiedervereinigung.

- Die angegebenen Werte sind **gesamtsystemische Mehrkosten**. Darin sind weder externe Kosten noch volkswirtschaftliche Effekte wie Schaffung **lokaler Wertschöpfung und Beschäftigungseffekte** berücksichtigt. Auch diese beiden Aspekte sind von großer Bedeutung, sprengen aber den Rahmen unserer Untersuchungen und wären es wert, in einer eigenen Arbeitsgruppe untersucht zu werden.
- Neben einer Nennung der Kosten ist es gleichermaßen wichtig, die **Chancen** zu sehen und zu nutzen, die das Großprojekt Energiewende eröffnet. Gerade für ein Hochtechnologieland wie Deutschland, dessen Wirtschaft stark auf **Technologieexport** baut, scheint es uns von essenzieller Bedeutung, führend an der Entwicklung von Technologien zu partizipieren, denen aller Voraussicht nach weltweit eine wachsende Bedeutung zukommen wird.

### Hauptinstrument CO<sub>2</sub>-Bepreisung

Wie könnte der eingangs formulierte Anspruch einer ganzheitlichen, integrierten Betrachtung des gesamten Energiesystems in einen widerspruchsfreien Handlungsrahmen überführt werden? Aus der Sicht der ESYS-Arbeitsgruppe ist ein wirksamer, übergreifender CO<sub>2</sub>-Preis die zentrale Anforderung, um die Klimaschutzziele kostenoptimiert zu erreichen. *Wirksam* bedeutet dabei, Mindestgrenzen für den Preis von CO<sub>2</sub>-Emissionen festzulegen. Das geschieht heute schon in einigen Ländern wie beispielsweise Großbritannien. *Übergreifend* wird der Preis, wenn er alle Sektoren und Energieträger einschließt.

Allerdings ist wenig gewonnen, wenn ein hohes Preissignal nur in Deutschland besteht und dazu führt, dass energieintensive Prozesse abwandern. Insofern sollte eine internationale, zumindest europäische Einbettung angestrebt werden. Eine Ausweitung des europäischen Handelssystems für Emissionszertifikate auf alle Sektoren wäre eine wünschenswerte Option. Sie ließe sich mit überschaubarem Transaktionsaufwand realisieren, wenn sie bei den primären Anbietern fossiler Energieträger ansetzt.

Eine nationale CO<sub>2</sub>-Steuer, die zugleich andere Steuern auf Energieträger ablöst, wäre eine zweite Option, die entweder ergänzend oder aber alternativ – falls eine europäische Lösung zur Ausweitung des EU-ETS nicht zeitnah gelingt – umgesetzt werden könnte.

Die Etablierung eines Systems, das ein einheitliches Preissignal für CO<sub>2</sub>-Emissionen schafft, scheint uns das wichtigste übergreifende Einzelelement für den zukünftigen Marktrahmen zu sein, da es technologieoffen einheitlich auf das Energiesystem als Ganzes wirkt.

### Weitere Instrumente

In der energiewirtschaftlichen Praxis werden zusätzlich zu einem einheitlichen CO<sub>2</sub>-Preis ergänzende Instrumente benötigt, um Marktversagen zu korrigieren und gegebenenfalls Lock-in-Effekte zu vermeiden. Marktversagen kann beispielsweise durch Informationsdefizite oder durch Differenzen zwischen langfristigem volkswirtschaftlichem Nutzen und kurzfristigen Amortisationserwartungen von Unternehmen und Haushalten auftreten. Zudem können ergänzende Instrumente neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen auch andere externe Kosten (wie lokale Umweltfolgen oder weitere Schadstoffemissionen) berücksichtigen. Zu den unterstützenden Maßnahmen zählen etwa Technologieförderung, Infrastrukturentwicklung oder ordnungsrechtliche Vorgaben (zum Beispiel Grenzwerte, Harmonisierung technischer Standards). Zusätzliche Instrumente sollten daher unter einem *Pr*vorbehalt stehen: Notwendigkeit, Wirksamkeit und Kosten-Nutzen-Verhältnis sollten einer laufenden Evaluierung unterliegen, und die Instrumente sollten offen für Nachjustierungen sein.

# Entscheidungsunterstützung bei Investitionen in innovative, umsetzungsnahe Projekte

## Motivation für ein System zur Entscheidungsunterstützung

Für das Gelingen der Energiewende ist neben dem breiten Einsatz bereits verfügbarer Energietechnologien auch eine kontinuierliche Weiterentwicklung und erfolgreiche Markteinführung neuer energietechnologischer Lösungen notwendig. Während sich die Energieforschungsförderung traditionell auf die Grundlagenforschung und die anwendungsorientierte Forschung konzentriert, steht die Begleitung des Marktübergangs von marktnahen Entwicklungen mit fortgeschrittenem Entwicklungsniveau (ca. Technology Readiness Level 7-9) bislang weniger stark im Fokus des öffentlichen Förderengagements. Innovationsträchtige, marktnahe Entwicklungen laufen so Gefahr, finale Übergangsschritte auf den Markt nicht erfolgreich zu meistern: Sie enden im „Tal des Todes“ (► *Abbildung 1*) zwischen bestehender öffentlicher Projektförderung und erfolgreicher Umsetzung am Markt oder sie benötigen sehr lange für diesen Übergang. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass gerade für letzte Entwicklungs- und Validierungsarbeiten Erprobungen im großen Maßstab notwendig sind. Entsprechende Umsetzungen erfordern durch notwendige Skalierungen erhebliche finanzielle Ressourcen, während der Erfolg der Umsetzung letztlich unsicher bleibt. Entsprechend kann sich die Suche nach privaten Investoren als schwierig erweisen.

Eine Hilfestellung zur Überbrückung des „Tal des Todes“ durch öffentliche Fördermittel für sehr aussichtsreiche Demonstrations- und Modellvorhaben kann dazu beitragen, die Erfolgchancen von Neuentwicklungen zu verbessern und ihren erfolgreichen Marktübergang zu beschleunigen. Allerdings erweist sich die Überprüfung und die Auswahl geeigneter Vorhaben für eine solche Unterstützung aus mehreren Gründen als schwierig:

- Umsetzungen im großen Maßstab binden erhebliche Ressourcen, während verfügbare Mittel begrenzt sind und eine Vielzahl konkurrierender Unterstützungsmöglichkeiten bestehen.
- Staatliches Engagement ist nur angezeigt, wenn von Marktversagen ausgegangen werden kann.
- Öffentliche Mittel müssen möglichst sparsam und effektiv eingesetzt werden. Diesbezügliche Entscheidungen sind nachvollziehbar zu begründen und transparent zu dokumentieren.
- Nationales Engagement muss den Vorgaben des europäischen Beihilferechts folgen.

Um diese Herausforderungen zu überwinden, besteht das Ziel, ein Entscheidungsunterstützungssystem für die Evaluierung innovationsträchtiger, umsetzungsnahe Demonstrations- und Modellvorhaben zu entwickeln.



*Fraunhofer ISI*  
 Prof. Dr. Martin Wietschel  
 martin.wietschel@isi.fraunhofer.de  
 Dr. Simon Hirzel  
 simon.hirzel@isi.fraunhofer.de  
 Dr. Tim Hettesheimer  
 tim.hettesheimer@isi.fraunhofer.de

*IZES*  
 Juri Horst  
 horst@izes.de  
 Patrick Hoffmann  
 hoffmann@izes.de

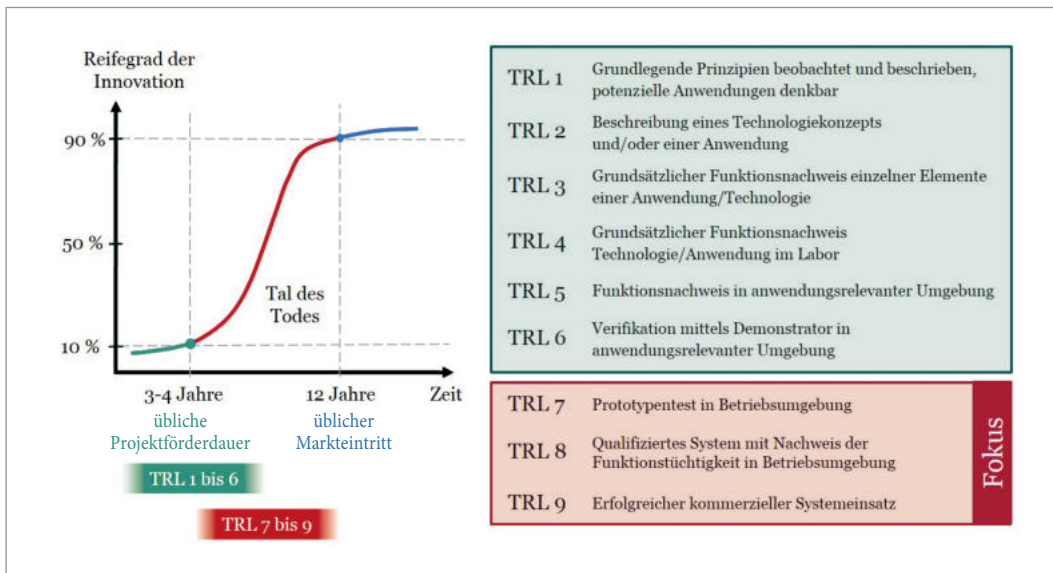


Abbildung 1  
 „Tal des Todes“:  
 Finanzierungslücke für marktnahe Entwicklungen mit fortgeschrittenem Technology Readiness Level (TRL)

Im Folgenden wird ein Vorschlag für ein solches System skizziert und im Anschluss daran werden die daraus resultierenden Implikationen für die Antragsstellung aufgezeigt.

### Aufbau des Systems

Die Philosophie des vorgeschlagenen Systems besteht darin, als Zielgruppe die jeweils mit der Begutachtung betrauten Personen, insbesondere Projektträger und Ministerien, im Gesamtprozess der Bewertung von energietechnologischen Demonstrations- und Modellvorhaben zu unterstützen. Entsprechend soll das System eine Leitlinie bieten, den Gesamtprozess für die jeweiligen Bearbeiter zu vereinfachen. Während es Ermessensspielraum bieten soll, um eigene Erfahrungen und Expertisen einzubringen, soll es seine Nutzer auch dazu veranlassen, eigene Einschätzungen und Positionen zu hinterfragen und erlauben, Vorhaben möglichst einheitlich und personenunabhängig zu betrachten. Das so konzipierte Entscheidungsunterstützungssystem umfasst drei Stufen (► *Abbildung 2*).

Im Folgenden werden die Inhalte der einzelnen Stufen in Kürze umrissen.

#### 1. Filterstufe

In der Filterstufe wird die Relevanz eines Vorhabens für eine Förderung ermittelt. Da in der Filterstufe die Grundvoraussetzungen für eine weitere Erwä-

gung als gefördertes Vorhaben überprüft werden, konzentriert sie sich insbesondere auf die Erfüllung bestimmter Voraussetzungen zur Förderfähigkeit des Vorhabens.

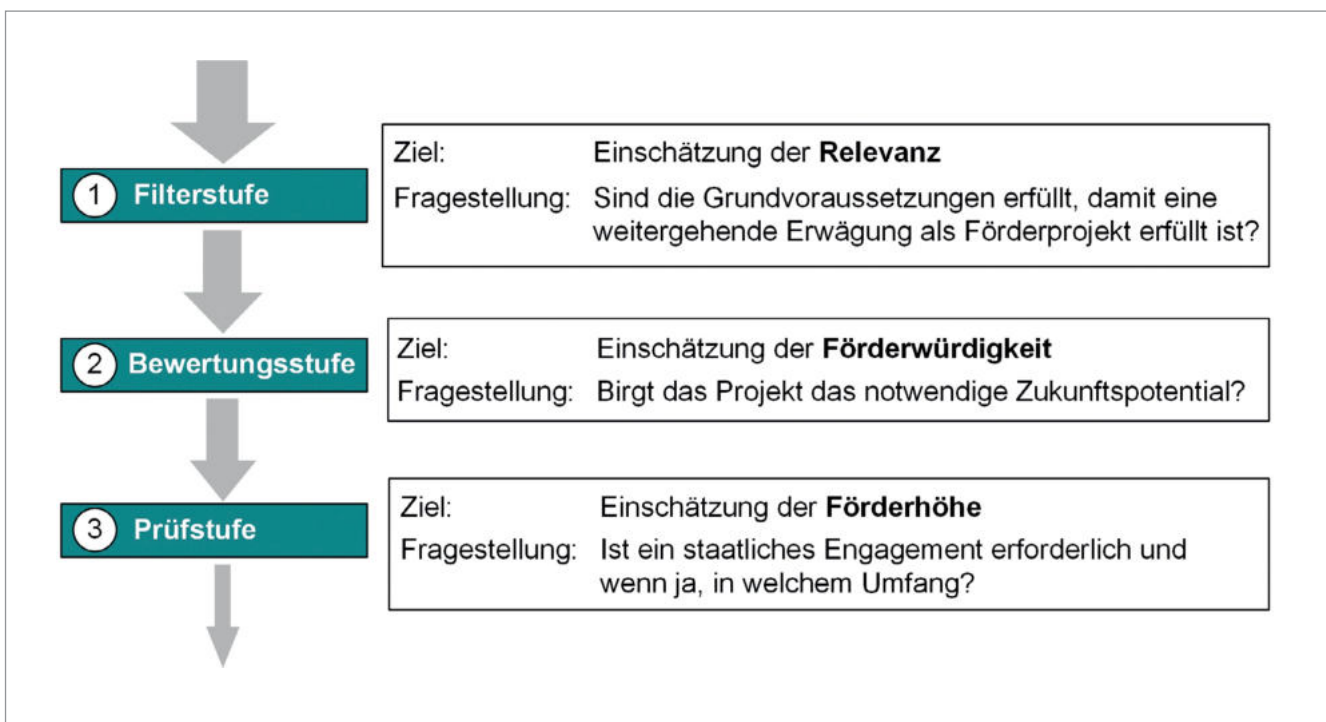
Im Einzelnen umfasst dies zunächst die Einhaltung formaler Kriterien. Hierzu zählt beispielsweise die Vollständigkeit der notwendigen Antragsunterlagen. Daneben wird das Vorhaben mit Blick auf seine innovativen Bestandteile gegliedert und die förderfähigen Mehrkosten werden anhand von Plausibilitätsüberlegungen ermittelt. Dem folgt eine Überprüfung, ob es sich bei dem Vorhaben bzw. seinen Bestandteilen überhaupt um ein Vorhaben handelt, das als marktnahes Demonstrations- bzw. Modellvorhaben einzuordnen wäre. Ferner wird anhand von Leitfragen überprüft, ob prinzipiell ein Marktversagen vorliegt. In einem abschließenden Schritt wird innerhalb der Filterstufe untersucht, ob das Vorhaben mit dem vorhandenen Förderprogramm und dem bestehenden Förderportfolio kompatibel ist.

#### 2. Bewertungsstufe

Hat ein Vorhaben die Filterstufe erfolgreich passiert, wird in der Bewertungsstufe dezidiert analysiert, ob das Vorhaben für eine Förderung würdig ist. Dafür wird eine detaillierte Bewertung des Gesamtvorhabens anhand von sechs Hauptbereichen mit insgesamt 19 Unterkriterien (► *Abbildung 3*) anhand eines Bepunktungsmodells vorgenommen.

Drei der Hauptkriterien („Beitrag zur Erfüllung der energie- und klimapolitischen Vorgaben“, „Stärkung und Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher

Abbildung 2  
Grundstruktur des Entscheidungsunterstützungssystems



Unternehmen“, „Sicherung und Erweiterung der technologischen Entwicklung“) spiegeln die Ziele der Energieforschungspolitik gemäß des 6. Energieforschungsprogramms wider.

Die drei weiteren Hauptkriterien decken inhärente Eigenschaften des Vorhabens („Eignung der Antragssteller“, „Qualität des Vorhabens“, „Risiko des Vorhabens“) ab.

Die jeweils zugehörigen Unterkriterien beleuchten Teilaspekte. Beispielsweise fällt unter das Hauptkriterium „Qualität des Vorhabens“ das Unterkriterium „Qualität und Effektivität des Arbeitsplans“.

Für dieses wie für jedes andere Unterkriterium wird zur Erleichterung der Bewertung eine Liste von Hilfsfragen bereitgestellt. Mit Blick auf die „Qualität des Arbeitsplans“ wird zum Beispiel darauf eingegangen, ob der Arbeitsplan einer logischen und zielführenden Struktur folgt oder ob die zeitliche Gliederung plausibel ist. Aufbauend auf der Beantwortung derartiger Einzelfragen wird eine aggregierte Einordnung des Erfüllungsgrads des Kriteriums auf einer Punkteskala von 0 (Kriterium überhaupt nicht erfüllt) bis 5 (Kriterium auf extrem hohem Niveau erfüllt) vorgenommen.

Durch eine Zusammenführung der Einzelkriterien lässt sich ein Gesamtpunktwert für ein Vorhaben

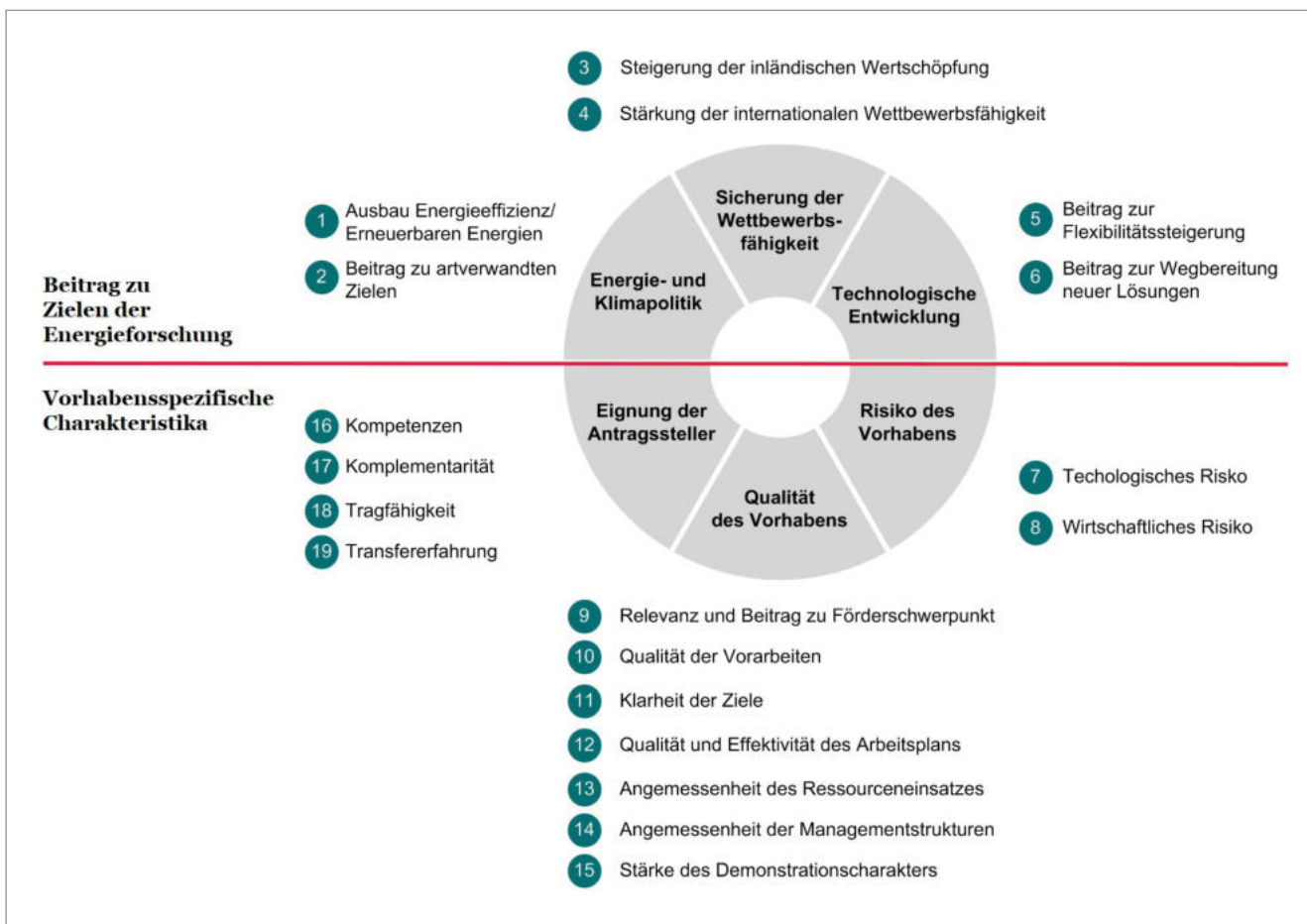
ermitteln und – je nach Situation – anderen Vorhaben oder Mindestwerten gegenüberstellen.

Falls sich die Wichtigkeit von Haupt- und Unterkriterien unterscheiden, lassen sich abweichend von einer Gleichgewichtung auf Ebene der Haupt- oder Unterkriterien auch individuelle Gewichtungen festlegen. Ferner besteht die Möglichkeit, durch Festlegungen von Ausschlussschwellenwerten Kompensationseffekte zu vermeiden, d.h. Ausgleiche zwischen besonders gut und nur mäßig erfüllten Kriterien.

### 3. Prüfstufe

Wurde anhand der vorangehenden Stufen ein Vorhaben als förderwürdig befunden, sind in der Prüfstufe abschließende Abwägungen zur Notwendigkeit öffentlichen Förderengagements zu treffen. Insbesondere sind Überlegungen zum Auftreten von Mitnahmeeffekten vorzunehmen und darüber hinaus Abwägungen zu Förderhöhe und Förderumfang anzustellen. Dabei sind unter Einhaltung des generellen Grundsatzes der Gleichbehandlung Abwägungen zu treffen, welche Mindestförderungen einerseits erforderlich sind, sodass die Förderung für Antragssteller aufgrund der mit einer Förderung verbundenen Pflichten attraktiv bleibt. Andererseits ist anhand bereitgestellter Fließschemata festzustellen,

Abbildung 3  
**Bewertungsstufe:**  
Übersicht der Kriterien



welche maximale Beihilfeintensität für eine Förderung ohne europäisches Notifizierungsverfahren prinzipiell möglich wäre. Anhand dieser und weiterer Überlegungen ist letztlich eine Entscheidung zum staatlichen Engagement zu fällen.

### Implikationen für die Antragsstellung

Aus dem dargestellten Vorgehen ergibt sich eine Reihe von Folgen für Antragssteller für Modell- und Demonstrationsvorhaben:

- Generell ist mit einem strengeren Auswahlprozess als bei etablierten Programmen aus dem Bereich der Grundlagen- und anwendungsorientierten Forschung zu rechnen. Der Fokus einer öffentlichen Unterstützung wird aufgrund des hohen Ressourceneinsatzes auf wenigen, großen Vorhaben liegen.
- Der Nachweis einer hohen Wahrscheinlichkeit für einen späteren erfolgreichen Markteintritt ist besonders wichtig, da nur aussichtsreiche Vorhaben für öffentliches Engagement besonders relevant sind. Gleichzeitig muss nachgewiesen werden, dass überhaupt ein Förderbedarf besteht. Das heißt, es müssen technische und wirtschaftliche Risiken vorliegen, die privates Engagement verhindern, die aber gleichzeitig überwindbar erscheinen.
- Der Mehrwert des Vorhabens muss herausgestellt werden und es muss eine hohe Sichtbarkeit sichergestellt werden, um den späteren Markteintritt zu begünstigen. Entsprechendes kann sich in der Gestaltung eines Konsortiums widerspiegeln, indem neben klassischen Forschungspartnern auch verstärkt Transferexpertise in ein Vorhaben eingebunden wird.
- Und letztlich muss für aussichtsreiche Vorhaben sichergestellt sein, dass sie das Potenzial besitzen, einen wesentlichen Beitrag zu den Kernzielen der Energieforschung zu leisten.

### Schlussbemerkung

Mit dem Entscheidungsunterstützungssystem wurde ein Vorschlag erarbeitet, wie staatliches Engagement gezielt auf besonders aussichtsreiche Vorhaben gelenkt werden könnte. Damit wurde eine Grundlage geschaffen, die Eingang in die Auswahl und die praktische Bewertung künftiger Förderlinien finden könnte.

# Raumwirkungen innovativer Konzepte und Technologien

## 1. Einführung

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

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

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

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

## 2. Monitoring von Raumwirkungen

### 2.1 Der „EE-Monitor“: Naturschutzfachliches Monitoring

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



UFZ

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

Dr. Marcus Eichhorn  
marcus.eichhorn@ufz.de

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

DBFZ

Martin Dotzauer  
martin.dotzauer@dbfz.de

Dr. Volker Lenz  
volker.lenz@dbfz.de

DLR

Dr. Jacob Estevam Schmiedt  
jacob.estevamschmiedt@dlr.de

ISE

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

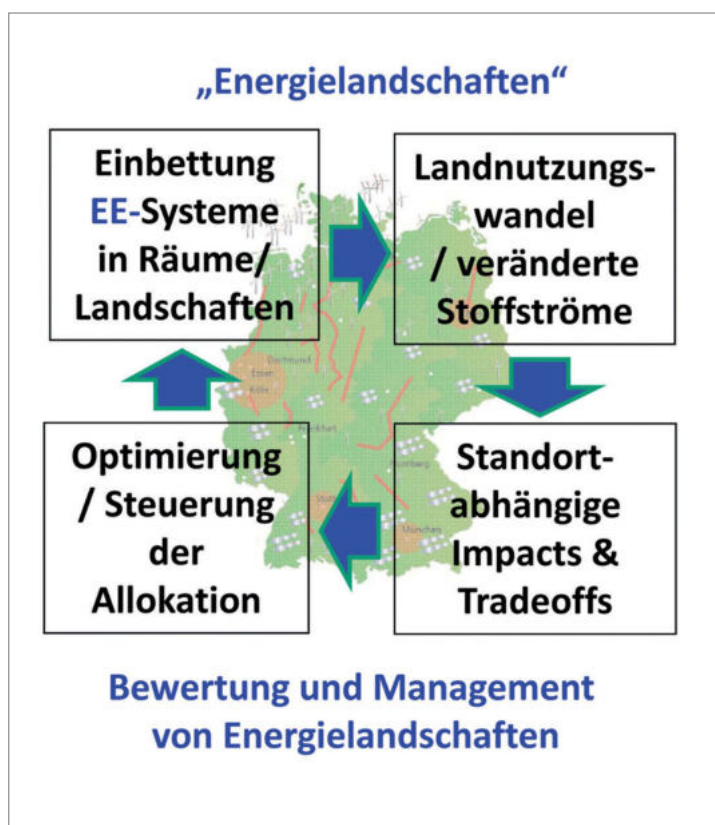
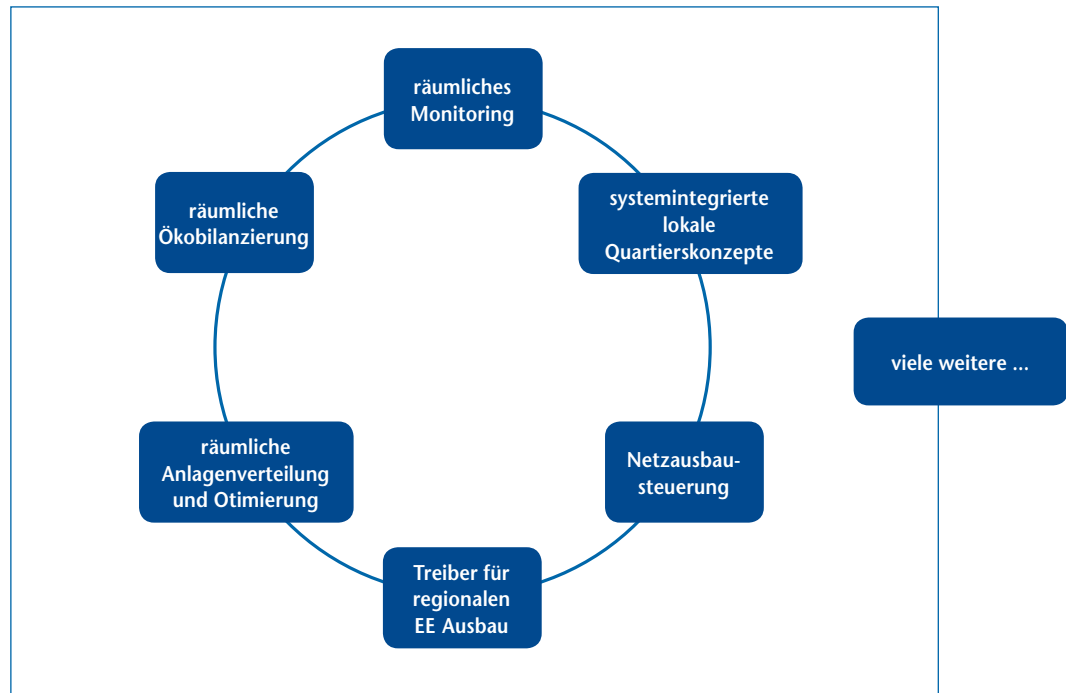


Abbildung 1  
Forschungsthema  
„Energiewälder“

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



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

## 2.2 Regionale und räumliche Ökobilanzierung der Bioenergie (RECLA)

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



### 3. Lokale und regionale Systembeiträge von Biomasse

#### 3.1 Stromnetzstabilisierende lokale erneuerbare Wärme (SmartBiomassHeat)

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

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

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

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

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

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

#### 3.2 Beitrag flexibler Biogasanlagen zur regionalen Entlastung der Verteilnetze

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

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

bestimmten Schwerpunktregionen auf den Verteilnetzausbau aus. Der Netzausbaubedarf kann in diesen Schwerpunktregionen (hoher Anteil flexibler Bioenergieanlagen bei gleichzeitig hoher Leistungsdichte volatiler Anschlussleistung in der Mittelspannung) durch ein intelligentes Einspeisemanagement vermindert werden, indem die Gleichzeitigkeitsfaktoren der Einspeisung verringert und so vorhandene Übertragungskapazitäten effizienter genutzt werden. Dabei ist eine trilaterale Abstimmung zwischen den Anlagenbetreibern flexibler Biogasanlagen, dem Verteilnetzbetreiber und dem zuständigen Direktvermarkter erforderlich, die die gleichzeitige Einspeisung der Biogasanlagen zu Zeiten geringer Nachfrage und hoher volatiler Einspeisung vermeiden. Im Projekt RegioBalance<sup>6</sup> konnte gezeigt werden, dass in ausgewählten Schwerpunktregionen, ein intelligentes Einspeisemanagement den Netzausbaubedarf im Verteilnetz reduzieren kann und die erzielbaren Einsparungen die dem gegenüberstehenden Aufwendungen für Geschäftsprozesse und mögliche Opportunitätskosten durch suboptimale Einsatzplanung deutlich überwiegen.

#### 4. Treiber der Raumallokation

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

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

#### 5. Gebäudetomograph – quartiersweite Gebäudebestandserfassung mit Fernerkundung

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 8. Fazit

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

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

## Quellen

- 1 Thrän, D.; Peters, W.; Kinast, P.; Klenke, R.; Eichhorn, M.; Oehmichen, G.; Erdmann, G. (2018): Wenn die Infrastrukturen für den Klimaschutz Natur und Landschaft durchdringen: Ansätze für ein naturschutzfachliches Monitoring der Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien. *GAI*A, erscheint demnächst.
- 2 O’Keeffe, S.; Wochele-Marx, S.; Thrän, D. (2016): RELCA: a REgional Life Cycle inventory for Assessing bioenergy systems within a region. *Energy, Sustainability and Society* 6 (1), 1-19.
- 3 O’Keeffe, S., Majer, S., Drache, C., Franko, U., Thrän, D. 2017. Modelling biodiesel production within a regional context – A comparison with RED Benchmark. *Renewable Energy* 108, 355-370.
- 4 Lenz, V.; Büchner, D.; Wurdinger, K. (2017): Evaluation of combining an air-to-water heat pump with a wood stove with water jacket for residential heating in Conference Proceedings 12<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference 2017, Rotterdam.
- 5 Verteilernetzstudie: [www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/verteilernetzstudie.html](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/verteilernetzstudie.html)
- 6 Abschlussbericht: [www.energetische-biomasse-nutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB087\\_RBALANCE\\_Endbericht\\_final\\_f%C3%BCr\\_TIB\\_05.12.2016.pdf](http://www.energetische-biomasse-nutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB087_RBALANCE_Endbericht_final_f%C3%BCr_TIB_05.12.2016.pdf)
- 7 Lauf, T.; Ek, K.; Gawel, E.; Lehmann, P.; Söderholm, P. (2018): The Regional Heterogeneity of Wind Power Development: An Empirical Investigation of Land-use Policy in Germany and Sweden, erscheint demnächst.
- 8 Frommholz, D.; Linkiewicz, M.; Meißner, H.; Dahlke, D. (2017): Reconstructing Buildings with Discontinuities and Roof Overhangs from Oblique Aerial Imagery, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives, XLII-1 (W1)*, Hannover.
- 9 Siehe Stryi-Hipp, G.; Eggers, J.-B.; Steingrube, A. (2015): Berechnung zeitlich hochaufgelöster Energieszenarien für eine 100% erneuerbare Energieversorgung der Stadt Frankfurt am Main (KomMod4FFM), Freiburg.
- 10 Vgl. Korte, K.; Gawel, E. (2018): Räumliche Koordination im liberalisierten Strommarkt: angemessene Anreize für die Einspeisung. *Wirtschaftsdienst* 98 (1), 60-67.

# Energie- und ressourceneffiziente Gebäude – Notwendigkeit, Chance und Herausforderung



**ZAE**  
 Dr. Hans-Peter Ebert  
 hans-peter.ebert@zae-bayern.de  
 Dr. Bastian Büttner  
 bastian.buettner@zae-bayern.de  
 Constantin Römer  
 constantin.roemer@zae-bayern.de  
**Fraunhofer IEE**  
 Dr. Michael Krause  
 michael.krause@iee.fraunhofer.de

**IZES**  
 Christoph Schmidt  
 schmidt@izes.de

**DLR**  
 Dr. Jacob Estevam Schmiedt  
 jacob.estevamschmiedt@dlr.de

Die Realisierung eines energieeffizienten Gebäudebestands ist für die Erreichung der in Deutschland gesetzten energie- und klimapolitischen Ziele ein wesentlicher Baustein. Auf diesen Verbrauchssektor entfallen rund 40% des Endenergiebedarfs und ein Drittel aller CO<sub>2</sub>-Emissionen. Ein zentrales Handlungsfeld ist hierbei die energetische Sanierung des Altbaubestands, d.h. derjenigen Gebäude, die vor der 1. Wärmeschutzverordnung (vor 1979) errichtet wurden.

► **Abbildung 1** zeigt den Wohngebäudebestand in Deutschland. Dabei ist für die Gebäude der verschiedenen Bauzeitalter ihr prozentualer Anteil an der Wohnfläche über ihrem prozentualen Anteil am Heizwärmebedarf dargestellt. Erst in den letzten Jahren ist eine Abflachung der Kurve, also eine Verringerung des Heizenergiebedarfs pro beheizter Wohnfläche zu

beobachten, was auf die Anhebung der Effizienzstandards zurückzuführen ist.

Möchte man die Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor bis 2050 um 80% bis 90% gegenüber dem Stand von 1990 reduzieren, wie es die klimapolitische Vorgabe vorsieht, so ist eine Sanierung von 90% des Bestandes mit einer durchschnittlichen Sanierungsrate von ca. 2,5% notwendig. Verbunden wäre diese enorme Anstrengung mit einer inländischen Wertschöpfung von rund 34 Mrd. Euro pro Jahr – im Bereich der Zulieferindustrie, Bauindustrie, Handwerk und Planer.

Der daraus resultierende, mit der Zeit sinkende Endenergiebedarf im Gebäudesektor ist in ► **Abbildung 2** dargestellt. In der Grafik ist auch die jeweilige Zusammensetzung des Energiemixes zu erkennen. Der Anteil der erneuerbaren Energien, vor allem in

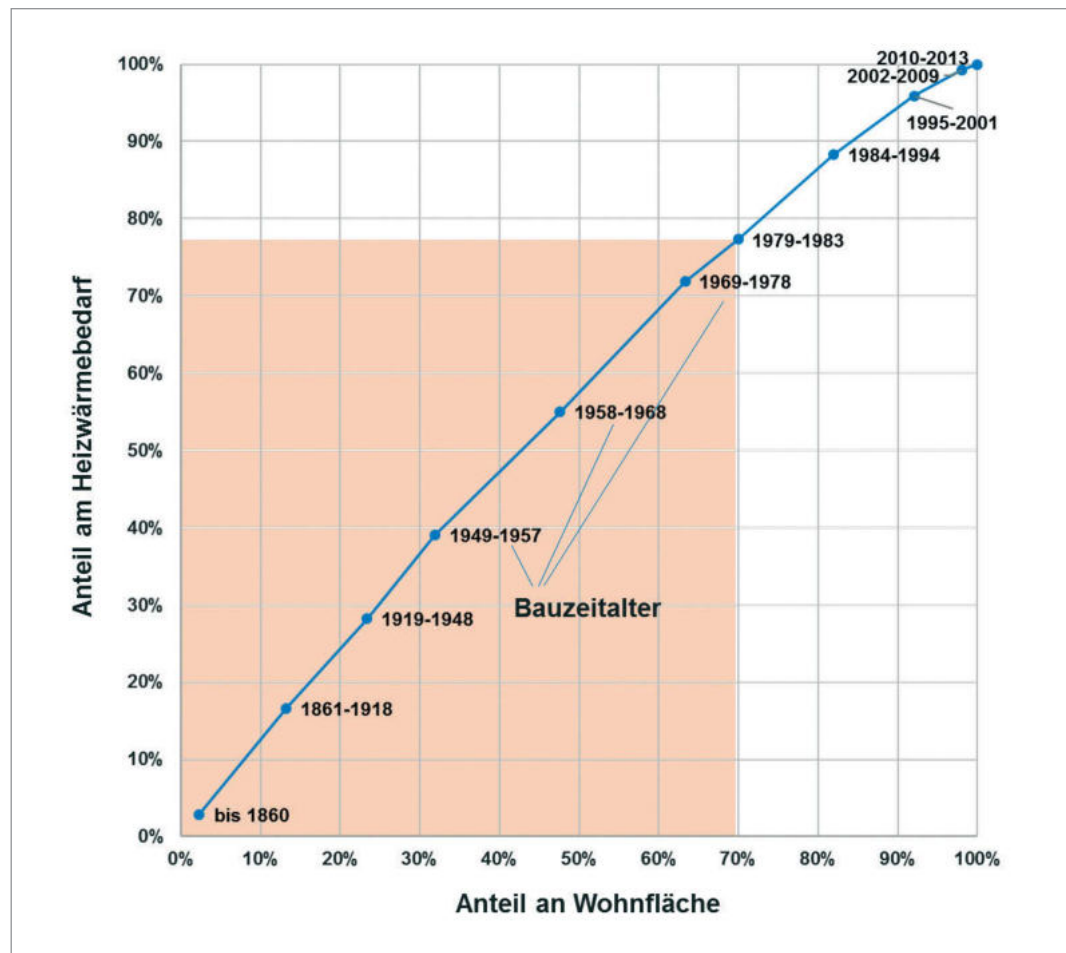


Abbildung 1  
**Energiebedarf nach Bauzeitalter:**  
 Ca. 70% des Wohngebäudebestandes sind für rund 80% des Heizwärmebedarfs in Deutschland verantwortlich (Stand 2013) [1] [2].

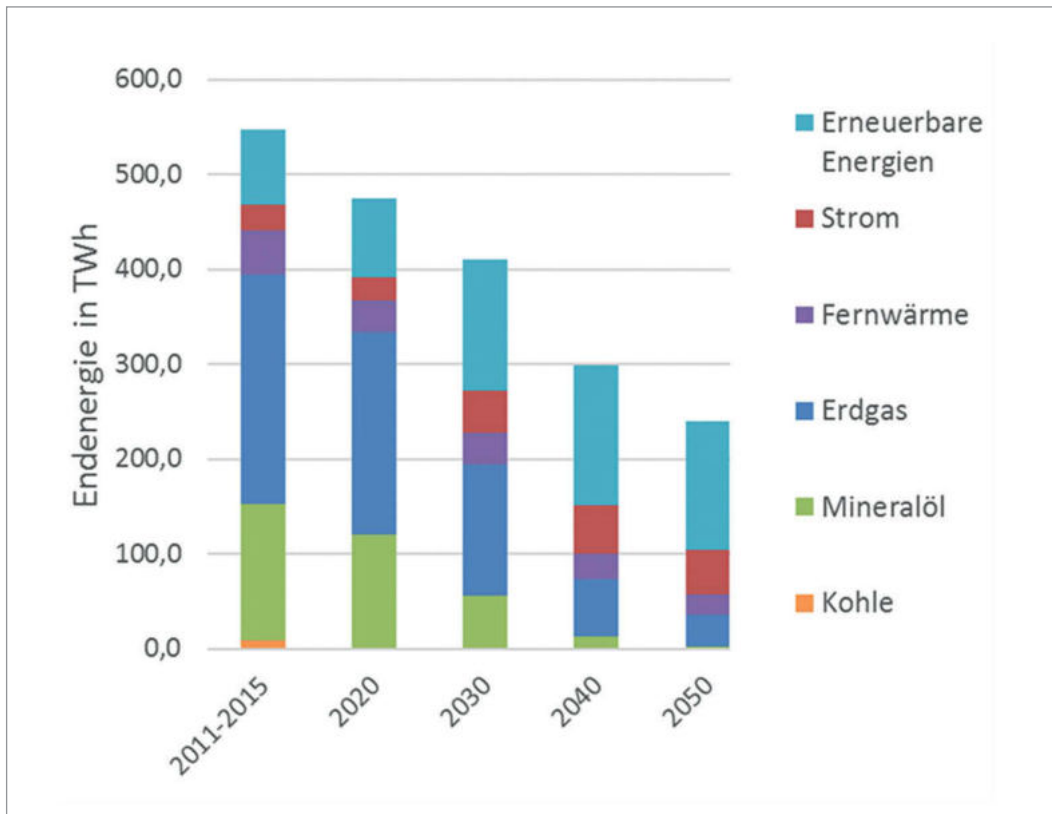


Abbildung 2

**Prognostizierter Endenergiebedarf** nach Energieträgern für den Gebäudebereich zur Erreichung des Klimaschutzenszenario KS80 (80% Reduzierung von Treibhausgasemissionen bezogen auf das Jahr 1990)

Form von Strom, wird hierbei dominieren und den heutigen Anteil von Kohle und Öl vollständig substituieren.

Die Erreichung eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands stellt eine große Herausforderung dar und muss aktuelle Entwicklungen und Trends unserer Gesellschaft und Umwelt berücksichtigen. Neben dem Steigen des Altersdurchschnitts, verbunden mit erhöhtem Heizwärmebedarf, nimmt auch die Wohnfläche pro Person linear zu. Beides sind Effekte, die zusätzlich kompensiert werden müssen. Zudem lässt der heterogene Gebäudebestand gerade für Altbauten die Anwendung von Standardlösungen nur bedingt zu. Die Effizienz von Gebäuden bestimmt sich durch die Qualität der Gebäudehülle, der Bautechnik, z. B. Ausführung und Art der Baukonstruktion und der Gebäudesystemtechnik (Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssysteme, Beleuchtung, Automation). Dabei ist bei innovativen Technologien eine klare Zuordnung zu einem der vorgenannten Bereiche nicht immer möglich. Beispielsweise können Wärmeflüsse über die Gebäudehülle über multifunktionale Komponenten durch die Gebäudeautomation gesteuert und geregelt werden, so dass hier Fassadenkomponenten Teil des Heizungs- und Klimatisierungskonzepts des Gebäudes sind. Letztlich stellen Planung, Erstellung und Betrieb von energie- und ressourceneffizienten Gebäuden oftmals eine

multidisziplinäre Aufgabe dar und erfordert eine ganzheitliche Betrachtung des Gebäudes. Die nachfolgenden Beispiele aus aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der FVEE-Institute sollen dies verdeutlichen.

### Außenliegende Temperierung

Seit 2006 beschäftigt sich die IZES gGmbH mit der Thematik der außenliegenden Wandtemperierung [3] [4]. Das aktuelle Forschungsprojekt LEXU II (FKZ:0327370Y) behandelt als Kernelement die außenliegende Wandtemperierung (aWT), eine Flächentemperierung, die zwischen Bestandswand und einem neuen Wärmedämmverbundsystem aufgebracht wird. Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Projekts ist die außenliegende Lufttemperierung (aLT) [3]. Diese stellt eine niederexergetische Erweiterung der aWT dar, in dem zwischen Bestandswand und Wärmedämmung ein Luftspalt ausgebildet wird. Durch diesen Luftspalt wird Außenluft geführt und anschließend dem Gebäude als temperierte Zuluft zur Verfügung gestellt.

Die Idee der aWT und aLT ermöglicht die Integration einer niederexergetischen Flächentemperierung im Bestand und fördert somit die Integration von erneuerbaren Energien in den Gebäudebestand.



Abbildung 3

**Außenliegende Wandtemperierung (aWT):**

Anbringung der aWT:  
Links: Befestigung der Kapillarrohrmatten auf der Fassadenaußenseite,  
Mitte: Einputzen der Matten  
Rechts: Abschluss mit Wärmedämmverbundsystem

Gleichzeitig eignet sich die aWT und aLT ideal als Niedertemperatur-Wärmesenke für Solarthermie und/oder Wärmepumpe und Niedertemperatur-Abwärme. Die Gebäudestruktur wird thermisch aktiviert und kann als Speicher für Wärme/Kälte nutzbar gemacht werden. Daher handelt es sich bei dem Technologieansatz der aWT und aLT um einen möglichen Baustein für die anstehende Wärmewende.

In 2017 wurde ein Großdemonstrator, der aWT und aLT in Kombination mit einem niederexergetischen Versorgungssystem, bestehend aus Wärmepumpe, Eisspeicher und PVT-Hybridkollektoren beinhaltet, umgesetzt. Bei dem Großdemonstrator handelt es sich um die Westfassade eines Bürogebäudes aus den 70er Jahren. Im Zuge einer Betonsanierung konnte die Fassade mit ca. 140 m<sup>2</sup> der aWT (► *Abbildung 3*) und ca. 6 m<sup>2</sup> der aLT, ausgelegt auf einen hinter der Fassade liegenden Raum, belegt werden. Der Großdemonstrator wird aktuell im Rahmen des Projekts LEXU II über eine Heizperiode und eine Kühlperiode messtechnisch begleitet und ausgewertet. Neben der Begleitung und messtechnischen Erfassung ist auch eine Modellierung des Gesamtsystems und der einzelnen Komponenten in TRNSYS geplant. Für

die beiden Hauptkomponenten (aWT/aLT) konnten bereits geeignete Simulationmöglichkeiten identifiziert und validiert werden [5].

**Multifunktionale Konzepte**

Die traditionelle Gebäudesanierung wird in aller Regel individuell und getrennt nach Gewerken geplant und ausgeführt. Die Berücksichtigung von Multifunktionalität z. B. bei Sanierungssystemen mit hohem Vorfertigungsgrad [6] eröffnet vielversprechende Möglichkeiten um die energetische Sanierung von Gebäuden attraktiver zu gestalten. Multifunktionale Konzepte ermöglichen es dabei, verschiedene Aufgaben wie beispielsweise Dämmung und Lüftung in einem Element zu kombinieren. Die Ausnutzung von Synergien bietet Potenziale zur Kosteneinsparung, stellt aber auch hohe Anforderungen an den Konstruktions- und Bauprozess.

Im Rahmen des Europäischen Forschungsvorhabens „RetroKit – Toolboxes for systemic retrofitting“ [7] wurden an einem viergeschossigen Gebäude der ABG Holding Frankfurt Sanierungssysteme erprobt, bei denen für den Anschluss von zentralen Lüftungsgeräten die Lüftungsleitungen in die Fassade integriert wurden. Bei einem Teil des Gebäudes wurde ein Abluftsystem realisiert, der zweite Teil wurde als Zu-/Abluftsystem mit Wärmerückgewinnung ausgeführt. Die Lüftungstechnik wurde in beiden Fällen im Dachboden installiert.



Abbildung 4

**Multifunktionale Bauteile:**

Energetische Sanierung von 1954 erbauten Häusern in Frankfurt mit vorgefertigten Fassadendämmsystemen bei denen die Lüftungsleitungen in der Dämmebene liegen.

Ergänzend zu den dargestellten Aktivitäten verfolgt das Fraunhofer IEE einen neuen Ansatz, in welchem eine nahezu vollständige energetische Versorgung des Gebäudes über die Fassadensysteme angestrebt

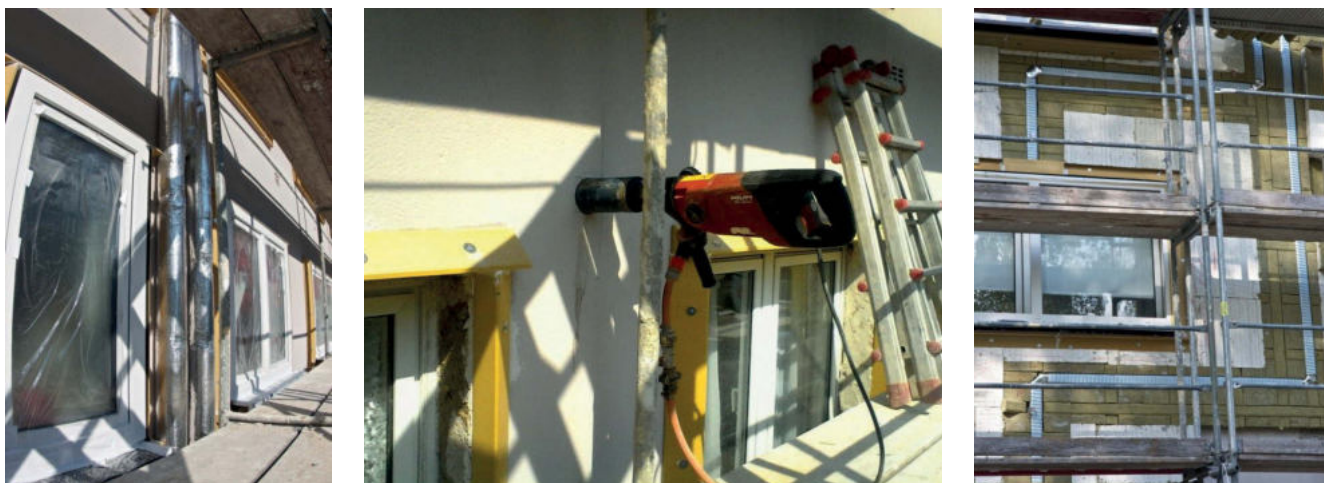


Abbildung 5

**Luftleitung auf der Fassade:**

*Links: Der vertikale Abluftschacht wurde zwischen Küchen- und Badfenster geführt.*

*Mitte: Die dahinter liegenden Räume werden mit einer Kernbohrung angeschlossen.*

*Rechts: Das Lüftungssystem des Zu-/Abluftsystems liegt in einer eingefrästen Dämmlage.*

wird. Ermöglicht werden soll dies durch die Integration von Energieerzeugungssystemen wie PV und Solarthermie (in Form von luftgeführten PVT-Systemen), reversiblen Kleinstwärmepumpen zur Wärme- und Kältebereitstellung, hohen Dämmstandards und Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung sowie die Integration von thermischen und elektrischen Speichern.

Im Rahmen des BMWi-geförderten Verbundprojekts MuFuBisS werden energieeffiziente, multifunktionale mehrschichtige Wandelemente mit Trag-, Wärmespeicher- und Raumklimatisierungsfunktion entwickelt. Dabei kommen unterschiedliche Technologien, neue Werkstoffkombinationen und Fertigungsverfahren zum Einsatz um diese innovativen Fertigbauteile zu realisieren. Ziel ist es, solare Wärme und Umgebungskälte bei Bedarf in Beton einzuspeisen und dort zu speichern. Gleiches gilt für Wärme bzw. Kälte, die über eine Wärmepumpe oder Stromheizung aus überschüssigem Windstrom, mit Zeitversatz zum Bedarf, eingespeichert werden kann (► [Abbildung 7](#)).

Im Zusammenspiel mit schaltbarer Wärmedämmung mit variablem Wärmedurchgang und robuster Metallblechhülle können außenliegende Wände sowohl als Kollektorflächen als auch als Wärme-/Kältespeicher und zudem als großflächiges Heiz-/Kühlelement genutzt werden. Die Wärmedämmung weist im Grundzustand die Dämmwirkung eines Vakuumisulationspanels (VIP) auf. Im wärmeleitenden Zustand erhöht sich der Wärmedurchgang um den Faktor 50 im Gegensatz zum Grundzustand [8] [9]. Aufgrund der hohen Steifigkeit eines solchen Sandwich-Verbundes wird eine ressourcenschonende, schlanke Leichtbauweise mit hohem Vorfertigungsgrad möglich.

**Bestandserfassung und Monitoring**

Das vom BMWi geförderte Projekt „Gebäudetomograph“ verfolgt einen interdisziplinären Ansatz zur Bestandserfassung und zum Monitoring von Gebäuden. Es führt Technologien aus den Bereichen Energieforschung, Fernerkundung und Sicherheitsforschung zusammen, um in kurzer Zeit hochgenaue Informationen über strukturelle und bauphysikalische Eigenschaften von Gebäuden zu gewinnen. Diese Informationen können als Eingangsdaten für eine energetische Gebäudesimulation und zur Ermittlung optimaler Sanierungsmaßnahmen dienen. Einen zentralen Baustein stellt hierbei die Radartechnik dar. Mithilfe von Mikrowellenstrahlung können die einzelnen Schichten in Gebäudewänden aufgelöst werden. Erste Versuche deuten darauf hin, dass unterschiedliche Baumaterialien unterschieden werden können [10]. Darüber hinaus werden im Projekt Ansätze zur quantitativen Bauwerksanalyse mit Infrarot-, Hyperpektral- und Ultraschallsensorik verfolgt und an verschiedenen Versuchsobjekten erprobt.

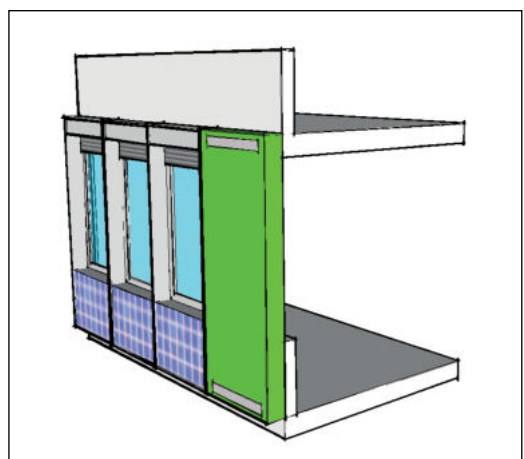


Abbildung 6

**Multifunktionale Fassade:**

*Die zu entwickelnde Modulfassade beinhaltet die Elemente „Energiebedarf senken“, „Energiebedarf decken“, „Energie erzeugen“ und „Energie intelligent speichern und regeln“ (Prinzipskizze).*

Abbildung 7

**Wandaufbau des im Projekt MuFuBisS konzipierten Bauteils:**

Durch eine äußere schaltbare Wärmedämmung (SWD) kann solare Wärme (Winter) oder Umgebungskälte (Sommer) in einer thermischen Speicherschicht aus Beton gespeichert werden. Eine Widerstandsbeheizung temperiert den Betonkern mit Überschussstrom. Wärme bzw. Kälte kann durch eine innere SWD an die Innenräume bei Heiz- oder Kühlbedarf abgegeben werden.

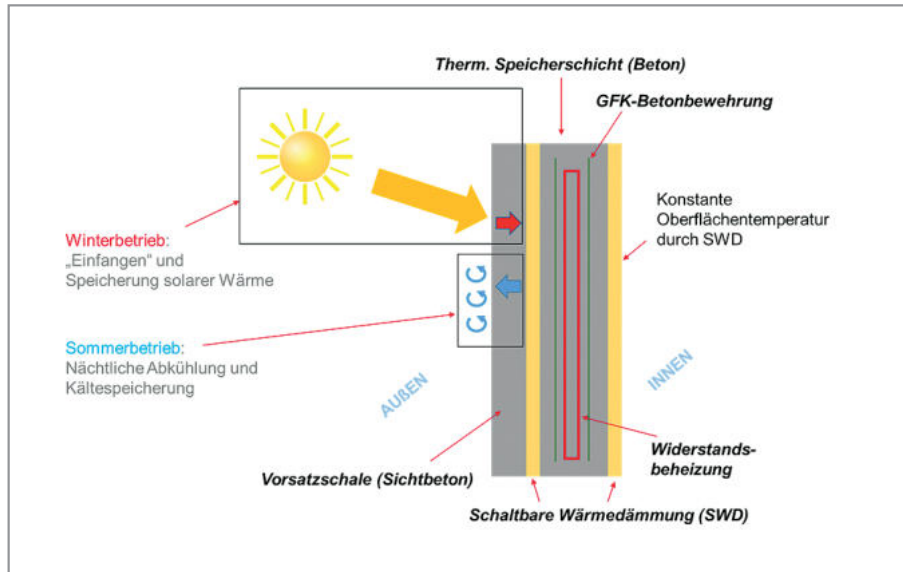
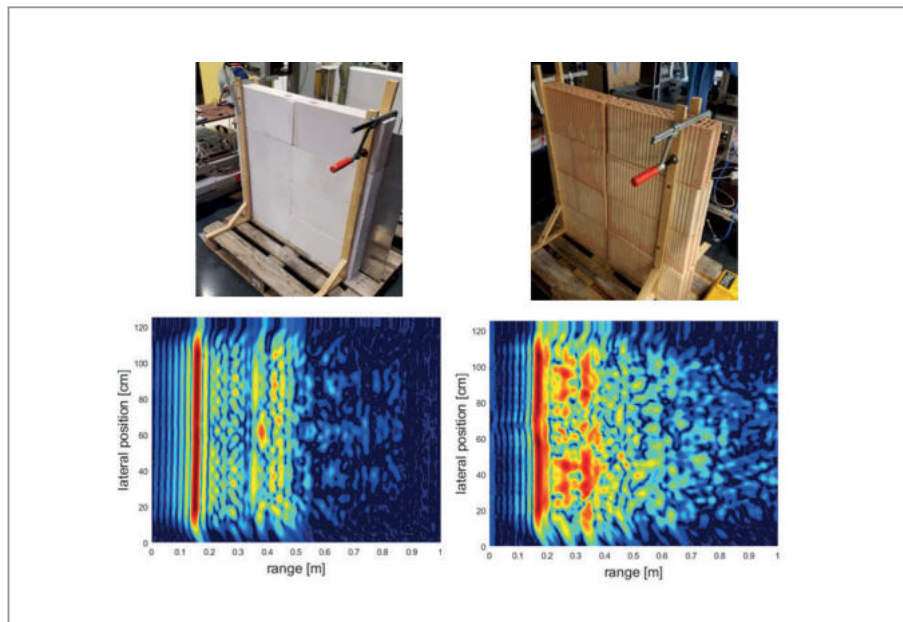


Abbildung 8

**Radarmessungen zur Unterscheidung von Baumaterialien:**

Tiefenprofile von zwei verschiedenen Fassadenkonstruktionen. Unterschiede, sowie die Möglichkeit zu Tiefenauflösung sind erkennbar.



Ziel des Projekts ist es, die unterschiedlichen Verfahren zu kombinieren, um ein möglichst genaues Bild der thermischen Eigenschaften einer Gebäudehülle ermitteln zu können.

**Fazit**

Die „Energiewende“ im Gebäudebereich stellt eine große Herausforderung dar. 60% des Endenergiebedarfs in diesem Sektor können bis 2050 eingespart werden. Einsparpotenziale lassen sich durch innovative Ansätze in den Bereichen Gebäudehülle,

Bautechnik, Gebäudesystemtechnik, Planung und im Gebäudebetrieb erschließen. Dabei sind diese Bereiche und Themen ganzheitlich zu betrachten, um Synergieeffekte maximal zu erschließen. Insbesondere der möglichst unkomplizierte Einsatz für die Sanierung des Gebäudebestandes spielt eine essenzielle Rolle. Die dargestellten aktuellen Projektbeispiele zeigen beispielhaft innovative, multidisziplinäre Technologieansätze, die es ermöglichen, einen energieeffizienten Gebäudebestand zu realisieren. Herausforderung bleibt, dieses Potenzial unter wirtschaftlichen, ökologischen und gesellschaftlichen Gesichtspunkten bis 2050 zu erschließen.



## Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt, „Gebäude und Wohnungen – Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden, Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden, Lange Reihe ab 1969–2013,“ Wiesbaden, 2015.
- [2] Statistisches Bundesamt, „Zensus 2011 – Erste Ergebnisse des Zensus 2011 für Wohnungen und Gebäude,“ Wiesbaden, 2013.
- [3] G. Luther, „Endbericht zum theoretischen Teil von Arbeitspaket 3 im Projekt LEXU II, Außenliegende Luftheizung, Konzept, Modellierung und Analysen,“ Universität des Saarlandes, FSt. Zukunftsenergie, Saarbrücken, 2013.
- [4] G. Luther und H. Altgeld, „Die außenliegende Wandheizung,“ Gesundheitsingenieur, pp. 8–15, 2002.
- [5] C. Schmidt, H. Altgeld, B. Groß, G. Luther und D. Schmidt, „LEXU II – Einsatz von außenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung, In Proceedings of CESBP/BauSim, S. 843–850,“ 2016.
- [6] M. Zimmermann, „ECBCS Annex50 Prefabricated Systems for low Energy Renovation of Residential Buildings, Project Summary Report,“ UK, 2012.
- [7] „<http://www.retrokitproject.eu/>,“ [Online]. Available: <http://www.buildup.eu/de/explore/links/retrokit-projekt>. [Zugriff am 05.12.2017].
- [8] R. Horn, „*Entwicklung und Untersuchung einer schaltbaren Wärmedämmung zur Solarenergienutzung*,“ Diss., Würzburg, 2001.
- [9] C. R. mer, H. Weinläder, S. Weismann, S. Vidi, J. Wachtel, „*Switchable Thermal Insulation for increasing energy efficiency of building façades*,“ In Proceedings of EuroSun Conference, S. 174–179, 2016.
- [10] A. Haas, M. Peichl und S. Dill, „Theoretical and experimental investigations of microwave signatures for characterization of building structures,“ in *Radar Symposium (IRS), 2017 18<sup>th</sup> International*, Prag.
- [11] C. Schmidt, G. Luther, H. Altgeld, S. Maas, B. Groß und F. Scholzen, „Außenliegende Wandtemperierung – LowEx-Anwendung zur Temperierung von Bestandsgebäuden und thermischen Aktivierung der Bestandswand: theoretische Grundlagen und Kennwerte,“ *Bauphysik, Heft 4*, pp. 2015–223, 2017.

# Industrielle Abwärme zur Stromerzeugung: Potenziale und Forschungsbedarf



IZES  
Patrick Hoffmann  
hoffmann@izes.de

Dr. Bodo Groß  
gross@izes.de

Sascha Heib  
heib@izes.de

Der Endenergieverbrauch zur Wärmebereitstellung der Sektoren Industrie sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistung lag in Deutschland im Jahre 2016 bei rund 490 Terrawattstunden [AG Energiebilanzen 2016]. Davon fallen verschiedenen Studien zufolge zwischen 130 und 226 Terrawattstunden als Abwärme an [Connolly et al. (2013); Pehnt et al. (2010); Persson et al. (2014); IZES (2015)], welche zurzeit ungenutzt in Abgasen, Abluft oder Abwässern der Umwelt zugeführt werden. Die Erschließung dieser ungenutzten Potenziale ist erklärtes Ziel der Klimaschutzbemühungen der Bundesregierung und wird entsprechend umfangreich gefördert [vgl. z.B. BMWi (2017a) und (2017b)].

Zur Nutzung von Abwärme stehen verschiedene Technologien zur Verfügung. Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf Technologien zur Erzeugung elektrischer Energie aus Abwärme. Im Weiteren wird ausdrücklich nicht der Frage nachgegangen, ob und unter welchen Voraussetzungen die Verstromung von Abwärme einer thermischen Verwendung vorgezogen werden soll. Vielmehr soll der Stand der Technik sowie der aktuelle Forschungsbedarf beleuchtet werden.

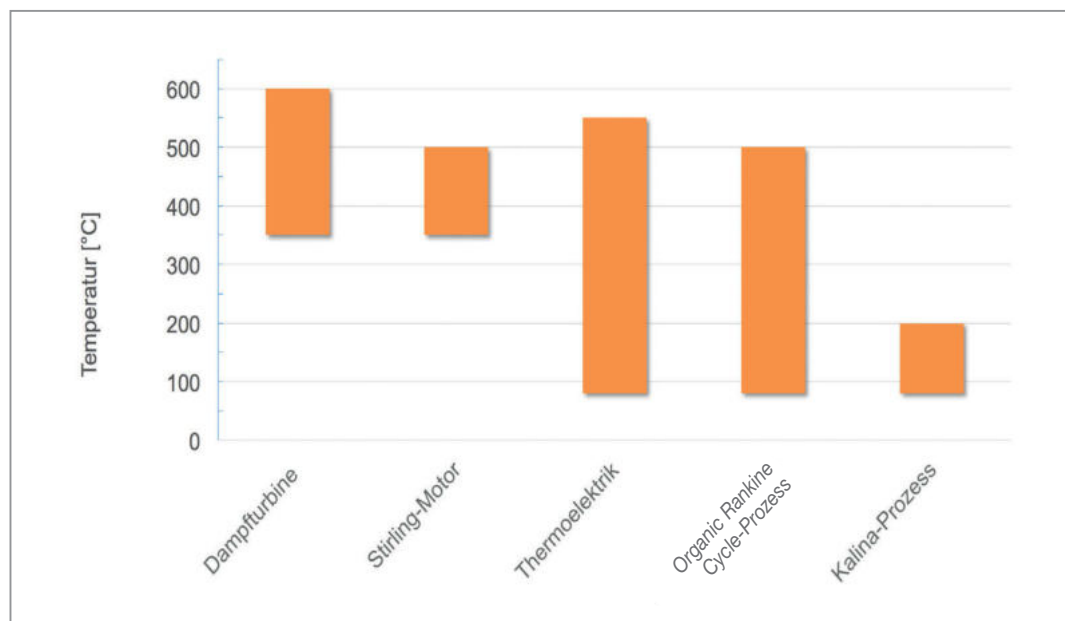
► **Abbildung 1** zeigt die aktuell verfügbaren Technologien zur Erzeugung von elektrischer Energie aus industrieller Abwärme sowie die Temperaturbereiche, in denen diese technisch eingesetzt werden können.

Der Wirkungsgrad der einzelnen Technologien ist vom Temperaturniveau des Abwärmemediums abhängig und steigt in der Regel mit zunehmender Temperatur und analog steigendem Exergieanteil des Abwärmeträgers.

Doch liegen gerade in niedrigeren Temperaturbereichen große Potenziale brach. So sind nach [Brückner (2016)] von einem deutschen Gesamtpotenzial an gasförmiger Abwärme, dass sich zwischen 60 und 70 Terrawattstunden bewegt, annähernd 70% einem Temperaturbereich unter 200 °C zuzuordnen. ► **Abbildung 1** verdeutlicht, dass aktuell nur die Technologien Organic-Rankine-Cycle, Thermoelektrik sowie der Kalina-Prozess zur Verstromung in einem Temperaturbereich bis knapp unter 100 °C zur Verfügung stehen.

Im Vergleich der drei genannten Verstromungstechnologien für niedrige Temperaturbereiche ist der Kalina-Prozess nur in einem relativ kleinen Temperaturbereich einsetzbar. Außerdem ist das verwendete Ammoniak toxisch und korrosiv, weshalb die Komponenten einer Kalina-Anlage aus besonders hochwertigem Material bestehen müssen (z.B. hochlegierte Stähle oder Titan). Hinzu kommt ein erhöhter Aufwand für Betrieb und Wartung der Anlagen, der sich aus dem Umgang mit dem toxischen Arbeitsmedium ergibt, welches nicht entweichen darf. Aus den genannten Gründen ist die Kalina-Technologie

Abbildung 1  
**Verfügbare  
Technologien zur  
Abwärmeverstromung  
mit ihren jeweiligen  
Temperatureinsatz-  
bereichen**  
(IZES 2016/2017)



fast vollständig aus der Forschungslandschaft verschwunden. Der Fokus der Betrachtungen liegt im Folgenden auf den thermoelektrischen Generatoren und dem Organic Rankine Cycle-Prozess.

### Funktionsweise

- **Thermoelektrische Generatoren**

Unter dem Überbegriff Thermoelektrik werden Vorgänge zusammengefasst, bei denen Wärme mit Hilfe von Halbleitern direkt und ohne bewegliche Teile in elektrische Energie umgewandelt wird.

Die physikalische Grundlage hierfür ist der sogenannte Seebeck-Effekt. Dieser besagt, dass wenn zwei unterschiedlich elektrisch leitende Materialien zu einem Stromkreis verbunden sind und sich beide Kontaktstellen auf einem unterschiedlichen Temperaturniveau befinden, zwischen den Kontaktstellen eine elektrische Spannung entsteht.

Die technische Umsetzung dieses Vorgangs geschieht in sogenannten thermoelektrischen Generatoren (TEG). Sie bestehen typischerweise aus zwei Wärmeübertragern zur Erzeugung einer heißen und einer kalten Seite sowie den dazwischenliegenden thermoelektrischen Modulen. Diese wandeln die sie durchfließende Wärme teilweise in elektrische Energie um. Je nach eingesetztem Material können TEG in unterschiedlichen Temperaturbereichen eingesetzt werden.

- **Organic Rankine Cycle-Prozess**

Der Organic Rankine Cycle-Prozess (ORC) ist ein thermodynamischer Kreisprozess, ähnlich dem Clausius Rankine Cycle-Prozess (CRC), wie er in konventionellen Wasserdampfkraftwerken angewandt wird. Im Unterschied dazu werden ORC-Anlagen jedoch nicht mit Wasserdampf, sondern mit einem organischen Arbeitsfluid angetrieben. Meist erwärmt eine Wärmequelle einen Thermoölkreislauf, welcher dann die Wärme mittels eines Wärmetauschers an das Arbeitsfluid abgibt. Das Fluid verdampft und treibt eine Turbine, einen Schraubenverdichter oder eine Hubkolbenmaschine an. Durch die Wahl des organischen Arbeitsfluids, beispielsweise Silikonöle, Kohlenwasserstoffe (Butan, Hexene, Pentan, Ethanol etc.) oder konventionelle Kältemittel, kann die Betriebstemperatur so weit heruntersetzt werden, dass die Verstromung von Abwärme bereits ab 85 °C möglich ist.

### Aktueller Stand der Technologie

- **Thermoelektrische Generatoren (TEG)**

TEG können einem breiten Spektrum innerhalb des Technology Readiness Level (TRL) zugeordnet wer-

den, der je nach Anwendungsfall zwischen 2 und 9 liegt. Sie werden aktuell bspw. in der Raumfahrt, als Sensoren in Messstationen, in Herzschrittmachern oder auch in Campinganwendungen eingesetzt. Zur Verstromung von Abwärme im industriellen Maßstab kommen TEG zurzeit ausschließlich in Forschungsprojekten zum Einsatz.

Die nachfolgende ► **Tabelle 1** zeigt, in welchen Temperaturbereichen die aktuell verfügbaren thermoelektrischen Materialien eingesetzt werden und welche Wirkungsgrade diese erreichen können.

Tabelle 1

**Thermoelektrische Materialien:**  
Temperatureinsatzbereiche und Wirkungsgrade  
[Fraunhofer IPM (2016)]

	Material	Einsatzbereich	Wirkungsgrad
gute kommerzielle Verfügbarkeit	Bismut-Telluride (BiTe)	100 °C bis 250 °C	4 %
	Blei-Telluride	200 °C bis 500 °C	7 %
geringe kommerzielle Verfügbarkeit (Auswahl)	Skutterudite	250 °C bis 500 °C	8 %
	Halb-Heusler-Legierungen	250 °C bis 500 °C	5 %
	Silizide	300 °C bis 650 °C	5 %

► **Tabelle 1** verdeutlicht, dass Bismut-Telluride bereits bei Temperaturen knapp über 100°C eingesetzt werden können, der Wirkungsgrad dieses Materials aber sehr gering ist. Kommerzielle, segmentierte Module, bei denen Bismut- und Bleitellurid (BiTe, PbTe) miteinander kombiniert werden, erreichen Wirkungsgrade von bis zu 7% (bei einer Einsatzhöchsttemperatur von etwa 540°C). Aufgrund der Giftigkeit von Blei und Bismut wird jedoch nach Alternativen in der Materialauswahl geforscht. Ein großes Potenzial bieten in dieser Hinsicht insbesondere die Materialklasse der Skutterudite (abgeleitet von Mineral Skutterudit, CoAs<sub>3</sub>), Halb-Heusler-Legierungen, Silizide sowie modifizierte BiTe-Module mit erweiterter Temperaturstabilität. Entsprechende Generatoren befinden sich aktuell noch im Forschungs-, Prototyp- und Einzelanfertigungsstadium. Im Laborversuch konnten kaskadierte Module mit einer Kombination von Nieder- und Hochtemperaturmaterialien Wirkungsgrade von bis zu 20% erreichen. Skutterudite sind auch bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen effizient.

Maßgeblich zur Bewertung eines Materials zur thermoelektrischen Nutzung ist der ZT-Wert (Thermoelektrische Gütezahl), welcher die Effizienz eines Materials angibt. Derzeit liegt dieser Wert bei kommerziellen Generatoren bei 1, Demonstrationsanlagen können Werte von bis zu 2,4 erreichen. Für eine wirtschaftliche, kommerzielle und breite Anwendung (auch in Haushalten) werden Materialien mit einem ZT-Wert ab 3 vorausgesetzt [Fraunhofer IPM (2016)].

Aktuelle Forschungsgebiete sind die Verstromung von Abwärme aus Verbrennungsabgasen von Automobilen, Schiffen, BHKW sowie von Strahlungsabwärme in der Industrie (z. B. bei Schmiedeprozessen), die Entwicklung keramischer Materialien sowie die Erweiterung des Temperaturbereichs von 200 °C bis 1.000 °C [IZES (2017)].

Geforscht wird derzeit u. a. auch an geeigneten Löttechniken zur Verbindung der elektrischen Kontakte, welche den erforderlichen hohen Temperaturunterschieden standhalten, langlebig sind und gleichzeitig einen niedrigen elektrischen Widerstand haben [Fraunhofer IPM (2016)].

Einen weiteren Forschungsschwerpunkt stellen nanostrukturierte Materialien dar (z. B. nanokristallines Silizium). Von diesen verspricht man sich einerseits den Ersatz giftiger und teurer Materialien wie Blei und Tellur, andererseits höhere Wirkungsgrade.

- **Organic Rankine Cycle-Prozess (ORC)**

Unter den hier betrachteten Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme ist der Organic Rankine Cycle-Prozess die am weitesten entwickelte. ORC-Anlagen können einem Technology Readiness Level von 6 bis 9 zugeordnet werden. Sie können mit Wirkungsgraden zwischen 10% und 18% elektrische Leistungen von 5 kW bis 15 MW liefern und arbeiten in Temperaturbereichen zwischen 85 °C und 530 °C. Höhere Temperaturbereiche können zwar ebenfalls durch ORC-Anlagen erschlossen werden, allerdings kommt hier in der Regel der konventionelle Wasserdampfkreislaufprozess zum Einsatz, der sich wiederum für niedrigere Temperaturniveaus nicht eignet [IZES (2017)].

ORC-Anlagen werden derzeit überwiegend zur Verstromung von geothermischer Energie, in Biomassekraftwerken bzw. KWK-Anlagen sowie bei solarthermischen Kraftwerken eingesetzt. Zur Abwärmenutzung wurden bisher in Deutschland rund 180 ORC-Anlagen in einem Leistungsbereich von 5 kW bis 7.500 kW vor allem für Temperaturen zwischen 80 °C und 300 °C installiert [ORC-Fachverband (2017)]. ORC-Anlagen in unteren Leistungsbereichen gelten allgemein derzeit noch als unwirtschaftlich. In den Industriezweigen der Metallverarbeitung, der Glasherstellung und in der Landwirtschaft befinden sich ORC-Anlagen im Leistungsbereich zwischen 20 kW und 60 kW im Probetrieb.

Die allgemeine Forschung konzentriert sich weitestgehend auf die Entwicklung neuer Wärmeübertrager, Arbeitsmittel und Expander [IZES (2016)].

## Systemkompatibilität und Risiken

Die Systemkompatibilität der Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme ist unter derzeitigen Bedingungen ohne Anpassungsbedarf gegeben. Risiken für die Technologien ergeben sich insbesondere hinsichtlich der vorhandenen industriellen Abwärmequellen. Bei der Planung zum Einsatz von Technologien zur Abwärmeverstromung ist insbesondere darauf zu achten, dass die langfristige Verfügbarkeit der Abwärmeströme bei gleichbleibendem Temperaturniveau beachtet wird. Externe Faktoren, wie beispielsweise identifizierte Verbesserungspotenziale bezüglich der Effizienz der Abwärmequelle, kurz- oder mittelfristig geplante Prozess- und/oder Produktwechsel sowie ggf. vorhandene Pläne zur Standortverlagerung/-schließung der Produktionsstätte müssen ebenfalls ausreichend beachtet werden.

## F&E-Empfehlungen

Im Rahmen des unter Mitarbeit des IZES durchgeführten Forschungsvorhabens „Technologien für die Energiewende“ (FKZ 03ET4036A-C), gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wurden künftige Forschungsfragen für Stromerzeugungstechnologien zur Abwärmenutzung auf Grundlage einer multikriteriellen Analyse abgeleitet. Die wesentlichen Ergebnisse sind nachfolgend genannt [IZES (2017)]:

- **Thermoelektrische Generatoren**

Eine der größten Herausforderungen bei TEG ist die Entwicklung von geeigneten Materialien (Substituierung des toxischen/rohstoffkritischen Bleis/Tellurs, Materialien für verschiedene Temperaturbereiche). Vor allem für den niedrigen und mittleren Temperaturbereich (wo die meiste Abwärme anfällt) sind Alternativen zu Bismuttelluriden zu entwickeln. Im mittleren Temperaturbereich stellen Skutterudite, Halb-Heusler-Module und Silizide eine gute Alternative zu Bleitellurid dar. Diese Materialien müssen jedoch weiter erforscht und verbessert werden (Eigenschaften, Preis, Güteeffizienz). Auf den Erfolgen der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Bereich der Verwendung von nanokristallinem Silizium kann für die weitere Erforschung dieser Materialklasse aufgebaut werden.

Zusätzlich sollte die Installation von Demonstrationsanlagen sowohl für niedrige als auch für höhere Leistungsklassen unterstützt werden, um die Funktionstüchtigkeit und Rentabilität der Thermoelektrik in diesen Bereichen unter Beweis zu stellen.

Um TEG auch finanziell attraktiv zu gestalten, müssen diese automatisiert hergestellt werden können, was die Entwicklung von geeigneten Herstellungsverfahren erfordert.

Ein grundsätzliches Problem stellt derzeit noch die elektrische Kontaktierung dar. Hier sind vor allem Langlebigkeit, die Resistenz gegenüber hohen Temperaturunterschieden und ein niedriger elektrischer Widerstand von Bedeutung.

- **Organic Rankine Cycle-Prozess**

Speziell für ORC-Anlagen im kleineren Leistungsbereich (unter 200 kW) und im höheren Leistungsbereich (ab 2.500 kW) ist zur Preissenkung der Anlagen eine serielle Herstellung erforderlich.

Ebenfalls von Bedeutung ist diesbezüglich die Entwicklung effizienter Wärmetauscher, da diese maßgeblich den Wirkungsgrad und die Investitionskosten beeinflussen. Dabei sind vor allem preisgünstige Materialien zu untersuchen, welche den Verschmutzungen von zum Teil korrosiven Abgasen standhalten. Außerdem gilt es in Zukunft geeignete Arbeitsfluide für verschiedene Temperaturbereiche zu entwickeln und zu identifizieren, insbesondere um mittel- und langfristig halogenierte Arbeitsfluide durch weniger klimaschädliche Verbindungen zu ersetzen.

Weiterhin sollten zur Effizienzsteigerung und Kostenreduzierung neue ORC-Verfahrenskonzepte (z. B. ohne zwischengeschaltete Thermoölkreisläufe) untersucht werden.

## Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen (2016): unter <http://www.ag-energiebilanzen.de>, abgerufen am 25.11.2016
- BMWi (2017a): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Änderung der Richtlinie für die Förderung der Abwärmevermeidung und Abwärmennutzung in gewerblichen Unternehmen. Berlin 2017
- BMWi (2017b): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Förderbekanntmachung zu den Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0. Berlin 2017
- Brückner (2016): Brückner, S.: Industrielle Abwärme in Deutschland. Dissertation an der TU München. München 2016
- Connolly et al. (2013): Connolly, D. et al.: Heat Roadmap Europe 2050. Second Pre-Study for the EU28. 2013.
- Fraunhofer IPM (2016): Technologiebewertung im Rahmen des Forschungsprojektes „Erhebung, Abschätzung und Evaluierung von industrieller Abwärme in Deutschland – Potentiale und Forschungsbedarf“ im Auftrag des BMWi 2016 (noch unveröffentlicht)
- IZES (2015): Studie Abwärmennutzung – Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge. Kurzstudie im Auftrag des BMUB. Saarbrücken 2015
- IZES (2016): Technologiebewertung im Rahmen des Forschungsprojektes „Erhebung, Abschätzung und Evaluierung von industrieller Abwärme in Deutschland – Potentiale und Forschungsbedarf“ im Auftrag des BMWi 2016 (noch unveröffentlicht)
- IZES (2017): Technologiebericht TF 6.3 Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme innerhalb des Forschungsprojekts TF Energiewende. Saarbrücken 2017.
- ORC-Fachverband (2017): unter [http://www.orc-fachverband.de/was\\_ist\\_die\\_orc\\_technologie\\_.html](http://www.orc-fachverband.de/was_ist_die_orc_technologie_.html), abgerufen am 25.10.2017
- Pehnt et al. (2010): Pehnt, M. et al.: Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potentiale und energiepolitische Umsetzung. Forschungsbericht. Karlsruhe 2010.
- Persson et al. (2014): Persson, U. & Möller, B. & Werner, S.: „Heat Roadmap Europe: Identifying strategic heat synergy regions,“ Energy Policy, Elsevier, vol. 74(C), pages 663-681.

# Low-Carbon-Industrie: Elektrifizierung und geschlossene Kohlenstoffkreisläufe



**Wuppertal Institut**  
Clemens Schneider  
clemens.schneider@wupperinst.org  
Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer  
stefan.lechtenboehmer@wupperinst.org

**DLR**  
Dr. Thomas Bauer  
thomas.bauer@dlr.de

**Fraunhofer ISE**  
Dr. Peter Nitz  
peter.nitz@ise.fraunhofer.de

**Fraunhofer ISI**  
Tim Hettesheimer  
tim.hettesheimer@isi.fraunhofer.de  
Prof. Dr. Martin Wietschel  
martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

**FZ Jülich**  
Prof. Dr. Wilhelm Meulenber  
w.a.meulenber@fz-juelich.de

**ZAE Bayern**  
Richard Gurtner  
richard.gurtner@zae-bayern.de

Stahl, Chemieprodukte, Zement und Papier werden ganz überwiegend großmaßstäblich hergestellt und sind essenzieller Bestandteil einer Vielzahl an industriellen Wertschöpfungsketten, die aus heutiger Sicht auch langfristig benötigt werden, nicht zuletzt für den Ausbau von Infrastrukturen, die den Aufbau eines CO<sub>2</sub>-armen Wirtschaftssystems ermöglichen.

In der EU wurden im Jahr 2010 170 Mio. Tonnen Stahl, 190 Mio. Tonnen Zement und 40 Mio. Tonnen Olefine (als Grundstoffe der organischen Chemie) produziert (Lechtenböhrer et al. 2015, ▶ *Abbildung 1*). Damit geht ein beträchtlicher Einsatz an Energieträgern einher: Für nur wenige ausgewählte Grundstoffe wurden 2.200 TWh fossile Energieträger eingesetzt, dazu 125 TWh Strom. Der Großteil der Energieträger wird energetisch genutzt, das heißt Kohlenwasserstoffe werden zu Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) oxydiert, und die dabei frei werdende Energie wird genutzt, z. B. zur Reduktion von Eisenerz zu Roheisen, als Reaktionsenergie für chemische Prozesse oder zum Schmelzen und Verformen von Metallen.

Knapp 700 TWh werden stofflich genutzt. Hierbei handelt es sich vor allem um Erdölprodukte, die in Plattformprodukten für die chemische Industrie (Olefine und Aromaten) umgewandelt werden. Mit der stofflichen Nutzung sind – anders als bei der energetischen Nutzung – keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden, wohl aber dann, wenn (wie heute üblich) die Produkte am Ende ihres Lebenszyklus energetisch genutzt werden.

Wenn die Raffinerien mit ihrer Umwandlung von Erdöl in Brenn- und Kraftstoffe zusätzlich zum Komplex der energieintensiven Industrie hinzugezählt werden, so ist damit ein Großteil des Eintrags von fossil gebundenem Kohlenstoff in das Wirtschaftssystem abgedeckt. Zwar fehlt hier die Stromerzeugung als heute bedeutendster Emittent an Kohlendioxid – langfristig jedoch, das zeigen zahlreiche Szenariostudien, kann diese vollständig auf regenerative Energien umgestellt werden. Welchen Beitrag erneuerbar erzeugter Strom langfristig leisten kann, um das Energiesystem insgesamt (also inklusive Verkehr und Industrie) zu dekarbonisieren, ist heute noch nicht abschließend geklärt und inzwischen Untersuchungsgegenstand zahlreicher Studien im Rahmen der sogenannten Sektorkopplung. Hier wird untersucht, inwiefern fossile Energieträger durch Strom

oder strombasierte Energieträger (wie Wasserstoff oder synthetische Kohlenwasserstoffe) ersetzt werden können.

▶ *Abbildung 2* zeigt drei prototypische Systeme einer CO<sub>2</sub>-armen Industrie für die lange Frist.

## Das System „Strom“

baut auf eine direkte Elektrifizierung des Energiesystems, Kohlenstoff wird hier nur in das System eingebracht, wo unvermeidlich, z.B. bei der Nutzung von Kalkstein für die Herstellung von Zement oder bei der stofflichen Nutzung von Kohlenstoff in Kunststoffen (Kohlenwasserstoffen). Aus Sicht der Endenergieeffizienz handelt es sich hierbei um ein sehr effizientes und obendrein buchstäblich kohlenstoffarmes System. Allerdings fehlt einem solchen System die immanente Möglichkeit der Energiespeicherung zum Ausgleich von Fluktuationen der Stromerzeugung.

## Der Systemprototyp „ICCS“ (Industrielles CCS)

baut soweit wie möglich auf heutige Infrastrukturen und Energieträger auf und setzt deshalb auf die fortgesetzte Nutzung von fossilen Kohlenwasserstoffen. Aus diesem Grund erfordert es aber eine neu aufzubauende CO<sub>2</sub>-Leistungs- und Speicherinfrastruktur. Wo keine CO<sub>2</sub>-Abscheidung technisch-ökonomisch darstellbar ist, wie im Falle der Mobilität, muss aber auch in diesem System eine direkte oder indirekte Elektrifizierung oder die Nutzung von Bio-Energieträgern in Betracht gezogen werden.

## Das System „Power-to-X-Import“

baut auf eine indirekte Elektrifizierung des Energiesystems. Hier – wie auch bei ICCS – handelt es sich nicht um ein per se kohlenstoffarmes System. Kohlenstoffarm wird dieses System erst in einer Nettobetrachtung, d. h. bei einer Bilanzierung von Entnahmen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre und den CO<sub>2</sub>-Emissionen. Durch die hohen Umwandlungsverluste von Strom hin zu Kohlenwasserstoffen ist der Nettostrombedarf dieses Systems deutlich höher als der der anderen Systeme. Eine Studie des Umweltbundesamtes (2014) weist pro Jahr für Deutschland in einem solchen System einschließlich der gesamten Energienachfrage, also auch des Wärme- und Verkehrssektors einen Bedarf von 3.000 TWh pro aus – eine Menge, die sich nicht mehr alleine an inländischen Standorten aus erneuerbaren Energien umweltverträglich erzeugen lässt. Deshalb wären in einem solchen System Energieimporte notwendig.

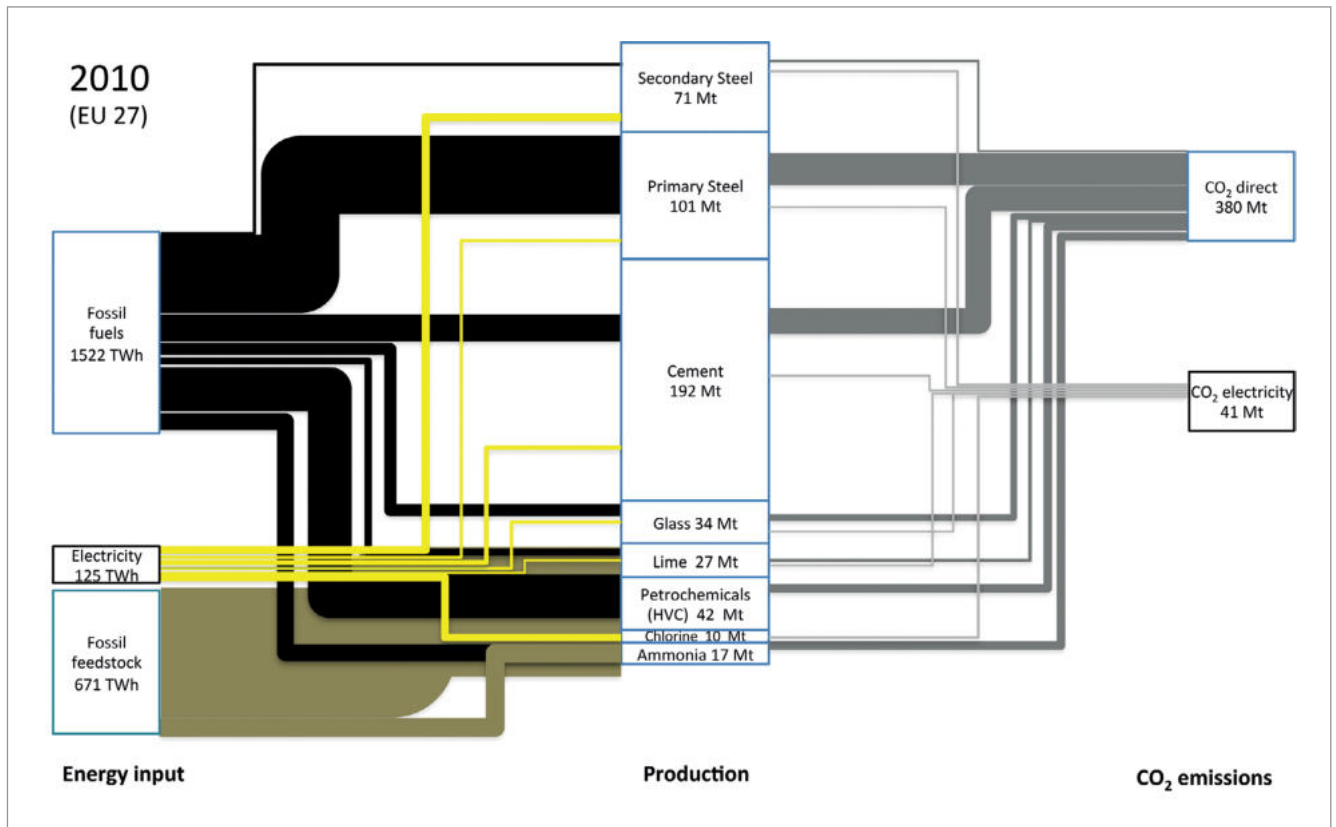


Abbildung 1  
**Große Massen-,  
 Energie- und  
 CO<sub>2</sub>-Bilanz**  
 der europäischen  
 energieintensiven  
 Industrie  
 (Quelle: Lechtenböher et al.  
 2016)

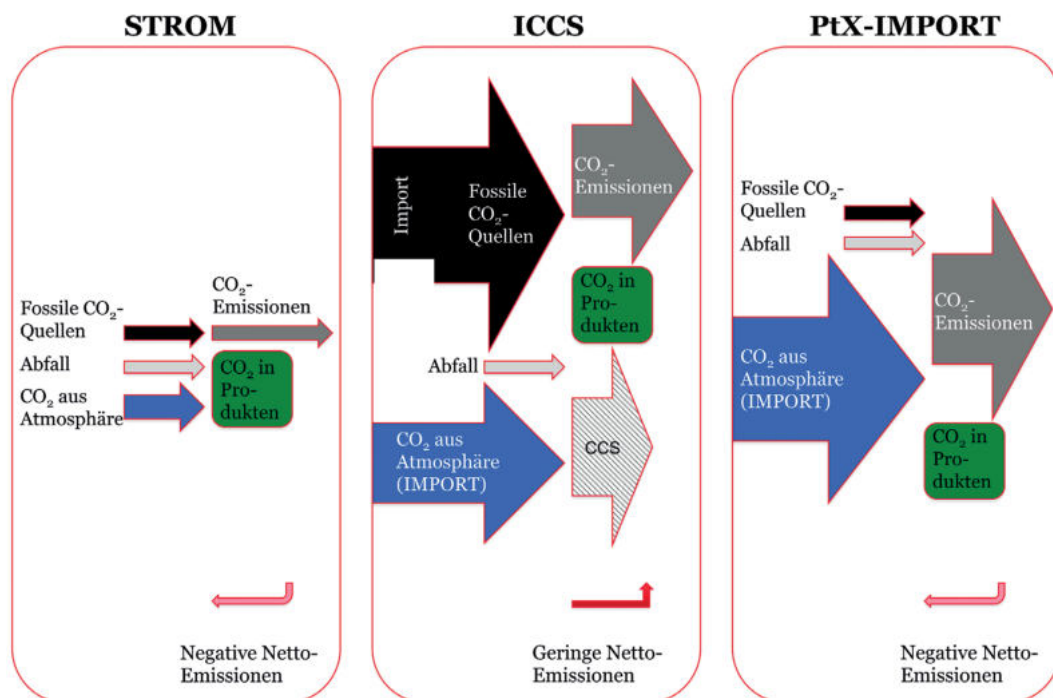


Abbildung 2  
**Prototypische Konzepte  
 einer Low-Carbon-  
 Industry**  
 (Quelle: Wuppertal Institut)

### Zentrale Technologien für eine Low-Carbon-Industrie

In dem vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekt „Technologien für die Energiewende“ wurde der mögliche Beitrag verschiedener Technologien zur Erreichung des langfristigen Ziels einer „low carbon industry“ eruiert (Schneider et al. 2017, Hettesheimer 2017). Zentrale Technologien wie Power-to-Fuels und Power-to-Chemicals wurden im Rahmen eigener Untersuchungen gewürdigt. Innerhalb des Technologieberichts „Low-Carbon- und ressourceneffiziente Industrie“ wurden darüber hinaus weitere Technologien untersucht, die eine fast vollständige Dekarbonisierung derjenigen Produktionsprozesse ermöglichen könnten, die aufgrund der Menge ihres heutigen Kohlenstoffumsatzes von großer Relevanz sind. Die Auswahl versuchte dabei unterschiedliche Ausprägungen einer zukünftigen Low-Carbon-Industrie im Rahmen des Möglichkeitsraumes der drei oben genannten Systemprototypen zu berücksichtigen.

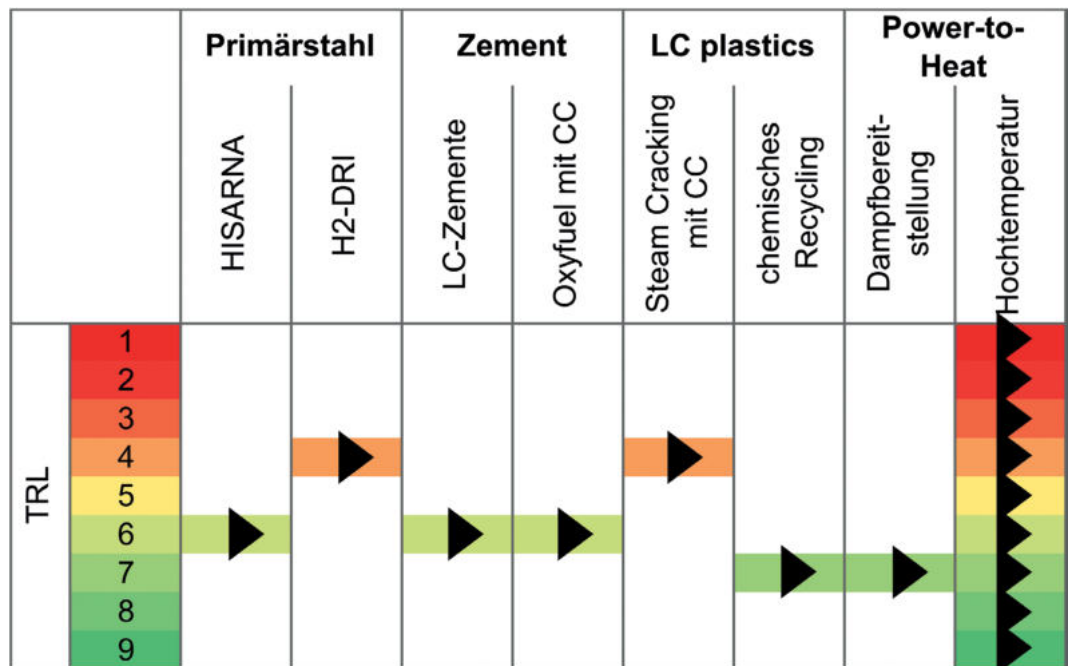
► **Abbildung 3** zeigt die von Wuppertal Institut und Fraunhofer ISI untersuchten „Low-Carbon-Technologien“ und den jeweiligen Stand von Forschung und Entwicklung (F&E) auf. Die Einschätzung nutzt den standardisierten Ansatz der technology readiness levels (TR-Level), der eine Einteilung in neun Stufen von 1 (Grundlagenforschung) bis 9 (Nachweis der Funktion im wirtschaftlichen Betrieb) vorsieht. Je höher der TR-Level, desto früher kann mit einer Markteinführung der Technologie gerechnet werden.

Zwei alternative Technologien zur zukünftigen Primärstahlerzeugung sind einmal das so genannte Hlsarna-Verfahren, ein Schmelzreduktionsverfahren mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung, das im „ULCOS“-Verbund der europäischen Stahlerzeuger entwickelt wird und dessen Machbarkeit in einem niederländischen Stahlwerk demonstriert wird und zum anderen die Direktreduktion von Eisenerz mit Wasserstoff zu Roheisen (H<sub>2</sub>-DRI), die nur Wasserstoff als Reduktionsmittel verwendet und aus diesem Grund keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist.

Im Bereich der Zementherstellung wurden so genannte Low-Carbon-Zemente (LC-Zemente) untersucht, die aufgrund eines modifizierten Brennverfahrens, einer anderen Materialzusammensetzung und neuer Mahltechniken niedrigere energiebedingte und prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen. Oxyfuel-Zementklinkeröfen weisen einen reineren Abgasstrom gegenüber den konventionellen Drehrohröfen auf und eignen sich deshalb besser für eine CO<sub>2</sub>-Abscheidung (siehe auch unten das Projekt GREEN-CC).

Kunststoffe werden heute ganz überwiegend erdölbasiert hergestellt. Das in ihnen gebundene fossile CO<sub>2</sub> wird bei ihrer Verbrennung am Ende des (oft kurzen) Lebenszyklus freigesetzt. In Zukunft könnten auch andere Kohlenwasserstoff-Quellen (z. B. auf Basis von Elektrolysewasserstoff und CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre) eingesetzt werden. Solche PtX-Technologien wurden innerhalb des Projekts „Technologien für die Energiewende“ gesondert bewertet. Eine

Abbildung 3  
**Zentrale Technologien einer Low-Carbon-Industrie: Stand von F&E**  
 (Quelle: Wuppertal Institut, basierend auf Schneider et al. 2017 und Hettesheimer 2017)





Alternative hierzu wäre eine strenge Führung von fossilem Kohlenstoff in Kreisläufen bzw. eine geologische Speicherung. Das hieße, dass CO<sub>2</sub> im Abgas der Steam Cracker abgeschieden und in Produkten genutzt oder abgeschieden würde. Andererseits entstehen am Ende des Lebenszyklus eines Kunststoffprodukts Emissionen bei der Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen, sofern die Produkte nicht alternativ recycelt werden. Das chemische Recycling ersetzt nicht das heute übliche mechanische Recycling, wo Kunststoffe nach ggf. mehrfachem Downcycling nicht mehr wiederverwertbar sind. Am Ende eines solchen Zyklus werden beim chemischen Recycling die im Kunststoff enthaltenen Elemente Kohlenstoff und Wasserstoff genutzt, um über ein Synthesegas Plattformchemikalien wie Ethylen neu zu erzeugen, woraus wieder „neuwertige“ Kunststoffe hergestellt werden können.

Ein bedeutender Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereich der energieintensiven Industrie ist auf die Bereitstellung von Dampf und Hochtemperatur-Wärme (>400 °C) zurückzuführen. Elektrifizierung via Power-to-Heat könnte hier mittel- und langfristig zur Dekarbonisierung beitragen, sofern in ausreichendem Maße Strom aus erneuerbaren Energien zur Verfügung steht. Die Bereitstellung von Dampf über Elektrodenkessel und/oder Hochtemperaturwärmepumpen weist in Verbindung mit dem Einsatz von Speichern heute bereits einen TR-Level von 4 auf (s. auch Abschnitt zu „Einsatz von Power-to-Heat und thermischen Speichern zur Flexibilisierung von Wärme- und Stromerzeugung“ unten), während die Bereitstellung von Hochtemperatur-Wärme sehr unterschiedliche TR-Level aufweist: In bestimmten Nischenanwendungen ist der Einsatz von Elektroden aufgrund ihrer deutlich höheren Energieeffizienz und Vorteilen bei der Prozessführung bereits heute üblich (z. B. in der Glas- und Nicht-Eisen-Metall-Industrie), für andere Anwendungen (wie der Bereich der Zementklinkeröfen) gibt es bisher nur Grundlagenforschung.

Aufgrund der langen Betriebszeiten der dargestellten Industrieanlagen von üblicherweise 30 bis 50 Jahren könnte der vollständige Ersatz des Anlagenparks bei kontinuierlichen Reinvestitionszyklen ähnliche lange dauern wie bei Kraftwerken. Aufgrund der teilweise noch niedrigen TR-Level ist bei den heute üblichen Reinvestitionszyklen jedoch überwiegend nicht davon auszugehen, dass alle hier dargestellten innovativen low-carbon-Technologien bis 2050 einen vollständigen Diffusionsprozess durchlaufen haben werden. Dennoch können mit ihrem Einsatz auch bis dahin schon Treibhausgasminderungseffekte erzielt werden und über 2050 hinaus können sie einen

maßgeblichen Beitrag zur dann weitestgehenden Dekarbonisierung der energieintensiven Industrie leisten.

### Ausgewählte aktuelle Forschungsprojekte

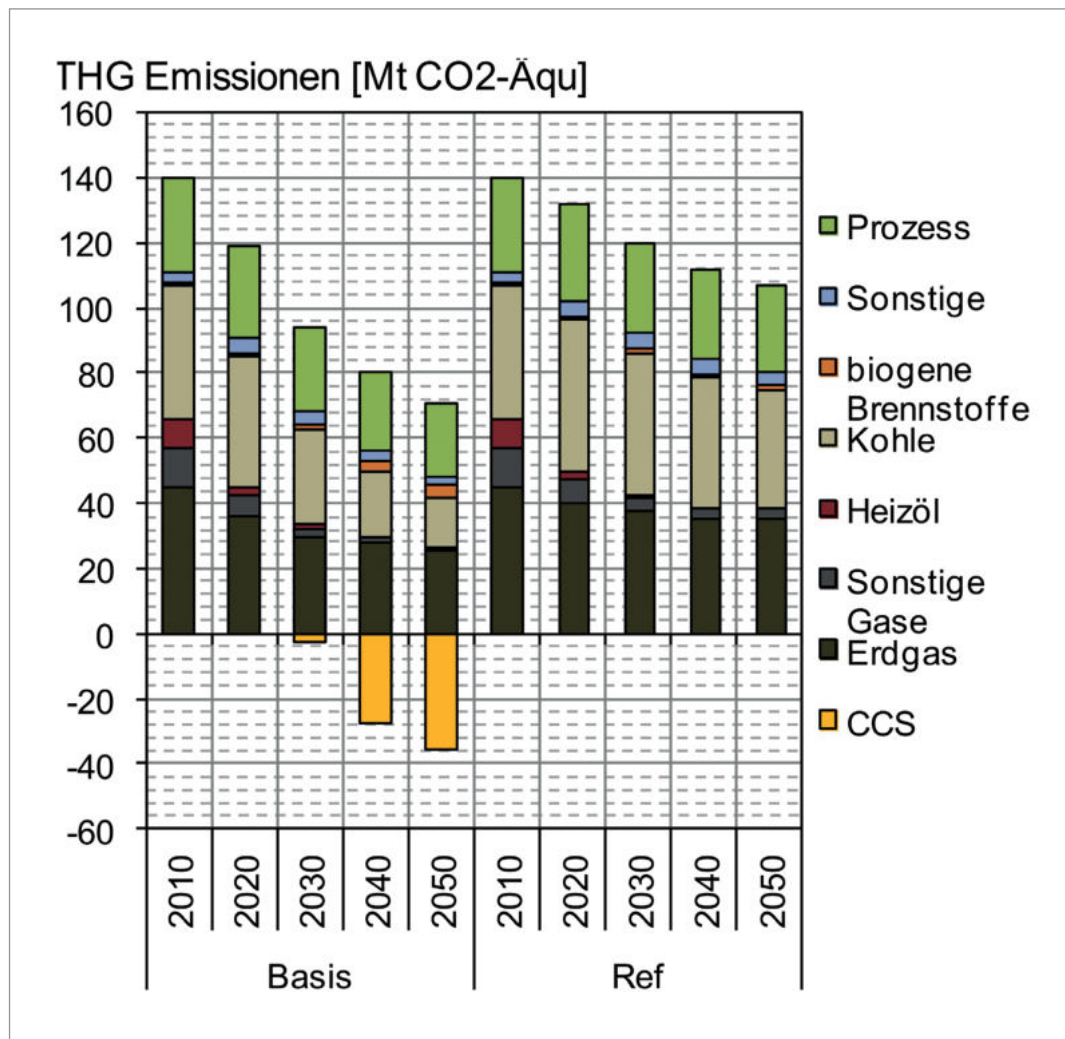
Im Folgenden werden einige ausgewählte Forschungsprojekte zum Themenkomplex einer low-carbon-industry kurz dargestellt, die aktuell von den FVEE-Mitgliedseinrichtungen sowie dem Fraunhofer ISI, das ebenfalls am Projekt „Technologien für die Energiewende“ beteiligt war, erarbeitet werden.

Neben den oben genannten Strategien der Elektrifizierung und Schließung von Kohlenstoffkreisläufen, die für eine weitestgehende Dekarbonisierung der hiesigen energieintensiven Industrie zentral sind, wird dabei auch die direkte Nutzung von solarer Prozesswärme berücksichtigt, die vor allem in sonnenreicheren Regionen eine zusätzliche Dekarbonisierungsoption mit industriepolitischer Relevanz für den deutschen Anlagenbau darstellt.

### Ausgewählte Ergebnisse aus den Langfrist- und Klimaszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland mit Fokus auf den Industriesektor

Ein Forschungsbeitrag des Fraunhofer ISI (s. auch Fleiter et al. 2016, Pfluger et al. 2017) zeigt basierend auf einer modellbasierten Szenarioanalyse, wie eine Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG) um 80% im gesamten Energiesystem bis zum Jahr 2050 erreicht werden kann und welchen Beitrag die Industrie hierzu leisten kann. Für letztere können unter den vorgenommenen Annahmen die THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 83% reduziert werden. Die Berechnung der Szenarien erfolgt mittels des Bottom-up-Modells FORECAST, das die Simulation von unterschiedlichen Politikinstrumenten und induzierten technologischen Wandel ermöglicht. Es bietet dabei eine sehr detaillierte Aufschlüsselung nach einzelnen Technologien und Produktionsprozessen. Das resultierende Minderungsszenario ([Abbildung 4](#)) zeigt dabei, dass die Nutzung von Kohle als Energieträger in allen Sektoren mit Ausnahme der Eisen- und Stahlindustrie zurückgeht. Der jährliche Einsatz von Biomasse steigt etwa auf rund 120 TWh im Jahr 2050 an. Power-to-Heat in Kombination mit Wärmespeichern gewinnt nach 2040 an Bedeutung und erreicht im Jahr 2050 etwa einen Bedarf von ca. 29 TWh. In der Eisen- und Stahlindustrie steigt der Anteil von Elektrostahl stark an. Sekundärproduktion und alternative Materialien werden zunehmend auch in der Papier-, Zement-, Glas- und Aluminiumindustrie eingesetzt. Bis 2050 vermindert die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung jährlich etwa 24 Mt

Abbildung 4  
**THG-Minderungs-  
 szenario:**  
 ausgewählte Ergebnisse  
 aus Langfrist- und  
 Klimaszenarien für  
 die Transformation  
 des Energiesystems in  
 Deutschland  
 (Quelle: Fraunhofer ISI)



CO<sub>2</sub> aus emissionsintensiven Prozessen wie Zementklinker- und Kalkherstellung, Primärstahlerzeugung sowie den Prozessen des Steam-Cracking und der Synthesegaserzeugung (für Ammoniak und Methanol).

**Klimaschutzszenarien für das Industriecluster der Hafenregion Rotterdam**

Das Wuppertal Institut hat im Auftrag der Hafenbehörde (Port of Rotterdam Authority) langfristige Klimaschutzszenarien für die Hafenregion Rotterdam entwickelt (Samadi et al. 2016). Die Hafenregion beheimatet rund 80% der petrochemischen Industrie der Niederlande und außerdem große Stromerzeugungskapazitäten. Die Klimaschutzszenarien zeigen Möglichkeiten auf, wie die Hafenregion bis Mitte des Jahrhunderts ihre Treibhausgasemissionen in Einklang mit den Klimaschutzzielen der EU drastisch senken kann.

Zu diesem Zweck wurden modellbasiert drei verschiedene prototypische Klimaschutzszenarien für die Hafenregion entwickelt. Das angenommene und je nach Szenario variierte Ambitionsniveau beim europäischen Klimaschutz hat dabei Rückwirkungen auf das zukünftige Absatzpotenzial der im Industriecluster vertretenen Unternehmen. Rückwirkungen ergeben sich z. B. in Bezug auf die Nachfrage nach fossilen Kraftstoffen im Verkehrssektor oder nach Strom aus Kohlekraftwerken.

► *Abbildung 5* zeigt zentrale Investitionen auf der Zeitachse mit den Verzweigungspunkten für die drei strategischen Entwicklungspfade für die Hafenregion hin zu einem low-carbon-industry-cluster. Im links dargestellten Pfad wurde das Hafencenter zu einer Kreislaufwirtschaft weitergedacht, während die beiden Pfade in der Mitte und rechts dargestellt beide auf Carbon Capture and Storage (CCS) als zentrale Strategie setzen und sich deshalb auch erst zu einem späteren Zeitpunkt verzweigen.

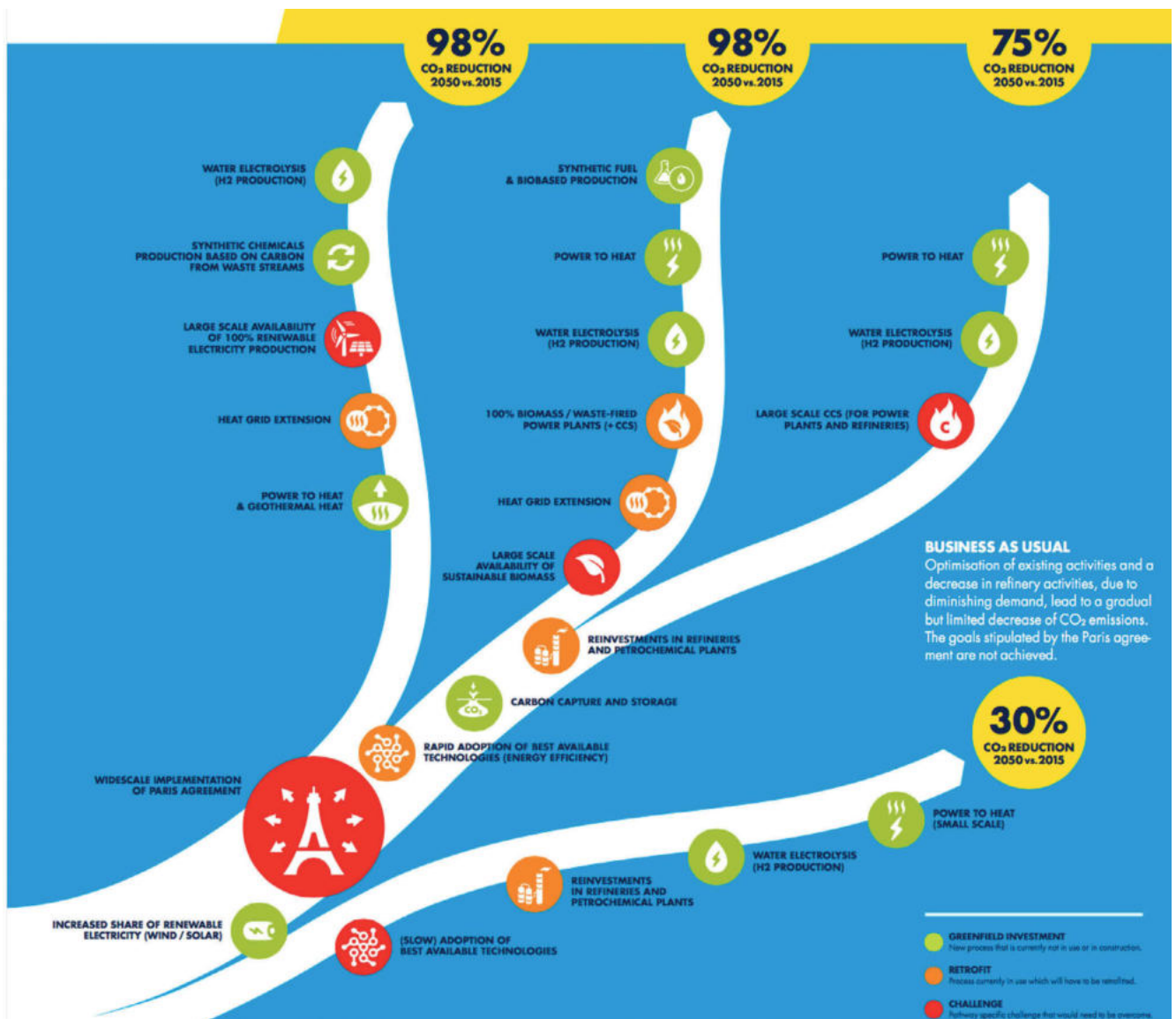


Abbildung 5

**Konzepte für Low-Carbon-Industry-Cluster:**  
Pfade für das Petrochemie-Cluster am Rotterdammer Hafen  
(Quelle: Port of Rotterdam Authority)

### Einsatz von Power-to-Heat und thermischen Speichern zur Flexibilisierung von Wärme- und Stromerzeugung

Das DLR untersucht Lösungsansätze für Flexibilisierungsoptionen im Bereich der Strom- und Wärmeerzeugung an integrierten Standorten der chemischen Industrie.

Die chemische Industrie hat einen relativ stetigen Bedarf an Dampf und Strom. Dieser wird heute aus zentralen KWK-Anlagen gespeist, die üblicherweise wärmegeführt betrieben werden (► *Abbildung 6*). Es sind hierbei die Bereiche der Versorgung und Netze (1), zentrale KWK-Erzeugung (2) und Endverbrauch (3) zu unterscheiden. Alle Bereiche bieten Möglichkeiten zur Flexibilisierung (► *Abbildung 6* in kursiver Schrift). Durch den volatiler werdenden Strommarkt

können wärmegeführte KWK-Anlagen nicht immer die notwendigen Erlöse erzielen. Eine Möglichkeit der gleichzeitigen Flexibilisierung von Wärmebezug und Eigenstromerzeugung bietet Power-to-Heat (P2H) in Kombination mit Wärmespeichern. Hierdurch können die Unternehmen durch den Bezug von niedrigpreisigem Strom zur Wärmeerzeugung profitieren, andererseits bleibt die Eigenstromerzeugung in KWK den Zeiten vorbehalten, in der ein Verkauf von Stromüberschüssen lukrativ ist. Die Integration von thermischen Hochtemperatur-Speichern bietet die Möglichkeit, Dampf aus dem Speicher für die Strom- und Wärmeerzeugung bereitzustellen und somit zusätzliches Flexibilisierungs- und damit Kostensenkungs- und CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial zu heben.

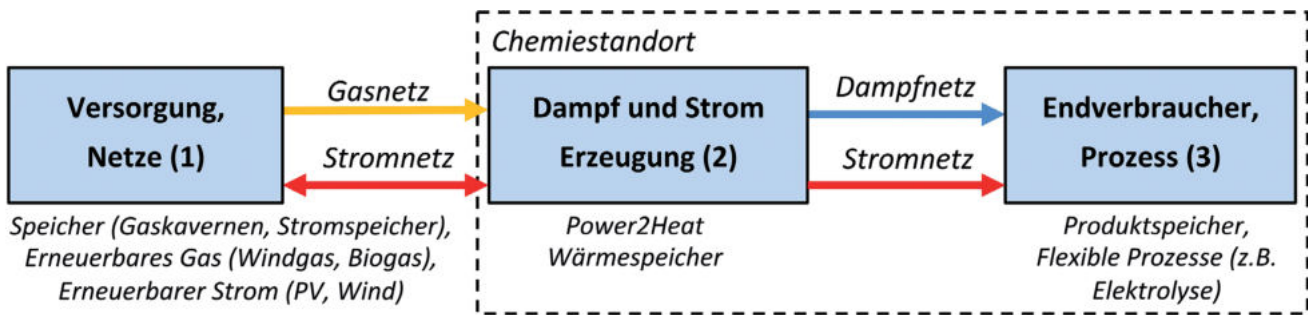


Abbildung 6  
**Einbettung der Dampferzeugung für Chemiestandorte in das Energiesystem**  
(Quelle: DLR)

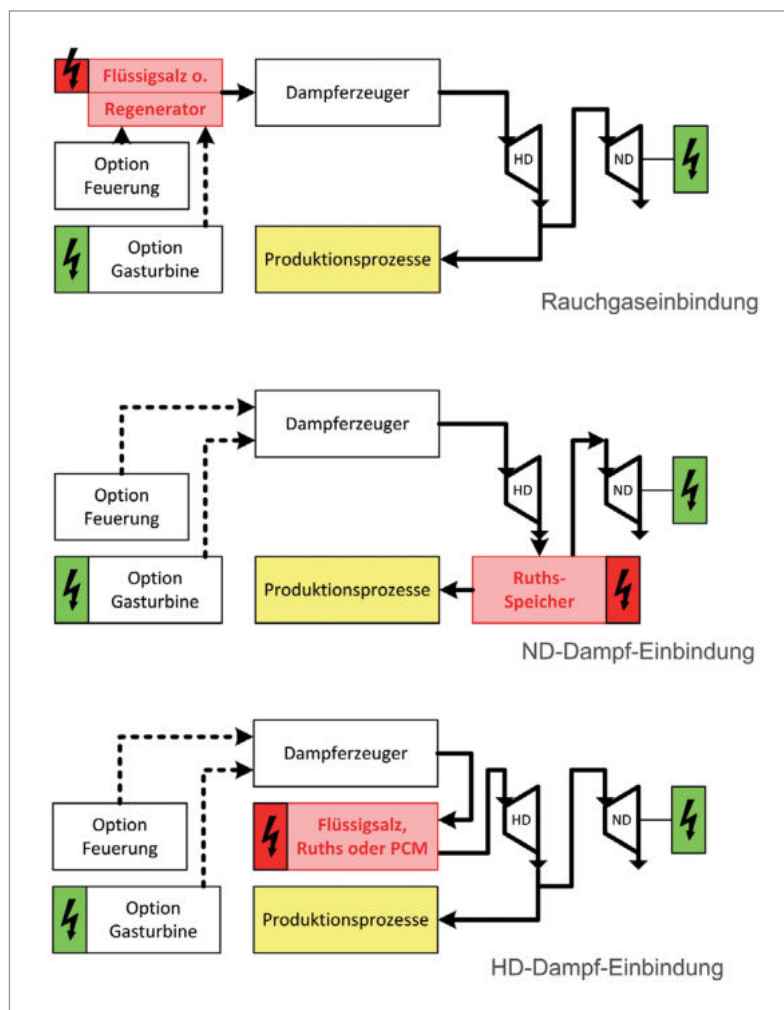
Die Bestimmung eines optimalen Integrationskonzeptes ist eine komplexe Fragestellung. ► **Abbildung 7** zeigt stark vereinfacht drei beispielhafte Optionen, wie sich thermische Speicher in zentrale KWK-Anlagen integrieren lassen. Die beispielhaft gezeigten Wärmespeichertechnologien im Hochtemperaturbereich sind Flüssigsalzspeicher (bekannt aus solarthermischen Kraftwerken), Regeneratoren bzw. Feststoffspeicher (bekannt aus der Eisen- und Stahl- sowie der Glasindustrie), Ruths-Speicher (bekannt aus der Prozessindustrie) und Latentwärmespeicher mit einem Phasenwechselspeichermaterial (engl.

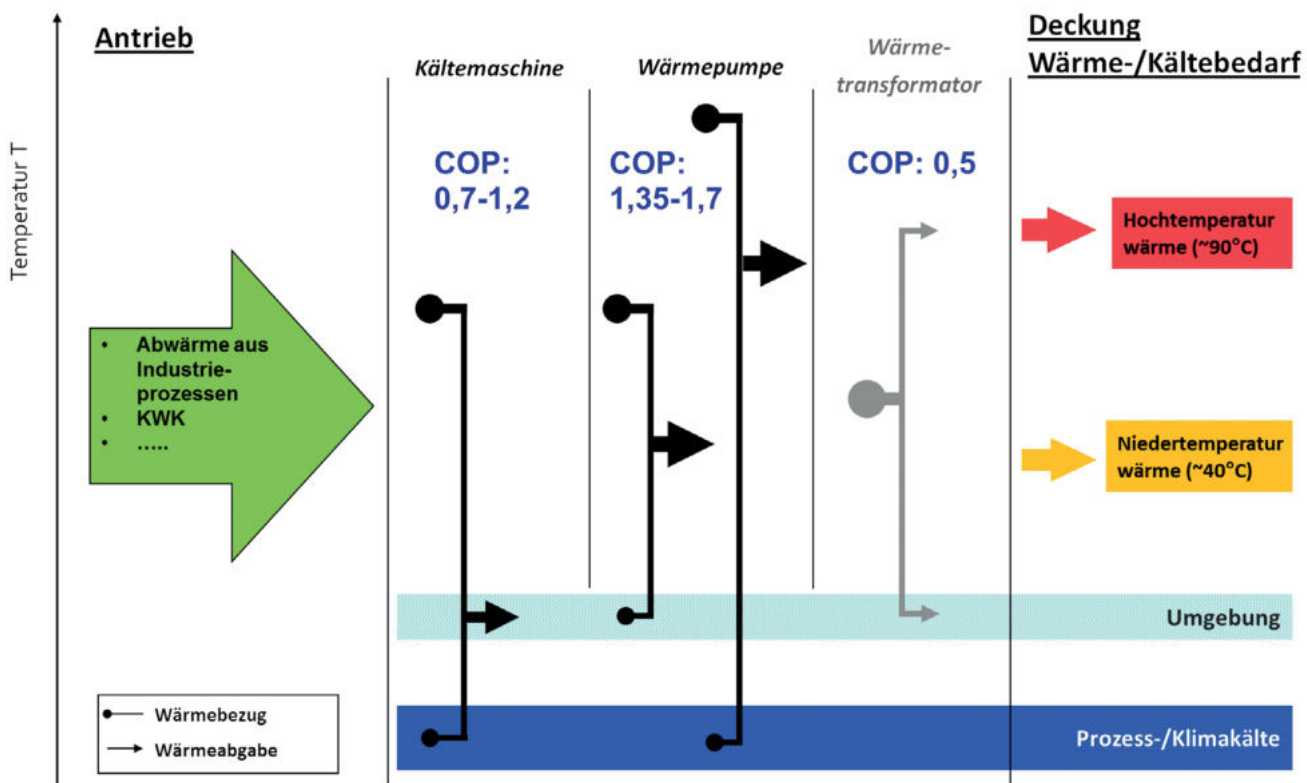
phase change material – PCM, Technologie zur Dampfspeicherung).

Flüssigsalzspeicher, Regeneratoren und Ruths-Speicher sind bereits kommerziell verfügbar. Flüssigsalzspeicher und Regeneratoren werden für den Bedarf in der Kraftwerkstechnik am DLR weiterentwickelt. PCM-Speicher befinden sich ebenfalls in der Forschung und Entwicklung, erste Prototypen wurden vom DLR in der Anwendungsumgebung getestet.

Abbildung 7  
**Integrationsoptionen für thermische Energiespeicher in KWK-Anlagen zur Strom- und Dampfversorgung von Chemieparks**  
(Quelle: DLR)

- Stromproduktion
- Power-to-heat
- Speicher





### Konzepte für die Kopplung von Abwärmennutzung und Power-to-Heat

Am ZAE Bayern werden Anlagenkonzepte für den Einsatz von Absorptionskältemaschinen bzw. Wärmepumpen zur Steigerung der Effizienz bei der Bereitstellung von Wärme und Kälte erforscht und entwickelt (► *Abbildung 8*). Dabei soll Wärme (z.B. Abwärme aus industriellen Prozessen) nutzbar gemacht werden, um Strom oder Brennstoffe als primäre Antriebsenergie zu ersetzen.

Die klassische Ausführung einer Absorptionskältemaschine ist einstufig. Grundsätzlich gilt: Je höher die Rückkühltemperatur (Temperatur der Umgebung) umso höher muss die Antriebstemperatur sein. Die so genannte Leistungszahl (COP) im Kühlbetrieb erreicht bei einstufigen Anlagen einen Wert von bis zu 0,8. Das heißt, 80% der eingesetzten Wärmeleistung können als Kühlleistung zur Verfügung gestellt werden. Zweistufige Anlagen erreichen einen COP von 1,2, benötigen jedoch deutlich höhere Antriebstemperaturen (mindestens 150 °C).

Die Abhängigkeit der Antriebstemperatur von den Rückkühlbedingungen ist insbesondere für Wärmepumpen wichtig. Bei steigendem Temperaturniveau der Wärmesenke (z. B. Heizung, Prozesswärme) muss auch die Antriebstemperatur steigen. Der Temperaturhub der Wärmepumpe (Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke) hat im

Gegensatz zur Kompressionswärmepumpe jedoch keinen signifikanten Einfluss auf den COP. Mit einer einstufigen Wärmepumpe kann ein Temperaturhub von bis zu 40 K realisiert werden, dabei kann ein COP von bis zu 1,8 erreicht werden. Wird die Wärmepumpe zweistufig ausgeführt, können Temperaturhübe von bis zu 80 K erreicht werden. Der COP für den Heizbetrieb sinkt dadurch jedoch auf Werte im Bereich von 1,35 ab.

Eine Sonderanwendung ist der sogenannte Wärmetransformator. Dieser nutzt typischerweise Wärme auf mittleren Temperaturniveau (50-70 °C) als Antriebsenergie. Durch den Wärmetransformator können z. B. Abwärmeströme auf niedrigem Temperaturniveau ohne Einsatz von weiterer thermischer Energie aufgewertet und so auf einem Temperaturniveau von z. B. 90 °C wieder nutzbar gemacht werden. Dabei können etwa 50% der eingesetzten Abwärme als nutzbare Wärme zurückgewonnen werden.

### Membranen für eine energieeffiziente Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Industrie und Kraftwerksprozessen (GREEN-CC)

Im Projekt GREEN-CC untersucht das IEK-1 des Forschungszentrums Jülich eine mögliche Integration von keramischen Sauerstofftransportmembranen (OTM)-Modulen in Kraftwerken und der Zementindustrie, wo an den korrespondierenden Oxyfuel-techniken für Carbon Capture geforscht wird.

*Abbildung 8*  
**Effizienzsteigerung durch Wärmetransformation mit Absorptionskältemaschinen, Wärmepumpen oder Wärmetransformator**  
(Quelle: ZAE Bayern)

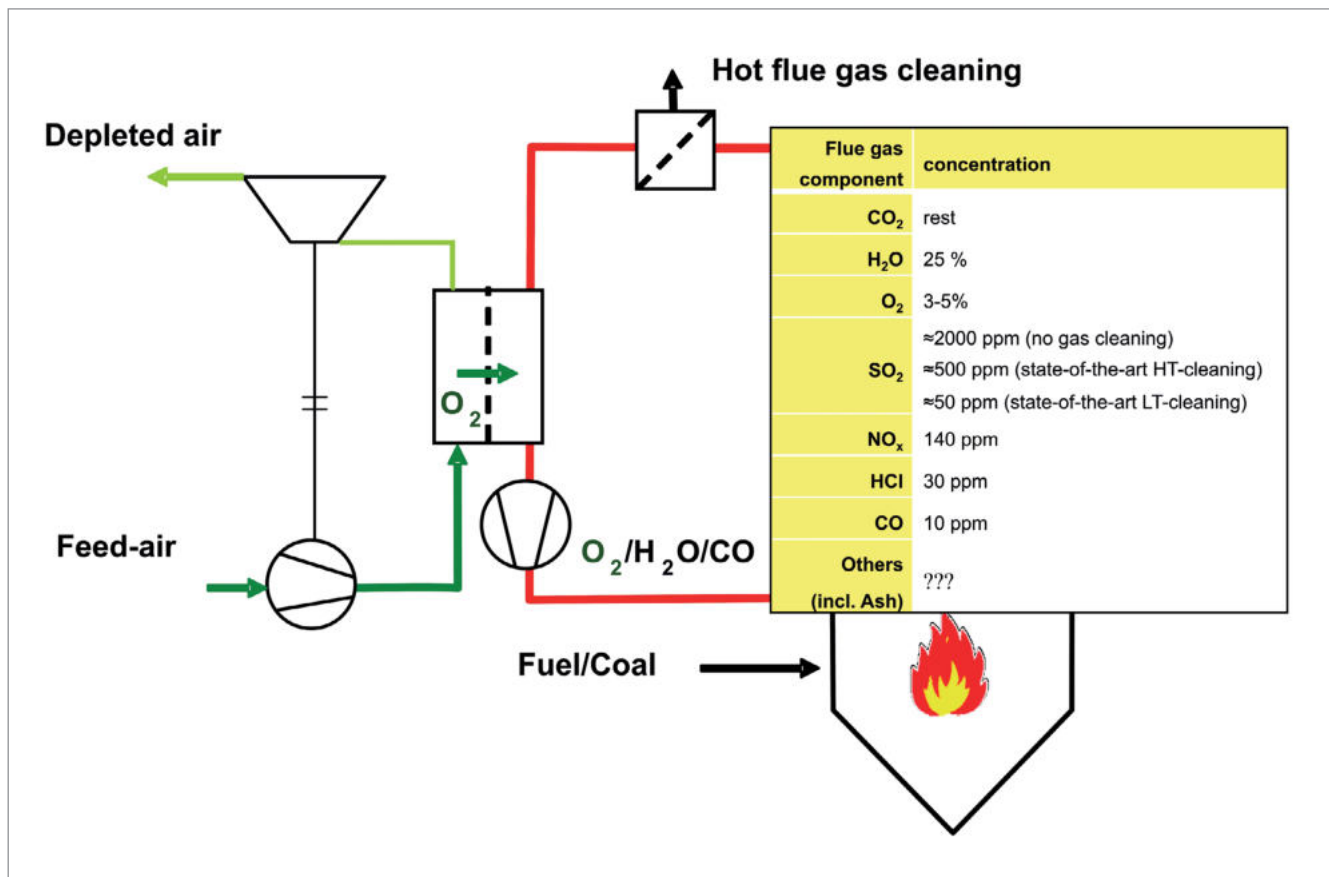


Abbildung 9  
**Beispiel der Anwendung von Sauerstofftransportmembranen (OTM) in einem Oxyfuel-Kraftwerk mit „4-end Integration“**  
 (Quelle: FZJ, IEK-1)

Oxyfuel-Konzepte bieten eine interessante Option, um relativ reine CO<sub>2</sub>-Abgasströme zu generieren, die sich dann mit relativ geringem weiterem technischen Aufwand geologisch einspeichern (CCS) oder in Produkten weiternutzen (CCU) lassen. Letzteres ist im Zuge der Energiewende eine vielversprechende Option um aus dem CO<sub>2</sub> mittels (überschüssiger) erneuerbarer Energie wieder einen Wertstoff wie z. B. Methan zu generieren. Im Oxyfuel-Prozess wird teilweise rezykliertes Abgas mit Sauerstoff angereichert und dem Brenner zugeführt, um einen kohlenstoffhaltigen Energieträger wie Kohle, Erdgas oder Biomasse zu verbrennen. Als Abgas entstehen dann in erster Linie CO<sub>2</sub> und Wasserdampf. Der zusätzliche Energieaufwand dieser Methode gegenüber herkömmlichen Verbrennungsverfahren entsteht durch die Notwendigkeit der Sauerstoffbereitstellung. Das herkömmliche Verfahren hierzu ist die Luftverflüssigung mittels Kryotechnologie, bei der der Sauerstoff bei Temperaturen unterhalb von -190 °C verflüssigt wird. Durch Verwendung von OTM-Modulen (Deibert et al. 2017) kann der Energieaufwand gegenüber der Luftverflüssigung jedoch deutlich gesenkt werden, wenn eine gute Integration in den jeweiligen Prozess gelingt.

OTM-Module können entweder im 3-End-Modus oder im 4-End-Modus betrieben werden. Im 3-End-Modus erzeugt das Membranmodul reinen Sauerstoff, der anschließend mit rezykliertem Rauchgas verdünnt wird, um den Verbrennungsprozess im Kessel zu steuern. In diesem Fall liegt auf der Permeatseite der Membran ein Unterdruck von ca. 100 mbar vor, was für solche Anwendungen energetisch ungünstig ist. Im 4-End-Modus (► [Abbildung 9](#)) wird das rezyklierte Rauchgas auf der Permeatseite der Membran als Transportgas eingesetzt, verdünnt direkt den Sauerstoff und ist somit verbrennungsbereit. Der Vorteil ist die Wärmenutzung des Rauchgases, die zur Aufheizung der Membran verwendet wird.

### Solare Prozesswärme

Das Fraunhofer ISE untersucht in mehreren Projekten eine mögliche zukünftige Rolle solarer Prozesswärme für industrielle Prozesse. Im Fokus stehen dabei die Untersuchung und Umsetzung von Demonstrationssystemen in verschiedenen industriellen Branchen, wie z. B. in Wäschereien, in der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie oder in der chemischen Industrie. Dies wird ergänzt durch Projekte zur Vereinfachung und Absicherung von Projektfinanzierungen, um den hohen Anforderungen der Industrie an Amortisierungszeiten von Maßnahmen gerecht werden zu können.

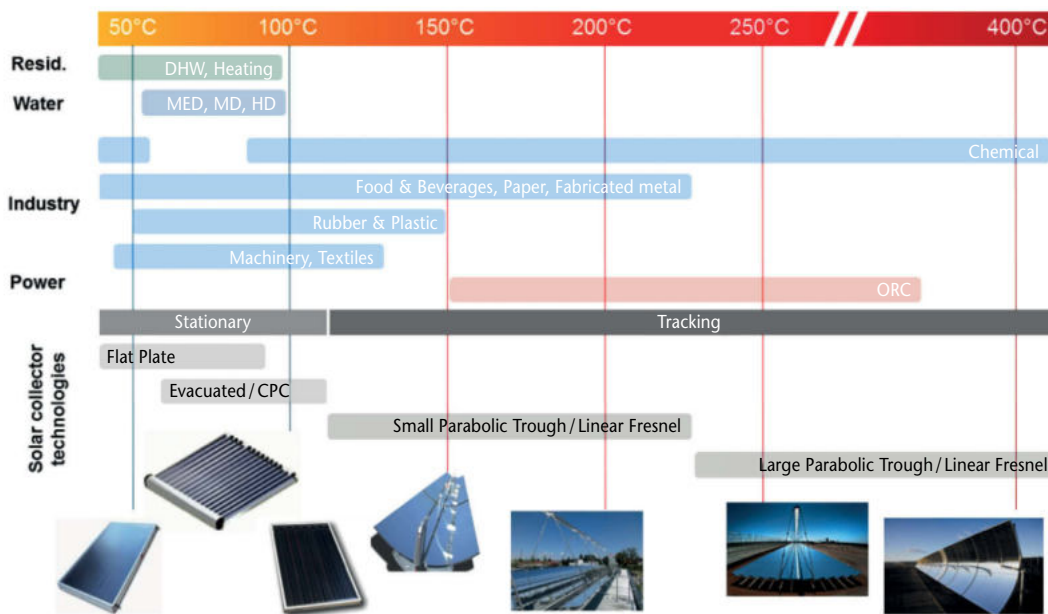


Abbildung 10

**Solare Wärme für industrielle Prozesse**

(Quelle: Fraunhofer ISE)

Die Versorgung von industriellen Prozessen bei niederen ( $T < 150\text{ °C}$ ) und mittleren Temperaturen ( $150\text{ °C} < T < 400\text{ °C}$ ), die gemeinsam etwa 50% des Wärmebedarfs in der Industrie ausmachen, kann mit existierenden Solartechnologien adressiert werden (► *Abbildung 10*). Lösungen für Hochtemperaturanwendungen ( $T > 400\text{ °C}$ ) sind im Vergleich dazu weniger weit entwickelt (bis zu TR-Level 5). Neben den eingesetzten Solartechnologien ist dabei auch die vom Standort abhängige, zur Verfügung stehende Solarstrahlung zu berücksichtigen. So eignen sich konzentrierende Kollektoren zur Erzeugung mittlerer und höherer Temperaturen vor allem an Standorten mit hoher Direktstrahlung.

Die Nutzung solarer Wärme für industrielle Prozesse ist immer auch gemeinsam mit weiteren Maßnahmen zu betrachten. Durch Einbindung thermischer Speicher können solare Prozesswärme und die Nutzung existierender Abwärmepotenziale sowohl auf Versorgungs- wie auch auf Prozessebene sinnvoll kombiniert werden. Thermische Speicher erhöhen das Potenzial, neben solarer Wärme und Abwärme auch weitere Quellen wie z. B. Biogas-/Biomasse, Power-to-Heat-Systeme, Wärmepumpen oder Geothermie zu einer hybriden Wärmeversorgung zu kombinieren um höhere Dekarbonisierungsgrade zu erreichen.

Das Fraunhofer ISE arbeitet in verschiedenen Projekten auch an neuen Materialien für Wärmetauscher- und Speicherlösungen.

**Quellen**

- Deibert, W., Ivanova, M.W., Baumann, S., Guillon, O., Meulenber W.A. (2017): Ion-Conducting Ceramic Membrane Reactors for High-Temperature Applications. *Journal of Membrane Science*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2017.08.016>.
- Fleiter, T., Rehfeldt, M., Pfluger, B. (2016): „A transition pathway for Germany's industry: which role for energy efficiency?“ ECEEE industrial summer study 2016.
- Hettesheimer, T. (2017): Technologiebericht 6.1 Energieeffiziente Prozesstechnologien innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende. Technologiebericht. Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.). <https://www.energieforschung.de/energie-und-ressourceneffizienz-industrie>.
- Lechtenböhrer S., Nilsson L.J., Åhman M., Schneider C. (2016): Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – implications for future EU electricity demand, *Energy* (2016), Volume 115, Part 3, 15 November 2016, Pages 1623–1631, doi: 10.1016/j.energy.2016.07.110

- Pfluger et al. (2017): „ Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“. Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Karlsruhe/Aachen/Heidelberg (2017)  
[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- Samadi, S., Lechtenböhmer, S., Schneider, C., Arnold, K., Fishedick, M., Schüwer, D., Pastowski, A. (2016): Decarbonization Pathways for the Industrial Cluster of the Port of Rotterdam. Final report on behalf of the Port of Rotterdam Authority. Wuppertal.
- Schneider, C., Schüwer, D. (2017): Technologiebericht 6.4 Low-carbon und ressourceneffiziente Industrie. Technologiebericht. Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.).  
<https://www.energieforschung.de/energie-und-ressourceneffizienz-industrie>.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland. Dessau; 2014.



# Power-to-X: Technologien für Übermorgen?!

Power-to-X-Technologien bezeichnen Verfahren zur Wandlung von elektrischer Energie in Wärme, chemische Energieträger oder Basischemikalien. [1, 2] Im vorliegenden Artikel wird eine engere Definition verwendet und nur die Wandlung von elektrischem Strom zu chemischen Sekundärenergieträgern bzw. Basischemikalien betrachtet. Weiterhin verstehen wir hier darunter nur solche Verfahren, welche auf dem (Vor-)Produkt Wasserstoff aufbauen. Die Prozesse unterscheiden sich in den Endprodukten, deren Aggregatzuständen, den chemischen Verbindungen und den Möglichkeiten zur Einbindung in bestehende Infrastrukturen wie das Gasnetz oder die Kraftstoffdistribution. Die chemischen Energieträger (Wasserstoff, Methan, Methanol, Oligomere wie OME etc.) können zudem gelagert, weiterverarbeitet und wieder zurückgewandelt werden – Eigenschaften, die für Wärme nur sehr eingeschränkt gelten.

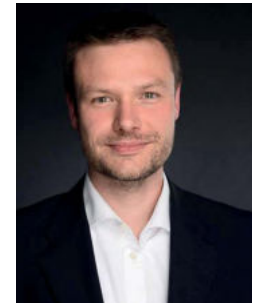
## Bedarfsanalyse

In der Wissenschaft wird besonders eine Frage kontrovers diskutiert: Welcher Bedarf an chemischen Energieträgern aus Power-to-X-Verfahren besteht im transformierten Energiesystem? [2–5] Der folgende Beitrag kann darauf keine quantifizierte Antwort geben, sondern es sollen die Verlaufslinien des Diskurses aufgezeigt werden, um davon abgeleitet den Forschungs- und Entwicklungsbedarf einschätzen zu können.

Zunächst wird anhand einer ex-ante-Betrachtung der Bedarf an chemischen Energieträgern vom Ziel aus kommend betrachtet.

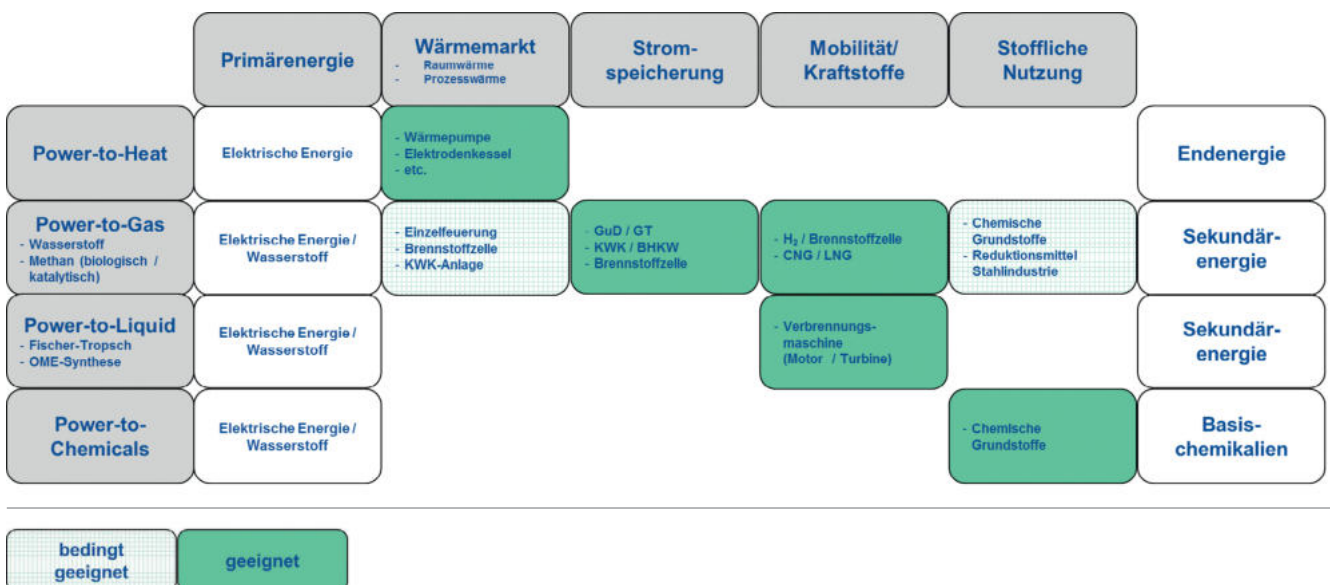
Die Ziele und internationalen Vereinbarungen der Bundesregierung sehen eine Minderung der Treibhausgasemissionen bis 2050 von 80 bis 95 % gegenüber dem Bezugsjahr 1990 vor (► *Abbildung 2*). Zur Einhaltung der 1,5 °C–2 °C -Grenze (Abkommen der UN-Klimakonferenz 2015 in Paris) ist die Erreichung der 95 %-Minderung erforderlich. Von diesem Ziel ausgehend verbleibt für Deutschland in 2050 noch ein jährliches Emissionsbudget von durchschnittlich 63 Mio. t CO<sub>2aq</sub>. Doch allein der landwirtschaftliche Sektor trägt nach aktuellem Stand hierzu schon mit Emissionen zwischen 60 und 70 Mio. t CO<sub>2aq</sub> pro Jahr bei. [6] Demnach ist zur Erreichung des Zielkorridors ein kompletter Verzicht auf fossile Energieträger in allen Energiesektoren erforderlich (Stromerzeugung, Wärmemarkt, Verkehr und Industrie), wenn an der Nahrungsmittelproduktion keine nennenswerten Änderungen vorgenommen werden können.

Die Einhaltung des verfügbaren CO<sub>2aq</sub>-Budgets einerseits und die Erwartung bezüglich der technischen und wirtschaftlichen Entwicklung andererseits, spannen dann den Bedarfsraum für synthetische Kraftstoffe auf, d.h. für solche aus Power-to-X-Technologien.



- ZSW  
Simon Schwarz  
simon.schwarz@zsw-bw.de
- Dr. Ulrich Zuberbühler  
ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de
- Maike Schmidt  
maike.schmidt@zsw-bw.de
- DBFZ  
Dr. Jörg Kretzschmar  
joerg.kretzschmar@dbfz.de
- DLR  
Prof. Dr. Andreas Friedrich  
andreas.friedrich@dlr.de
- Fraunhofer IEE  
Dr. Ramona Schröer  
ramona.schroerer@iee.fraunhofer.de

Abbildung 1  
**Definition des Technologiefeldes Power-to-X mit Beispieltechnologien und Endprodukten.**  
(Darstellung ZSW)



**Fraunhofer ISE**  
 Dr. Christopher Hebling  
 christopher.hebling@ise.fraunhofer.de

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

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

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

**UFZ**  
 PD Dr. Falk Harnisch  
 falk.harnisch@ufz.de  
 Dr. Thomas Nagel  
 thomas.nagel@ufz.de

Erwartungslinien der technischen Entwicklung verlaufen entlang des Elektrifizierungspotenzials im Straßen(last)verkehr, der Bedarfsentwicklung im See- und Luftverkehr aber auch der Sanierungsrate von Wohngebäuden oder der Entwicklung von Flexibilitäts- und Speicheroptionen im Stromsystem.

Abhängig von den gewählten Annahmen lässt sich ein eher geringer Bedarf an Power-to-X ebenso begründen [7], wie auch ein sehr hoher Bedarf [8]. Je ambitionierter das angestrebte Ziel und umso weniger systemumwälzende Technologieinnovationen angenommen werden, desto größer wird der Leistungs- und Energiebedarf für Power-to-X. Der mögliche Rahmen umfasst also einen Bereich von wenigen GW Leistung und entsprechend nur einigen TWh Speicherbedarf bis hin zu einer Größenordnung unseres heutigen Stromsystems. Zum Vergleich: das deutsche Stromsystem hat einen Spitzenlastbedarf von rund 80 GW bei einer Energieabgabe von rund 490 TWh pro Jahr (Stand 12.2017, www.smard.de).

haben individuelle Stärken und Schwächen. Daher ist eine parallele Weiterentwicklung aller Optionen angezeigt. Vor allem, da heute noch nicht abschließend geklärt werden kann, welche Faktoren (bspw. Dynamik der Fahrweise, elektrische Effizienz, Investitionskosten, Einbindung in die bestehende Infrastruktur etc.) zukünftig an Bedeutung gewinnen oder verlieren werden [2–4, 9].

### Hemmnisse

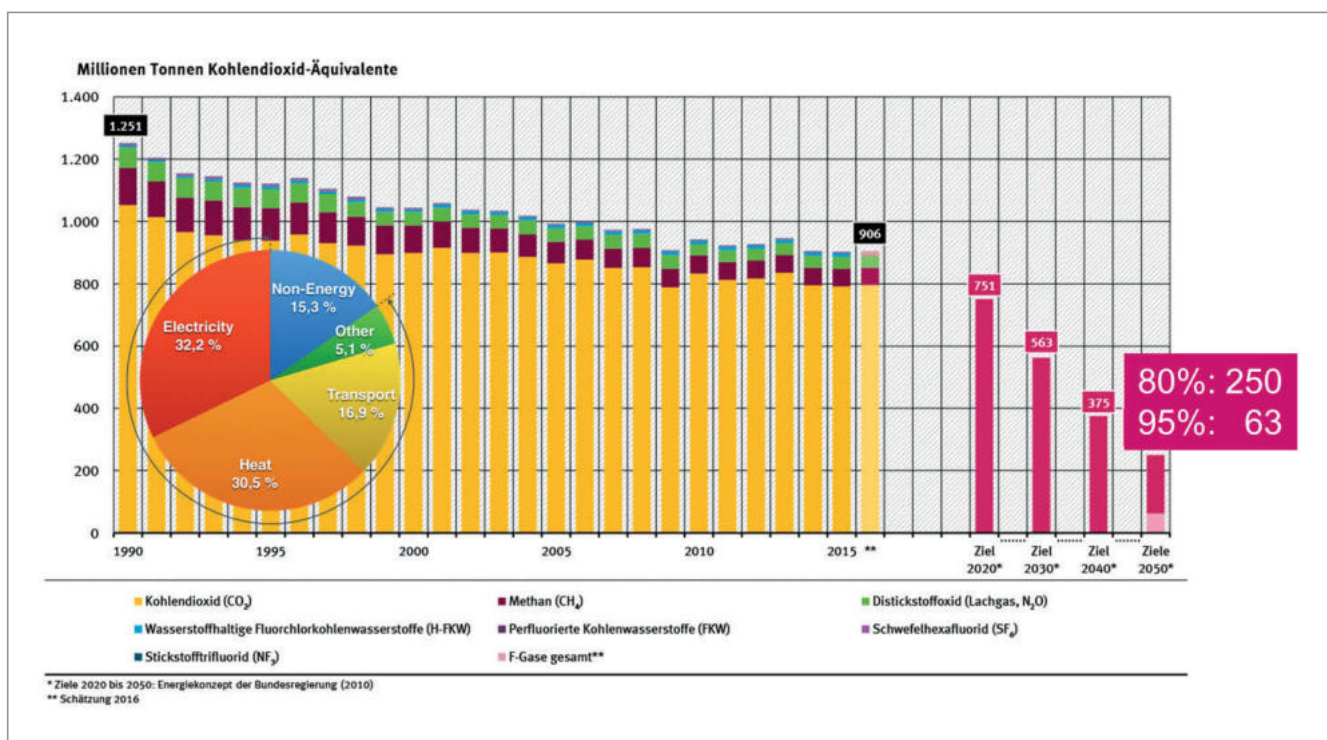
Power-to-X findet heute noch keinen großtechnischen Einsatz, da konventionelle und alternative Technologien betriebswirtschaftlich günstiger sind. ► **Abbildung 4** zeigt die Herausforderung von Power-to-X an einem vereinfachten Schaubild: Bei niedrigen Volllaststunden dominieren die Investitionskosten (blaue Kurvenschar) die Erzeugungskosten. Je länger die jährliche Laufzeit einzelner Anlagen, desto stärker werden die Erzeugungskosten durch die Stromkosten vorgegeben. Daraus lassen sich drei Stellschrauben zur Stärkung der Wirtschaftlichkeit von Power-to-X ausmachen:

- a) Durch Verfahrensentwicklung (Upscaling und Numbering-up) und Technologieentwicklung (Prozessintensivierung durch Prozessintegration und neue Reaktortechnologien, Fertigungstechnik) sinken die Investitionskosten. Die blaue Kurvenschar verschiebt sich nach links unten.

### Stand der Technik

Power-to-X ist ein Sammelbegriff für eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien, ein allumfassender Stand der Technik kann also nicht dargelegt werden. ► **Abbildung 3** zeigt die Bandbreiten der Technology-Readiness-Level (TRL) in den vier Prozessschritten Wasserstoffherstellung, Power-to-Gas, Power-to-Liquid und Power-to-Chemicals. Alle Verfahren

Abbildung 2  
**Treibhausgasemissionen seit 1990, Ziele für 2050 und Aufteilung der Emissionen auf Sektoren (Basis 2015)**  
 Quelle: [6] Umweltbundesamt. Nationale Treibhausgas-Inventare 1990 bis 2015 (Stand 02/2017) und Schätzung für 2016 (Stand 3/2017)



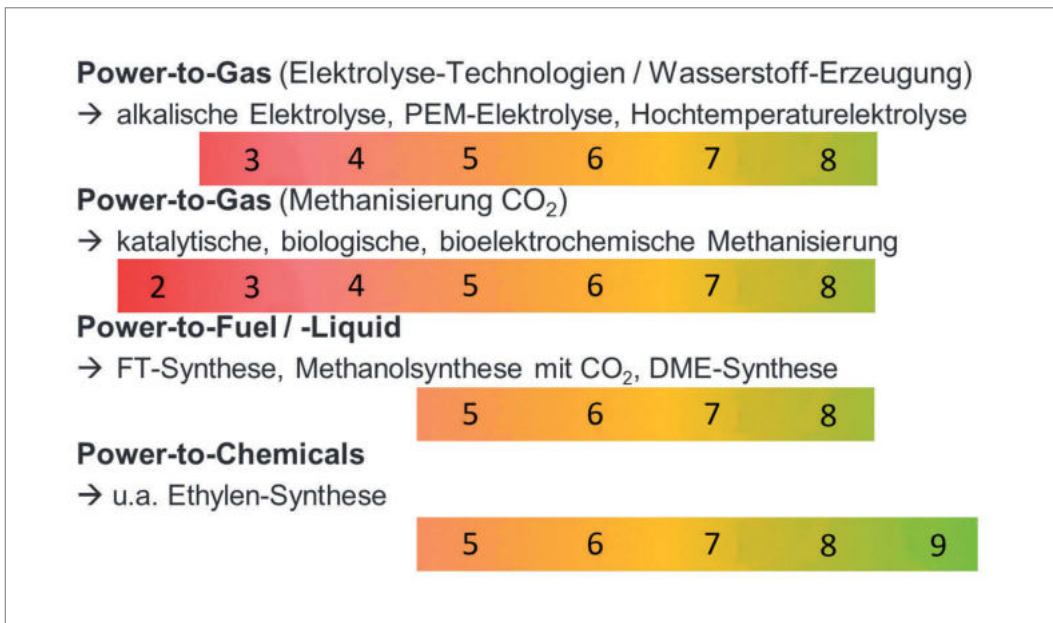


Abbildung 3  
**Power-to-X-Technologien**  
 (Auflistung nicht abschließend):  
 Übersicht des Stands der Technik.  
 TRL = Technology Readiness Level  
 (Darstellung ZSW basierend auf [2-4, 9-11])

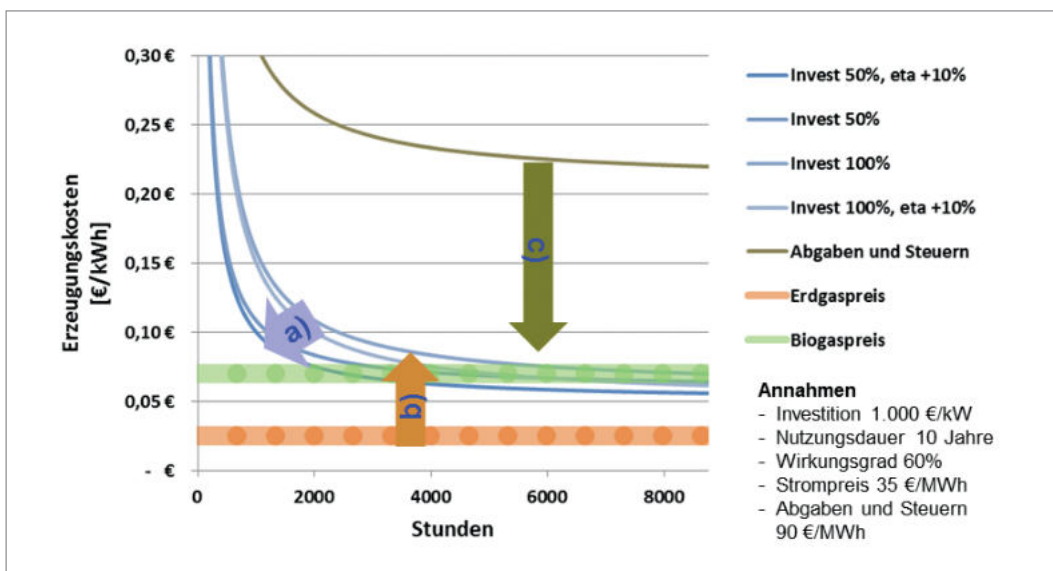


Abbildung 4  
**Erzeugungskosten und Investitionskosten**  
 in Abhängigkeit der Betriebsstunden  
 am Beispiel Power-to-Gas  
 (Darstellung ZSW)

- b) Durch eine Internalisierung externer Kosten des Klimawandels werden die Kosten für fossile Energieträger dem realen Preis angepasst. Das bewirkt eine Annäherung der Erzeugungskosten und Preise für regenerative und fossile Energien. Der braune Balken (Erdgaspreis) verschiebt sich in Richtung des grünen Balkens (Biogaspreis).
- c) Durch Anpassung des ordnungsrechtlichen Rahmens kann ein Level-Playing-Field entstehen, in welchem eine Systemkopplung vollzogen werden kann. Aktuell werden die systemdienlichen Eigenschaften von Power-to-X nicht honoriert, weswegen die volle Umlagen- und Abgabenlast auf den PtX-Geschäftsmodellen lastet. Eine Anpassung würde ein Verschieben der olivgrünen Kurve in Richtung der blauen Kurven bewirken.

### Fazit

Power-to-X ist vielseitig und bietet einen Lösungsvektor für ungelöste Fragestellungen der Energiewende: saisonale Speicherung, Sektorkopplung, Herstellung von Kraftstoffen sowie Grundchemikalien. Die Erzeugung von Wasserstoff oder Synthesegas bildet für die chemischen Verfahren den Ausgangspunkt. Dazu können vorhandene Speicher- und Verteilinfrastrukturen, sowie die bestehenden Anwendungen in Haushalten, Verkehr und Industrie ohne Einschränkungen weiter genutzt werden. Dennoch ist die technologische Entwicklung von Power-to-X als sehr heterogen zu bewerten, weswegen weitere F&E-Aktivität zur Technologieentwicklung sowie Erhöhung der Technologiereife

erforderlich sind. Insbesondere für die Erreichung der Zielkosten durch Verfahrensentwicklung und Prozessoptimierung (inkl. Fertigungstechnik) sind weitere Entwicklungsanstrengungen nötig.

Ein wichtiger Hebel zur Ausschöpfung der Potenziale, zur Stärkung der Sektorenkopplung und generell zur Etablierung der Technologie ist die Internalisierung externer Kosten des Klimawandels z.B. durch eine CO<sub>2</sub>-Abgabe. Dadurch würde ein Level-Playing-Field geschaffen werden, sodass die erforderliche Systemkopplung vollzogen werden kann.

Letztlich wird erwartet, dass der Leistungsbedarf allein schon national, sicher jedoch im internationalen Umfeld im GW-Maßstab realisiert wird. Damit bietet sich für Deutschland eine Technologieoption zur Bewältigung der inländischen Herausforderungen der Energiewende, wie auch eine Exportchance für den Anlagenbau. Darüber hinaus können Power-to-X-Technologien den internationalen Handel mit erneuerbaren Energien erheblich beschleunigen, da gasförmige und flüssige synthetische Energieträger vergleichsweise einfach in die bestehenden Handelswege eingebracht werden können.

Der Bedarf an Power-to-X wird voraussichtlich nicht linear wachsen, sondern sprunghaft zunehmen. Daher ist es ratsam Power-to-X bereits heute zu einem marktfähigen Produkt zu entwickeln. Eine Markteinführung wird diese Entwicklung unterstützen und ist gerechtfertigt, weil das Technologiefeld mittelfristig für das Energiesystem notwendig und die Wirtschaft interessant sein wird.

## Quellenverzeichnis

1. SEITZ, Antje, ZUNFT, Stefan und HOYER-KLICK, Carsten. Technologiebericht 3.3b Energiespeicher (thermisch, thermo-chemisch und mechanisch) innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken, 2017.
2. BRINNER, Andreas, SCHMIDT, Maïke, SCHWARZ, Simon, WAGENER, Leon und ZUBERBÜHLER, Ulrich. Technologiebericht 4.1 Power-to-Gas (Wasserstoff) innerhalb des Forschungsprojektes TF\_Energiewende. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken, 2017.
3. SCHMIDT, Maïke, SCHWARZ, Simon, STÜRMER, Bernd, WAGENER, Leon und ZUBERBÜHLER, Ulrich. Technologiebericht 4.2a Power-to-Gas (Methanisierung chemisch-katalytisch) innerhalb des Forschungsprojektes TF\_Energiewende. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken, 2017.
4. KRETZSCHMAR, Jörg. Technologiebericht TF 4.2b Power-to-gas (Methanisierung biologisch) innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken, 2017.
5. SCHEMME, Steffen, SAMSUN, Remzi Can, PETERS, Ralf und STOLTEN, Detlef. Power-to-fuel as a key to sustainable transport systems – An analysis of diesel fuels produced from CO<sub>2</sub> and renewable electricity. *Fuel*. Oktober 2017. Jg. 205, S. 198–221. DOI 10.1016/j.fuel.2017.05.061.
6. ÖRTL, Elke. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Umweltbundesamt, 2017.
7. ÖKO-INSTITUT und FRAUNHOFER ISI. Klimaschutzszenario 2050 2. Endbericht. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015.
8. NITSCH, Joachim. Die Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung – Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.. 2016.
9. ARNOLD, Karin, KOBIELA, Georg und PASTOWSKI, Andreas. Technologiebericht 4.3 Power-to-liquids/-chemicals innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken, 2017.
10. HARNISCH, Falk und URBAN, Carolin. Electrobio-refineries: Unlocking the synergy of electrochemical and microbial conversions. *Angewandte Chemie International Edition* [online]. 13. Dezember 2017. DOI 10.1002/anie.201711727.
11. HAAS, Thomas, KRAUSE, Ralf, WEBER, Rainer, DEMLER, Martin und SCHMID, Guenter. Technical photosynthesis involving CO<sub>2</sub> electrolysis and fermentation. *Nature Catalysis*. Januar 2018. Jg. 1, Nr. 1, S. 32–39. DOI 10.1038/s41929-017-0005-1.

# Stromspeicher im Energiesystem der Zukunft

In einem Energiesystem, das zunehmend durch die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien dominiert wird, müssen zur Wahrung der Versorgungssicherheit und der Versorgungsqualität neue Wege beschritten werden. Die Aufgaben zur Sicherstellung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung sind neu zu verteilen.

Zu den Aufgaben für Netzstabilisierung und Aufrechterhaltung der Stromqualität zählen

- Blindleistungsbereitstellung
- Phasensymmetrisierung
- Flickerkompensation
- Spannungshaltung

Für die Übernahme dieser Aufgaben sind Technologien gefragt, die diese Fähigkeiten haben:

- kurzfristig sehr hohe Leistungen zur Verfügung stellen können
- Lastspitzen ausgleichen mittels load-levelling und peak-shaving .
- Regelenergie (Minutenreserve, Primär- und Sekundärregelleistung) bereitstellen
- Im Tagesverlauf müssen kurzfristige Prognoseabweichungen ebenso wie mehrstündige Erzeugungsspitzen oder -flauten ausgeglichen werden können.
- Auch während mehrtägiger Großwetterlagen müssen die Energiebereitstellung sichergestellt und jahreszeitliche Erzeugungsschwankungen in das Energiesystem sinnvoll eingebunden bzw. ausgeglichen werden. Für diese Aufgaben bedarf es Technologien, die große Energiemengen speichern können.

Alle genannten Aufgaben können von unterschiedlichen Stromspeichertechnologien übernommen werden, wobei jede Technologie ihre eigenen Stärken und Schwächen aufweist. Je nach Situation und spezifischer Aufgabenstellung eignen sich verschiedene Technologien oder Kombinationen von Technologien besonders.

Basierend auf den Analysen des Fraunhofer IWES im Rahmen des Forschungsprojekts TF-Energiewende [1] ist zu konstatieren, dass Forschungs- und Entwicklungsstand der einzelnen Stromspeichertechnologien noch sehr verschieden sind, ebenso wie ihre Entwicklungsdynamik, die Entwicklungspotenziale und die Anwendungsfelder. Während Pumpspeicherkraftwerke technologisch ausgereift und im Markt

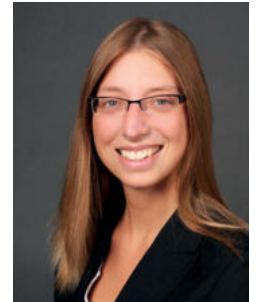
etabliert sind, ihre weitere Verbreitung jedoch an der fehlenden Verfügbarkeit weiterer geeigneter Standorte scheitert, stehen gerade die elektrochemischen Speicher noch am Anfang der Marktdurchdringung und erschließen sich erst sukzessive immer weitere Anwendungsfelder. Daher konzentriert sich im Bereich der Pumpspeicherkraftwerke die Forschung auf Einzelprojekte zur Entwicklung alternativer Ansätze wie das Offshore-Pumpspeicherkraftwerk im Projekt STENSEA des Fraunhofer IWES [3], während im Bereich der elektrochemischen Speichertechnologien die Forschungsaktivitäten sehr breit gestreut sind.

Im Forschungsprojekt „Technologien für die Energiewende“ lag der Fokus auf der Analyse des Entwicklungsstands und der erforderliche Forschungsaktivitäten zur Erschließung der verbleibenden Entwicklungspotenziale der elektrochemischen Speicher [1]. Innerhalb dieses ebenfalls breiten Themenfeldes wurden wiederum diejenigen Technologien vertieft analysiert, die noch über ein entsprechendes Entwicklungspotenzial verfügen. Daher wurden Lithium-basierte und Natrium-basierte Systeme ebenso wie Redox-Flow-Batterien einer vertieften Analyse unterzogen.

## Lithium-basierte Systeme

Unter den verschiedenen Typen der Lithium-basierten Batterien sind die Lithium-Ionen-Batterien die am weitesten entwickelten Systeme, die auch schon in vielen Anwendungsbereichen der Konsumerelektronik (z.B. Laptop, Smartphone, Akkuschauber) kommerziell eingesetzt werden.

Das Funktionsprinzip der Lithium-Ionen-Batterie basiert auf dem Austausch von Lithium zwischen den Aktivmaterialien der Anode und Kathode. Bei der Entladung diffundiert Lithium vom Inneren der Kohlenstoffanode zu deren Oberfläche. An der Grenzfläche zwischen Anode und Elektrolyt wandelt sich das Lithium in ein Lithium-Ion unter Freisetzung eines Elektrons um. Dieses Lithium-Ion wird über den Elektrolyten zur Kathode transportiert. Auf der Kathodenoberfläche wird ein Elektron aufgenommen, um Lithium zu bilden, das schließlich in das Innere der Kathode diffundiert und dort interkaliert. Der Ladevorgang findet vollständig analog in umgekehrter Richtung statt [1].



ZSW

Maïke Schmidt  
maïke.schmidt@zsw-bw.de

DLR

Prof. Dr. Arnulf Latz  
arnulf.latz@dlr.de

Prof. Dr. Andreas Friedrich  
andreas.friedrich@dlr.de

ISE

Dr. Matthias Vetter  
matthias.vetter@ise.fraunhofer.de

ISFH

Matthias Littwin  
littwin@isfh.de

Michael Knoop  
m.knoop@isfh.de

IEE (vorm. IWES)

Matthias Puchta  
matthias.puchta@iee.fraunhofer.de

IZES

Dr. Bodo Groß  
gross@izes.de

FZ Jülich

Prof. Dr. Olivier Guillon  
o.guillon@fz-juelich.de

Prof. Dr. Dina Fattakhova  
d.fattakhova@fz-juelich.de

ZAE Bayern

Petra Dotzauer  
petra.dotzauer@zae-bayern.de

KIT

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

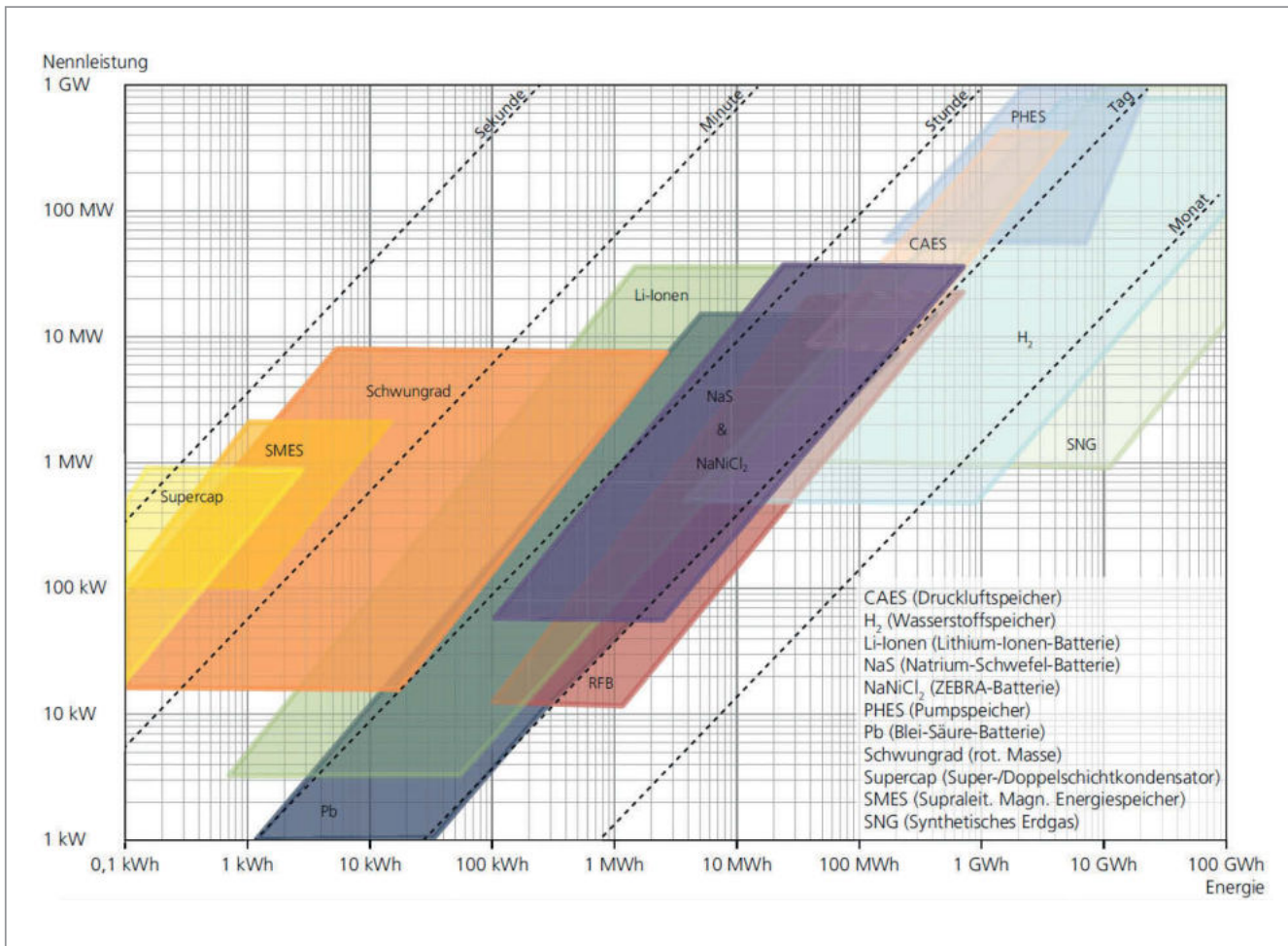


Abbildung 1  
**Klassifizierung elektrochemischer stationärer Energiespeicher nach Energie und Leistung im Vergleich zu anderen Speichertechnologien. [2]**

Die Herausforderung für ihren breiten Einsatz im Energiesystem der Zukunft liegt in der Hochskalierung bei gleichzeitig deutlicher Erhöhung der Energiedichte und der Reduktion der Kosten. Dies gilt sowohl für ihren Einsatz als stationäre Speicher (z. B. PV-Heimspeicher) als auch für den Einsatz in der Elektromobilität.

Auch wenn in den letzten Jahren bereits sehr große Entwicklungsfortschritte erzielt werden konnten, sind die Entwicklungspotenziale dieser Technologie noch lange nicht ausgeschöpft. Sie wird auch von der EU als eine Schlüsseltechnologie betrachtet, weshalb im SET-Plan eigenständige Entwicklungsziele für die Lithium-Ionen-Batterie für das Jahr 2030 festgelegt wurden [4]. Diese beinhalten unter anderem eine Verdopplung der gravimetrischen Energiedichte von 85–135 Wh/kg auf > 250 Wh/kg, eine Reduktion der Ladezeit von 30 auf 3 Minuten, eine Verdopplung der Lebensdauer, bis zu einer Verzehnfachung der Zyklenzahl in der stationären Anwendung (Zielwert: 10.000 Zyklen) sowie eine Reduktion der Kosten für Batteriepacks für die mobile Anwendung von heute

180–285 €/kWh auf 75 €/kWh. Entsprechend intensiv sind die nationalen und internationalen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Die Lithium-Ionen-Batterien befinden sich schon in der Kommerzialisierungsphase, so dass auch für Neuentwicklungen mit einem Markteintritt bis 2020 gerechnet werden kann.

Auch an den nächsten Generationen der Lithium-basierten Systeme wird bereits intensiv entwickelt, wobei von einer Kommerzialisierung bei Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Systemen erst bis 2030 auszugehen ist. Für Post-Lithium-Ionen Batterien, die Lithium in metallischer Form beinhalten, wird von der Kommerzialisierung erst bis 2040 ausgegangen [1]. Sie können jedoch nach heutigem Kenntnisstand vor allem die erwarteten Sprünge in der Energiedichte liefern.

Batterien, die Lithium in metallischer Form als Anode verwenden, funktionieren jedoch grundsätzlich anders als Lithium-Ionen-Batterien, denn die Kathode kann beispielsweise eine Gasdiffusionselektrode (Li/

Luft) oder schwefelhaltige Graphitstruktur sein (Li/S). Aufgrund des metallischen Lithiums ist der potenzielle Energiegehalt dieser Technologien wesentlich höher als bei den Lithium-Ionen-Batterien. Dies ist der Grund für die vielfältigen F&E-Tätigkeiten im Bereich der Post-Lithium-Ionen-Batterien, die überwiegend die Leistungsfähigkeit und Stabilität der Technologien adressieren [1].

## Natrium-basierte Systeme

Ein weiterer wichtiger betrachteter Technologiebereich sind die Natrium-basierten Systeme. Hierbei handelt es sich um Hochtemperaturbatterien. Es dominieren Natrium-Schwefel- und Natrium-Nickel-Chlorid-Systeme. Bei diesen Systemen spielen der Elektrolyt und der Separator eine wesentliche Rolle in Bezug auf Leistungsdichte, Stabilität und Sicherheit. Natrium-basierte Thermalbatterien erfordern hohe Temperaturen für die Aufrechterhaltung des flüssigen Zustands (Elektroden und/oder Elektrolyt) und die Ionenleitfähigkeit des Separators. So wird der große Vorteil einer vernachlässigbaren Selbstentladung dieser Systeme durch die thermischen Verluste und den Energiebedarf der Heizung des Batteriesystems reduziert. Darüber hinaus ist die wirtschaftliche Anwendbarkeit von Hochtemperaturbatterien meist auf Systeme im großen Maßstab beschränkt, da nur in diesen Fällen die Oberfläche und damit die thermischen Verluste entsprechend minimiert werden können [1].

Die genannten Systeme befinden sich in der Kommerzialisierungsphase, wobei es nur einzelne Anbieter im asiatischen Raum gibt. In Japan wird die Technologie aktuell bereits zur Stabilisierung der Stromversorgung eingesetzt.

Um das in Natrium-basierten Systemen schlummernde Potenzial einer sehr niedrigen Entladungsrate, einer hohen Zyklenzahl, langer Lebensdauer sowie einer relativ einfachen Produktion voll ausschöpfen zu können, müssen Niedertemperatur-Materialien entwickelt werden. Das kostengünstige und hochverfügbare aktive Material, insbesondere im Vergleich zu Lithium, macht diesen Batterietyp zu einem vielversprechenden Kandidaten für eine langfristige Technologie in der stationären Energiespeicherung.

## Redox-Flow-Batterien

Die dritte intensiv betrachtete Technologie ist die Redox-Flow-Batterie (RFB). Ihr Funktionsprinzip entspricht dem wiederaufladbarer Brennstoffzellen. Ein großer Vorteil der Redox-Flow-Batterie gegenüber herkömmlichen Batteriesystemen, ist die Trennung von Leistung (Wahl der Fläche und Anzahl der Stacks) und Energie (Wahl des Elektrolyten und der Größe des Tanks mit skalierbarem Volumen), also Reaktionsort und Lagerung. Auf diese Weise kann eine Erhöhung des Volumens und damit der gespeicherten Energie auf einfache und kostengünstige Weise erfolgen, so dass auch größere Energiemengen stationär gespeichert werden können.

Da in der Redox-Flow-Batterie die aktiven Materialien in den Elektrolyten aufgelöst werden und der Elektronentransfer zwischen der gelösten aktiven Spezies und der festen Elektrode stattfindet, finden keine (De-)Interkalations- und Festkörper-Diffusionsprozesse statt (ähnlich Brennstoffzellen), was die Elektrodendegradation minimiert.

Darüber hinaus bieten Redox-Flow-Batterien ein schnelles Ansprechverhalten sowie breite Leistungs- und Entladezeitbereiche (breiter Anwendungsbereich), geringe Selbstentladungsraten durch die Lagerung in externen Tanks und ein hohes Maß an Sicherheit durch die durchflussgesteuerte Reaktion. Dennoch machen ihre geringe Leistungsdichte und ihre Energiedichte sie für mobile Anwendungen ungeeignet [1].

Trotz großer Forschungsaktivitäten in allen genannten Bereichen (► [Abbildung 2](#)) ist die deutsche Industrie in den verschiedenen Technologiesegmenten sehr unterschiedlich aufgestellt. Im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien sind die asiatischen Hersteller momentan führend und die deutsche Industrie nach der im Projekt „Technologien für die Energiewende“ vorgenommenen Klassifizierung nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig. Hier arbeiten gerade neben anderen Forschungseinrichtungen verschiedene Mitgliedsinstitute des FVEE – das Fraunhofer ISE, das Forschungszentrum Jülich und das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg – intensiv daran, durch den Transfer neuer Forschungsergebnisse in die praktische Umsetzung die deutsche Industrie international wettbewerbsfähiger zu machen. Angesichts des erwarteten weltweiten Marktvolumens für die Technologie von mindestens 43 Mrd. US-Dollar im Jahr 2020 erscheinen diese Forschungsaktivitäten industriepolitisch nicht nur sinnvoll sondern zwingend [6]. Nicht zuletzt aus diesem Grund sollte die Forschung im Bereich der elektrochemischen Speicher weiter forciert werden. Auch im Bereich der

natriumbasierten Systeme ist die deutsche Industrie nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig, wobei der Markt hier auch ein deutlich geringeres Volumen aufweist. Im Bereich der Vanadium-Redox-Flow-Batterien ist die deutsche Industrie dagegen wettbewerbsfähig. Auch hier unterstützen FVEE-Mitgliedsinstitute wie das ZAE Bayern die Industrie durch ihr Know-how aus Forschungsprojekten.

Im letztgenannten Fall handelt es sich um bereits produzierte Ersatz-Batterien für einen bestimmten Fahrzeugtyp [7]. Um die Batterien bis zu ihrem Einsatz im Fahrzeug möglichst „gesund“ zu erhalten, werden diese in einem stationären Speicher für die Bereitstellung von Primärregelleistung kontrolliert be- und entladen.

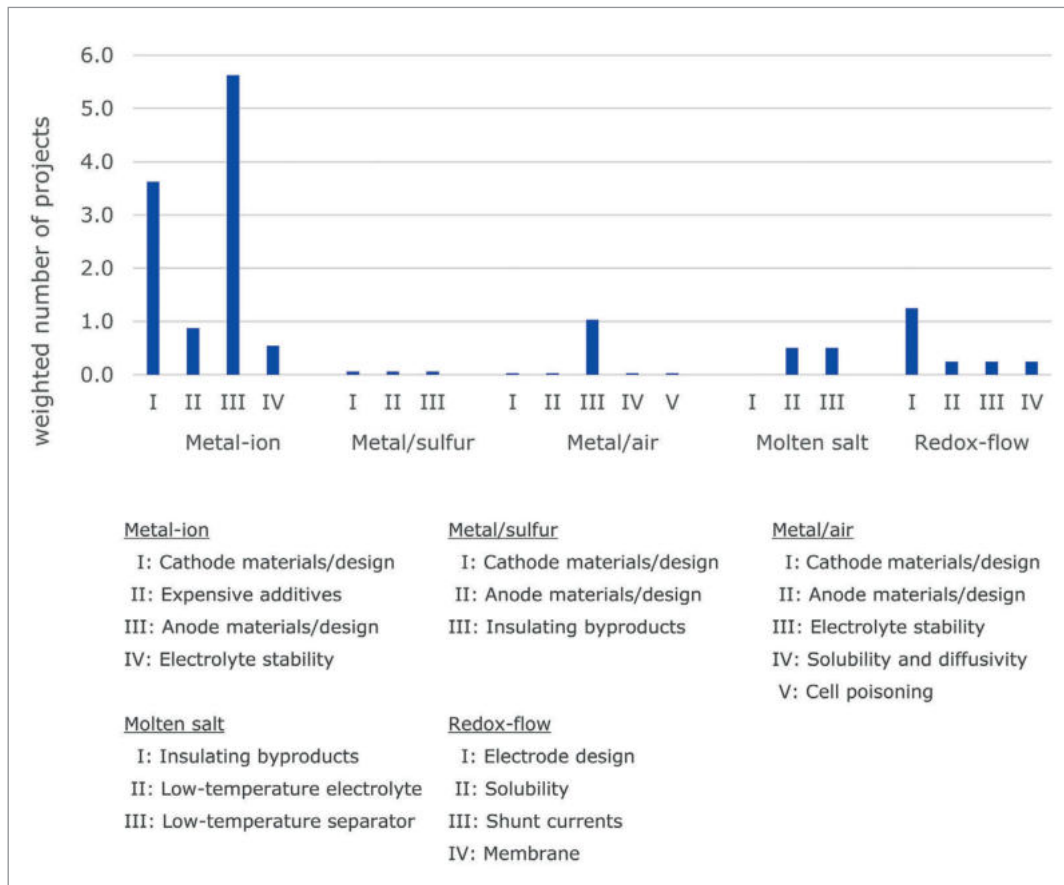
### Materialforschung und Recycling

Angesichts des weltweit wachsenden Marktvolumens und des damit verbundenen Ressourcenverbrauchs nehmen auch die Entwicklung von alternativen Materialzusammensetzungen und Recyclingmethoden an Bedeutung zu. Hierzu zählt auch die Entwicklung von Second-Life-Konzepten für die weitere Nutzung von Batterien aus Elektrofahrzeugen in stationären Systemen. Erste Pilotprojekte nutzen Batterien für mobile Anwendungen in stationären Großbatterien zur Regenergiebereitstellung, entweder nachdem sie bereits im Fahrzeug eingesetzt wurden und hier durch Alterungseffekte eine bestimmte Kapazitätsgrenze (z. B. 80 %) unterschritten haben oder bevor sie überhaupt im Fahrzeug eingesetzt werden.

### Rolle im Energiesystem

Dies zeigt eines der vielseitigen Anwendungsfelder elektrochemischer Speicher im Energiesystem der Zukunft. Sie sind absolut systemkompatibel und können auf nahezu allen Spannungsebenen des heutigen Energiesystems eingesetzt werden. Sie können Lastausgleich und Frequenzregelung ebenso übernehmen wie die Spitzenlastreduktion und die Integration der erneuerbaren Energien. Dabei sind sie nicht auf zusätzliche Infrastrukturen angewiesen, sondern sind mit den bestehenden Infrastrukturen kompatibel und können in vielen Fällen sogar eine optimale Ausnutzung der bestehenden Infrastrukturen vermeiden. Auch in diesem Bereich sind die Mitgliedsinstitute des FVEE aktiv.

Abbildung 2  
Verteilung der Projekte auf die Kernherausforderungen auf der Materialebene.[5]





Das Fraunhofer ISE wertet Ergebnisse aus dem Pilotprojekt Quartierspeicher Weinsberg aus und das ISFH hat einen Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme entwickelt, um eine zielorientierte Marktdurchdringung von Speichersystemen zu unterstützen. Elektrochemische Speicher werden zweifelsfrei eine wichtige Rolle als Flexibilitätsoption und Energielieferant im Energiesystem der Zukunft spielen.

## Quellennachweis

- [1] Rohrig et al; Technologiebericht TF 3.3 Elektrochemische Energiespeicher innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende; 2017
- [2] Thielmann, Axel; Sauer, Andreas; Schnell, Mario; Isenmann, Ralf; Wietschel, Martin (2015): Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.
- [3] Projekt STENSEA gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; FKZ: 0325584B
- [4] European Commission: Towards an Integrated SET-Plan: Accelerating the European Energy System Transformation – Become competitive in the global battery sector to drive e-mobility forward, ISSUES PAPER No 7.2016.05.10. Website: <https://setis.ec.europa.eu/>
- [5] Schledde, Dominik; Dabrowski, Tatjana; Puchta, Matthias; Munzel, Benjamin; Husy, Charlotte; Lipphardt, Marvin; Hartmann; Lena (2016): Support to R&D Strategy for battery based energy storage – Technical analysis of ongoing projects (D5). Ecofys 2016 by order of: European Commission Directorate General Energy. Website: [www.batstorm-project.eu](http://www.batstorm-project.eu)
- [6] DOE Global Energy Storage Database, Abruf am 16.08.2017, Website: [http://www.energy-storageexchange.org/projects/data\\_visualization](http://www.energy-storageexchange.org/projects/data_visualization)
- [7] Pressemeldung der Daimler AG, 13.09.2016; abrufbar unter: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Weltweit-groesster-2nd-Use-Batteriespeicher-geht-ans-Netz.xhtml?oid=13634457>

# Innovationsbedarfe für Bioenergieanwendungen



## DBFZ

Martin Dotzauer  
martin.dotzauer@dbfz.de

Dr. Nora Szarka  
nora.szarka@dbfz.de

Henryk Haufe  
henryk.haufe@dbfz.de

## Fraunhofer IEE (vorm. IWES)

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

## IZES

Bernhard Wern  
wern@izes.de

## KIT

Prof. Dr. Nicolaus Dahmen  
nicolaus.dahmen@kit.edu

## UFZ

Markus Millinger  
markus.millinger@ufz.de

Die Innovationsbedarfe für Bioenergieanwendungen resultieren aus der zukünftigen Rolle der Bioenergie im Energiesystem und den sich hieraus ergebenden systemischen Anforderungen.

## Rolle der Bioenergie im Energiesystem

Die energetische Biomassenutzung ist heute über lange und häufig verzweigte und vernetzte Wertschöpfungsketten sehr vielfältig und hochgradig komplex. Das in Deutschland nutzbare Biomassenspektrum ist sehr vielfältig und reicht von Rest- und Abfallstoffen bis zu Energiepflanzen, die gezielt für die energetische Nutzung angebaut werden, sowie verschiedenen Importbiomassen (z. B. Holzpellets). Biomasse enthält neben den wertgebenden Inhaltsstoffen immer eine Reihe von Begleit- oder Störstoffen. Vor der energetischen Nutzung sind daher angepasste Bereitstellungs- und Aufbereitungsprozesse notwendig.

Die eigentliche energetische Konversion der Biomasse erfolgt durch sehr unterschiedliche Verfahren, die sich grob in biochemische, thermochemische und physikochemische Konversionsprozesse unterscheiden lassen. Innerhalb der Prozessketten werden häufig Verfahren aus den unterschiedlichen Kategorien kombiniert. Die durch diese Verfahren erzeugten Sekundärbiomassen (z. B. Biogas, torrefizierte Holzpellets oder Biodiesel) können als biogene Energieträger analog zu fossilen Brennstoffen gelagert, transportiert und in den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität zur Bereitstellung von Endenergie eingesetzt werden. Biogene Brennstoffe besitzen in Bezug auf ihre feuerungstechnischen Eigenschaften oft eine große Ähnlichkeit mit fossilen Energieträgern und können diese in einer Reihe von Anwendungen substituieren.

Das nachhaltig verfügbare Biomassepotenzial ist sowohl national als auch international begrenzt. Nutzungskonkurrenzen in den Bereichen Nahrungs- und Futtermittel und der stofflichen Nutzung sowie die starken Kostensenkungen bei anderen Erneuerbaren wie Wind und Solarenergie bedingen, dass Bioenergie auch zukünftig vor allem diejenigen Anwendungen bedienen wird, in denen andere Treibhausgasvermeidungsoptionen fehlen oder spezifisch teuer sind. Bestimmte obligatorisch zu behandelnde Nebenprodukt- und Reststoffströme sind davon ausgenommen, da sie keinen anderweitigen Nutzungskonkurrenzen unterliegen.

## Systemrelevante Anforderungen an Bioenergie

Aus Energiesystemsicht soll nachfolgend zwischen den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität unterschieden werden. Die wachsende Bedeutung der Sektorkopplung und der Kraft-Wärme-Kopplung verwischen die Grenzen zwischen den Sektoren aber zunehmend.

Heute substituieren Bioenergieanlagen bei vielfach noch konstanter Fahrweise im Stromsektor Grundlastkraftwerke. Mit wachsendem Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien (Windenergie und Photovoltaik) gewinnt die Bioenergie zunehmend an Bedeutung als Flexibilitätsoption. Bioenergieanlagen können hierbei vor allem längerfristige Ausgleichsbedarfe (Fluktuationen innerhalb von 24 h bis hin zu saisonalen Schwankungen) bedienen, da sie wie fossile Anlagen den jeweiligen Brennstoff als chemischen Langfristspeicher nutzen können, um Strom bedarfsgerecht bereit zu stellen.

Im Wärmesektor bieten KWK-Anwendungen einen Doppelnutzen durch den gleichzeitigen Beitrag zur erneuerbaren Strom- als auch Wärmeerzeugung. Es können dabei jedoch Zielkonflikte entstehen, wenn die Anlagen zur Deckung von Spitzenlasten genutzt werden, da die Strom- und Wärmebedarfe nicht zwingend dieselben Verbrauchsprofile aufweisen. Hierbei muss dann entweder priorisiert werden, oder durch geeignete Maßnahmen die Strom- und Wärmeproduktion entkoppelt werden. Bei der reinen Wärmebereitstellung werden Bioenergieanwendungen zukünftig in ähnlicher Weise wie im Strombereich vor allem dazu dienen, Spitzenlasten in multivalenten Versorgungssystemen abzudecken.

Im Mobilitätssektor können biogene Kraftstoffe mit geringem technischen Aufwand direkt in bestehende Anwendungen integriert werden. Heute werden Biokraftstoffe vor allem als Beimischung zu Otto- und Dieselmotoren eingesetzt. Zukünftig könnten sie vor allem dazu genutzt werden, schwer elektrifizierbare Anwendungen zu bedienen, wie beispielsweise Flug- oder Schwerlastverkehr.

Es gibt auch für die Produktion von biogenen Brennstoffen Schnittstellen zum Stromsektor. In vielen Konversionsprozessen zur Bereitstellung flüssiger und gasförmiger Kraftstoffe, besteht auf Grund der chemischen Zusammensetzung ein Wasserstoff-

defizit (bzw. ein Kohlenstoffüberschuss). Durch die Einbindung von erneuerbar erzeugtem Elektrolysewasserstoff kann dieses Defizit stöchiometrisch ausgeglichen und gleichzeitig die Kohlenstoffnutzungseffizienz der eingesetzten Rohstoffe gesteigert werden. Aus Sicht der Wasserstoffwirtschaft können solche Konversionstechnologien auch als erneuerbare Kohlenstoffquellen für teilsynthetische Kohlenwasserstoffen betrachtet werden.

Aus einer übergeordneten Perspektive lässt sich erstens die Anforderung ableiten, die verschiedenen Sektoren stärker integriert zu betrachten. Zweitens ergibt sich auch innerhalb der Sektoren die Notwendigkeit, Bioenergieanwendungen mit anderen EE-Technologien zu verknüpfen und zu kombinieren. Als eine Strategie, diese Zusammenhänge konzeptionell zu beschreiben, kann das Konzept „Smart-Bioenergy“ gesehen werden. Smart Bioenergy beschreibt dabei eine vertikale und horizontale Integration von verschiedenen Bioenergie-technologien unter ganzheitlichen Gesichtspunkten (► *Abbildung 1*).

### Abgeleitete Innovationsbedarfe für die Bioenergie

- **Im Stromsektor** ist die Flexibilisierung von KWK-Anlagen ein zentrales Innovationsthema, wobei es hier vor allem darum geht, eine große stromseitige Regelbreite zu erreichen und gleichzeitig

die dafür notwendigen technischen Maßnahmen kostenoptimal zu realisieren. Nebenbedingung ist dabei, dass die THG-Emissionen im Zuge von Flexibilisierungsmaßnahmen nicht steigen sollten. Konkrete Ansatzpunkte dafür bieten sich zum Beispiel bei Biogasanlagen auf der Ebene der Gas-erzeugung an. Hier besteht nach wie vor ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um das bisher nur wenig genutzte Potenzial dieses Prozessschrittes zur Ausweitung der Flexibilität heben zu können. Die Modulation der Gasproduktion verspricht eine Vergrößerung des zeitlichen Potenzials zur Lastverschiebung, das vor allem für den Ausgleich längerfristiger Residuallastschwankungen (Stichwort „Dunkelflaute“) genutzt werden kann.

Darüber hinaus müssen sowohl die Einzelanlagen in Versorgungssysteme als auch einzelne Prozessschritte in zunehmend flexible Betriebskonzepte der Einzelanlagen über automatisierte Regelungskonzepte eingebettet werden. Nur so können im Rahmen des komplexer werdenden Zusammenspiels mit anderen Flexibilitätsoptionen und erneuerbaren Erzeugungskapazitäten die wachsenden Anforderungen zur Stromnetzstabilität gewährleistet werden. Dabei müssen gleichzeitig Zielkonflikte und Kosteneffekte berücksichtigt werden, da Bioenergieanlagen für eine hohe Gesamteffizienz in Kraft-Wärme-Kopplung zu betreiben sind. Eine zunehmend stromseitige Flexibilisierung kann dann Zielkonflikte mit der

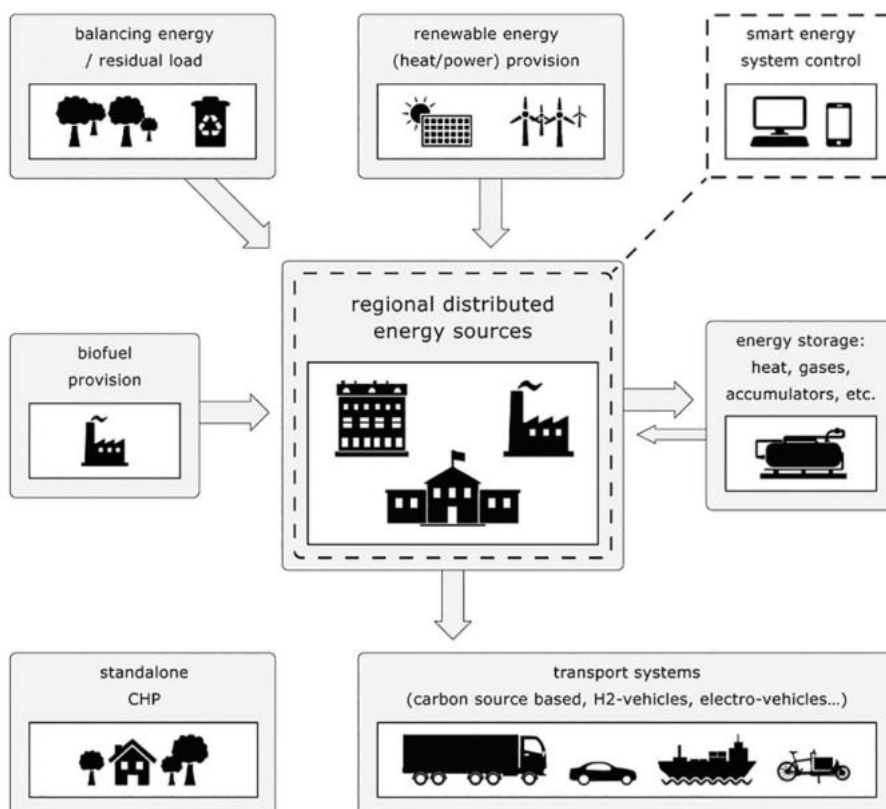


Abbildung 1  
**Bioenergie-Innovationen**  
Thran, Daniela: *Smart Bioenergy: Technologies and concepts for a more flexible bioenergy provision in future energy systems*: Springer, 2015 — ISBN 978-3-319-16193-8

Nutzwärmebereitstellung nach sich ziehen (s. o.). Je nach Anforderungsprofil können die Lastprofile zeitlich sehr unterschiedlich ausfallen, so dass zur Vermeidung von wärmeseitigen Deckungslücken die Implementierung weiterer Systemelemente wie Wärmespeicher oder Spitzenlastkessel erforderlich werden kann.

- **Im Wärmesektor** wird analog zur Stromerzeugung, bei reiner Wärmeerzeugung aus Biomasse auch ein Trend zur Flexibilisierung erwartet, da im Zuge der Energiesystemtransformation im Wärmebereich solar- und wind-basierte Anwendungen (z. B. direkt als Solarthermie oder indirekt in Form von Wärmepumpen) an Bedeutung gewinnen werden. Die Wärmebereitstellung wird damit ebenfalls stärker als bisher witterungsbedingten Angebotsschwankungen unterliegen und generiert so auch im Wärmebereich einen Bedarf für erneuerbare Spitzenlastanwendungen. Diese Rolle können Bioenergieanlagen sowohl in Einfamilienhäusern, Wohnquartieren als auch in Nah- und Fernwärmenetzen übernehmen. Damit der Einsatz der Anlagen mit den jeweiligen anderen Systemkomponenten harmonisiert wird, sind auch hier intelligente Systemregler erforderlich, die die Gesamtheit der technischen Einheiten in dem jeweiligen Verbund optimal ausregeln.
- **Für biogene Kraftstoffe und Bioraffinerien** fächern sich die Innovationsbedarfe stark auf und reichen von Konzepten zur Optimierung der Biogasaufbereitung zu Biomethan, über die Aufskalierung von Vergasungs- und Syntheseanlagen für feste Biomasse bis hin zu Fragen wie Bioraffinerien ausgelegt sein müssen, um eine heterogene Rohstoffbasis effizient erschließen zu können. Als Querschnittsthema können zu allen vorgenannten Aspekten jeweils auch Forschungsfragen zur Integration von erneuerbarem Wasserstoff in diese Prozessketten adressiert werden, da in allen genannten Bereichen Schnittstellen vorhanden sind, die biogenen Kohlenstoffträger mit Wasserstoff aufzuwerten. Ausgehend davon ergeben sich dann Innovationsbedarfe in Bezug auf die Ausgestaltung der jeweils erforderlichen Wasserstoffbereitstellung und das Einfügen der Einzelprozesse, in denen der Wasserstoff eingekoppelt werden kann, in die jeweiligen Gesamtkonzepte.
- **Übergeordnete Innovationsbedarfe** ergeben sich in Bezug auf die Systemanalyse, in Bezug zur Rollendefinition der Bioenergie und einer feingliedrigen Abbildung von Bioenergie-technologien in Energiesystemmodellen, um die zukünftige Ausrichtung der Technologieentwicklung als auch der Portfolioentwicklung modellhaft abbilden zu können.

Auf der Ebene der Anlagensteuerung und Einsatzoptimierung ist es erforderlich, die stärkere Vernetzung von Bioenergieanlagen mit weiteren Technologien zur Erzeugung, Verteilung und Speicherung von Energien zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang ist auch schon bei der Konzeptionierung von Versorgungskonzepten zu berücksichtigen, welche speziellen Wechselwirkungen durch die steigende Systemkomplexität zu erwarten sind. Um eine effiziente Vernetzung der verschiedenen Systemkomponenten zu erreichen, müssen Kommunikationsprotokolle als Grundlage für die Automatisierbarkeit der Anlagen standardisiert werden. Die wachsende Vernetzung und Digitalisierung führt weiterhin dazu, dass auch Aspekte zur IKT-Sicherheit kritischer Infrastrukturen an Bedeutung gewinnen.

Da die Endenergiebereitstellung bei Bioenergie-technologien in der Endanwendung sehr häufig durch Verbrennungsprozesse erfolgt, sind Emissionsminderungsmaßnahmen ein zentrales Innovationsfeld, um steigenden Anforderungen beim Emissionsschutz gerecht zu werden. Gleichzeitig muss erreicht werden, dass durch technische Innovationen und Skaleneffekte die Kosten für effektivere Emissionsminderungsmaßnahmen niedrig bleiben, damit die Bereitstellungskosten der betreffenden Technologien nicht wesentlich steigen.

Weiterhin sind am Anfang der Bereitstellungsketten auch Innovationsbedarfe für Aufbereitung, Logistik und Anbaukonzepte für biogene Einsatzstoffe Ziel weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeit, da die Bereitstellung von Endenergie an eine gesicherte Rohstoffverfügbarkeit gekoppelt ist. Dazu sind technische Ansätze zur Bergung und kosteneffizienten Logistik von Rest- und Abfallstoffströmen notwendig, die bisher auf Grund ihres saisonalen Anfalls oder heterogener räumlicher Verteilung nicht preiswürdig zu erschließen sind.

Weiterhin können verbesserte Analysemethoden und darauf aufbauende automatische Konditionierungsansätze das Spektrum der nutzbaren Rest- und Abfallstofffraktionen erweitern.

Abschließend sind auch im Bereich der Erzeugung von Energiepflanzen im Rahmen von extensiven Anbausystemen mit geringem ökologischem Fußabdruck weitere Innovationen erforderlich, damit die nachhaltig verfügbaren Flächenpotenziale ohne Einschränkung der Nahrungs- und Futtermittelproduktion nutzbar sind. Beispielgebend können hier Blümmischungen auf ökologischen Vorrangflächen oder Kurzumtriebsplantagen genannt werden, die neben der Produktion von energetisch oder stofflich nutzbaren Rohstoffen auch Ökosystemdienstleistungen erbringen können.

## Entwicklungen der Windenergie – wo stehen wir?

Die Windenergienutzung ist heute integraler Bestandteil der deutschen Energieversorgung und stellt aktuell (2016) mit rund 80 TWh etwa 12% der benötigten elektrischen Energie bereit [1,2]. Die installierte Leistung wuchs in Deutschland bis Ende 2016 auf etwa 50 GW und international auf rund 487 GW, davon 14 GW offshore [1]. Bei angenommenen, durchschnittlichen 2.000 Volllaststunden ergäbe sich weltweit eine aus Wind generierte elektrische Energiemenge in Höhe von etwa 1.000 TWh.

Für ein zukünftiges Energieversorgungssystem, das sich mehr und mehr auf erneuerbare Energien stützt und einen substantziellen Beitrag zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes leistet, muss die Windenergienutzung aber noch erheblich ausgebaut werden [3]. Neuere Szenarien gehen bis 2050 von ca. 300 TWh Windstromerzeugung in Deutschland [4] und 8.800 TWh [5] bzw. 15.000 TWh [6] weltweit aus. Für Deutschland würde dies eine Steigerung der aktuellen Energiemenge aus Wind auf das rund Fünffache innerhalb der kommenden 35 Jahre und weltweit eine Steigerung auf das rund Fünfzehnfache bedeuten.

Der folgende Beitrag basiert zum Teil auf den Ergebnissen des Forschungsvorhabens TF\_EnergieWende bzw. auf dem in dessen Rahmen entstandenen Technologiebericht Windenergie (Veröffentlichung in einem Gesamtbericht steht bevor). Dort wird angenommen, dass für den genannten Ausbau wesentliche Herausforderungen zunächst darin bestehen, geeignete Standorte zu identifizieren und optimal auszunutzen sowie gezielt für die lokalen/regionalen Bedingungen ausgelegte und technisch weitgehend optimierte Anlagen bereitzustellen. Zusätzlich sind die Prozesse von Betriebsführung und Instandhaltung kostenoptimal zu gestalten und alle Umwelteinflüsse der Windenergienutzung so weit wie möglich zu reduzieren bzw. Akzeptanz für die unvermeidlichen Auswirkungen zu schaffen.

Die meisten Entwicklungsansätze werden letztendlich durch den allgegenwärtigen Kostendruck angetrieben. Dieser führt nach wie vor zu einem Größenwachstum der Anlagen, sodass die zukünftigen Entwicklungsnotwendigkeiten vor dem Bild einer aus heutiger Sicht extrem großen 20 MW-Windenergieanlage (WEA) abzuschätzen sind.

Akzeptanz- und Umweltaspekte sind hingegen nicht aus Kostengründen oder aufgrund technischer

Herausforderungen zu thematisieren, sondern zur bestmöglichen Umsetzung gesellschaftlicher Werte wie Umwelt- und Gesundheitsschutz. Für Erhaltung und Ausbau der Akzeptanz müssen mögliche Auswirkungen der Windenergie auf Mensch und Umwelt untersucht und reale, unerwünschte Effekte reduziert bzw. eliminiert werden.

### Bewertung der Windenergie-Technologie anhand objektiver Kriterien

Auf Basis der Vorgaben im oben genannten Projekt wurden verschiedene Aspekte der Windenergienutzung und zwölf konkrete Bewertungskriterien untersucht. Beispielhaft folgen die Ergebnisse zu fünf ausgewählten Kriterien.

#### Beitrag zur Energieeinsparung

Die Windenergie soll zukünftig einen großen Teil der elektrischen Energieversorgung übernehmen. Die Auswertung diverser Szenarien kommt zu dem Schluss, dass 2050 in Deutschland im günstigsten Fall etwa 1400 bis 2000 PJ (rund 390 bis 550 TWh) elektrische Energie durch Windenergieanlagen bereitgestellt werden können.

#### Beitrag zu Klimazielen

Da der CO<sub>2</sub>-Ausstoß je Energieeinheit verglichen mit anderen Ressourcen und Technologien beinahe verschwindend gering ist, ist der Windenergie zukünftig auch ein großer Anteil an der Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes zuzuschreiben. So kann die Windenergienutzung ab 2050 über 300 Mio. t CO<sub>2</sub> einsparen (bei rund 900 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent 2015).

#### Rohstoffrisiken

Durch die zunehmende Verwendung von permanent-erregten Generatoren und durch den damit verbundenen Bedarf an seltenen Erden entsteht ein leichtes Rohstoffrisiko. Da der mengenmäßige Bedarf verglichen mit anderen Technologien aber relativ klein ist und mit Kupfer oder Aluminium Ersatzrohstoffe existieren, bleibt das mit der Windenergie verbundene Rohstoffrisiko gering.

#### Kosteneffizienz

Unter den Rahmenbedingungen des EEG haben die Wind- und Solarenergie in den vergangenen Jahren erheblich zur Preisreduktion an den Strombörsen beigetragen und die letzten Ausschreibungen in



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



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

UFZ  
Dr. Raik Becker  
raik.becker@ufz.de

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

Deutschland haben gezeigt, dass diese Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist. Die Prognosen gehen davon aus, dass sich im progressiven Ausbauszenario im Vergleich zu einem Referenzszenario ab 2050 eine Einsparung von bis zu 40 Mrd. € jährlich ergeben kann. Selbst das pessimistische Szenario verspricht noch eine Einsparung von über 15 Mrd. € jährlich.

### Marktpotenziale

Das mit dem Umbau des Energieversorgungssystems verbundene Marktpotenzial ist für deutsche Unternehmen beträchtlich. In einem zurückhaltenden Szenario werden jährliche Investitionen in Höhe von knapp 2 Mrd. € erwartet, im progressivsten Szenario sogar fast 7 Mrd. €. Hinzu kommen die internationalen Marktpotenziale.

Insgesamt kam die genannte Studie zu dem Ergebnis, dass sich die Windenergienutzung aus folgenden Gründen für eine tragende Rolle in der zukünftigen Energieversorgung empfiehlt:

- hohes technisches Potenzial
- großer Beitrag zur Klima- und Ressourcenschonung
- niedrige Stromgestehungskosten
- relativ geringe Auswirkungen auf Umfeld und Umwelt

### Technische Verbesserungspotenziale bei der Standortfindung

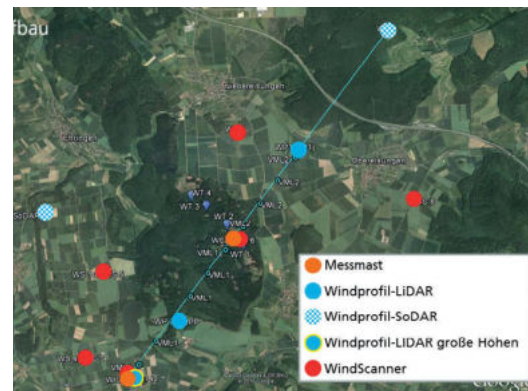
Der erwartete große Beitrag der Windenergie zur Energieversorgung und die begrenzten Flächenpotenziale setzen eine optimale Nutzung geeigneter Standorte voraus. Für die Windenergienutzung an Land und auf See sind die Fragestellungen dabei durchaus verschieden. An Land spielen vor allem der Geländeeinfluss (komplexes Gelände) und die großen Höhen eine Rolle. Offshore sind eher die Auswirkungen von thermischen Effekten (Temperaturunterschied zwischen Wasser und Luft) sowie die Auswirkung der Nachlaufströmung von WEA auf die

Windbedingungen innerhalb und zwischen Windparks eine Herausforderung.

Bei wachsender Anlagengröße und weiteren bisher unerschlossenen Standorten an Land wird die Bestimmung der äußeren Einflussgrößen auf die WEA immer wichtiger, um den Ertrag so genau wie möglich abschätzen zu können. Hierbei gilt es, die meteorologischen Umgebungsgrößen zu bestimmen und vorherzusagen. Die erforderlichen in-situ-Messungen werden zunehmend mit Fernerkundungsverfahren wie SoDAR (Sonic Detection and Ranging) und LiDAR (Light Detection and Ranging) durchgeführt, doch weisen diese sehr attraktiven Messmethoden gerade in bergigem Gelände noch Messfehler auf. Zum Teil können die Fehler bereits heute mit Hilfe numerischer Strömungssimulationen eliminiert werden, zukünftig soll die Kopplung der mikroskaligen und der mesoskaligen Windfeldmodellierung auf Basis momentaner Wetterdaten die Vorhersage des Windertrags verbessern. Ein wichtiger nächster Schritt ist die Synchronisation mehrerer LiDAR-Geräte zu Multi-LiDAR-Systemen, mit denen die Windbedingungen über potenziellen Windpark-Areale quasi flächendeckend und in allen relevanten Höhen über Grund mit einer einzelnen Messkampagne vermessen werden können.

Je mehr bisher vermiedene Regionen für eine zukünftige Nutzung in Betracht gezogen werden, umso eher rücken auch Gründung und Fundament in den Fokus. Im Fundament werden alle Kräfte und Momente abgefangen, welche durch den Staudruck des Windes und die Gewichtskraft der Anlage entstehen, wodurch der Gründung natürlich eine besondere Bedeutung zukommt. Gerade in Gebieten mit Karstgestein können sich Hohlräume oder Dolinen ausbilden, welche bei unsachgemäßer Standortwahl die Standsicherheit der WEA gefährden. Die Detektion solcher nicht-tragenden Untergründe ist mitunter schwierig und die bekannten Messmethoden sind zum Teil noch ungenau.

Abbildung 1  
LiDAR-Scanner (links)  
und Messaufbau mit  
mehreren Multi-LiDAR-  
Systemen (rechts)  
für das Kassel-  
Experiment im euro-  
päischen Vorhaben  
„Neuer Europäischer  
Windatlas“ (NEWA)  
[Quelle: Fraunhofer IWES, Kassel]



## Anstehende Komponentenentwicklung mit Blick auf Kostenreduktion, Effizienzsteigerung und Minimierung der Umweltauswirkungen

Aktuell werden verschiedene Turmkonzepte mit verschiedenen Werkstoffen für unterschiedliche Nabenhöhen entwickelt, wie z.B. Fertigbetonteiltürme mit faserverstärkten Feinkornbetonen, Türme in Hybridbauweise oder Gittermasttürme. Neuartige Methoden bei der Nachbehandlung von Schweißnähten von Stahltürmen, aber auch von Gründungsstrukturen für den Offshore-Einsatz, verlängern die Lebensdauer des Materials und erhöhen somit die Standfestigkeit.

Eine geringe Turmkopfmasse birgt nicht nur Potenzial zur Kostenreduktion bei der Maschine selbst sondern auch Vorteile für den Turm sowie für Fundament bzw. Offshore-Tragstruktur. Es wird u. a. an gestaltungsoptimierten Maschinenträgern aus Gusstahl gearbeitet und an Naben aus Faserverbundwerkstoffen. Leichtbau ist auch das Ziel bei der Weiterentwicklung der Rotorblätter. Die Länge der Blätter wird weiter stetig steigen, sodass auch Kohlenstofffasern zum Einsatz kommen, um einerseits für ausreichend Steifigkeit zu sorgen und andererseits das Gewicht zu begrenzen. Weiteres Entwicklungspotenzial besteht beim strukturellen Aufbau der Rotorblätter. So kann durch den Einsatz moderner dreidimensionaler Textiltechniken, wie Flechten, Sticken und Nähen der Aufbau punktuell bei reduziertem Masseneinsatz verstärkt werden.

CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) spielen eine große Rolle im Bereich der Anlagenkonstruktion und Rotorblattauslegung. Eine adaptive Strömungsbeeinflussung mit sogenannten „smart blades“ kann die Auftriebseigenschaften während des Betriebs verändern: entweder passiv durch eine Biege-Torsionskopplung oder aktiv durch Aktuatoren (Antriebs-elemente) wie Flaps (Klappen). Die Einbindung dieser Systeme in die Anlagenregelung und -steuerung stellt zwar einen hohen Aufwand dar, doch steckt in diesem Bereich ein sehr großes Potenzial, die Lasten zu reduzieren und die Leistung zu steigern, vor allem in Verbindung mit einer prädiktiven Regelung.

In der mechanisch-elektrischen Energiewandlung sind Synchrongeneratoren, die entweder über ein Getriebe oder direkt mit der Nabe verbunden werden, auf dem Vormarsch. Grund hierfür ist die einfachere Bereitstellung von Blindleistung, was für die einzelne WEA, und auch für einen Windpark im Gesamten bzgl. des Netzanschlusses von Vorteil ist. Hier kommen zunehmend Generatoren mit permanentmagnetischer Erregung, zum Einsatz, was wie-

derum zu einer geringeren Turmkopfmasse führt. Zum Nachteil könnten hier die für die Magnete notwendigen Seltenen Erden führen.

Auch die Generatoren selbst bergen noch Potenzial zu Gewichtsreduktion und Effizienzsteigerung. Der neu entwickelte Prototyp eines Magnetrings-Generators verspricht eine erhebliche Gewichtsreduktion im Vergleich zu herkömmlichen Vielpol-Generatoren bei gleichbleibender Effizienz.

Eine andere Entwicklungsschiene beschäftigt sich mit hocheffizienten, supraleitenden Generatoren.

Auch in der Anlagenregelung steckt noch Potenzial zur Effizienzsteigerung. Mithilfe von LiDAR-Messungen und CFD-Simulationen soll zukünftig das herannahende turbulente Windfeld erfasst bzw. eingeschätzt werden, bevor es auf die WEA trifft. Dies ermöglicht es, rechtzeitig zu agieren und nicht – wie im konventionellen Fall – auf Böen erst im Nachhinein zu reagieren. In Hinblick auf den Einsatz der Technologie in Windparks oder in bergig komplexem Gelände bietet die adaptive Vorsteuerung zusammen mit der sogenannten Einzelblattsteuerung („Individual Pitch Control“) das Potenzial, auch die Schallemissionen zu senken.

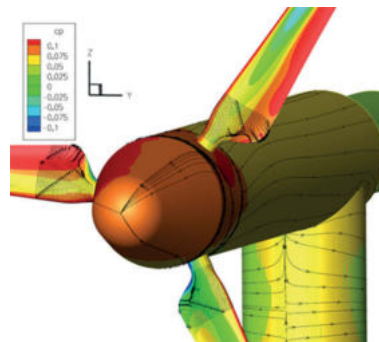


Abbildung 2  
**Numerische Strömungsberechnung an einer WEA**  
[Quelle: IAG, Universität Stuttgart]

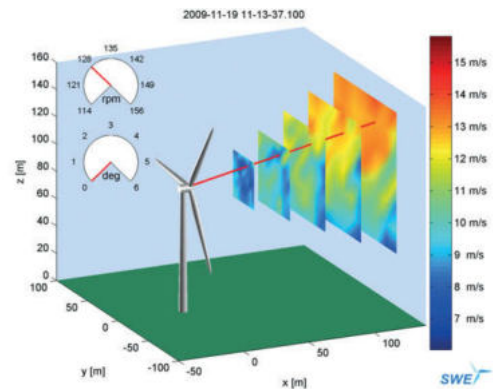


Abbildung 3  
**Magnetrings-Generator im Labormaßstab (176 kW)**  
[Quelle: Fraunhofer IWES, Kassel]

Abbildung 4  
**LiDAR-Scanner auf der Gondel einer 5MW WEA (links)**

**Visualisierte Messdaten des herannahenden Windfelds (rechts)**

[Quelle: Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE), Universität Stuttgart]



Leistung und die regelungstechnische Nachbildung „virtueller Rotationsenergie“.

Diese zukünftigen Aufgaben sowie die stark volatilen Eigenschaften der Windenergie und der anderen erneuerbaren Energien regen in der jüngeren Vergangenheit immer mehr Ansätze der virtuellen Kopplung der einspeisenden Anlagen sowie eine Kopplung der Verbrauchssektoren an. Ferner werden Konzepte für eine Integration dezentraler Erzeugungsanlagen in den Netzwiederaufbauprozess nach einem Blackout erarbeitet sowie die notwendigen Funktionalitäten auf Anlagenebene abgeleitet.

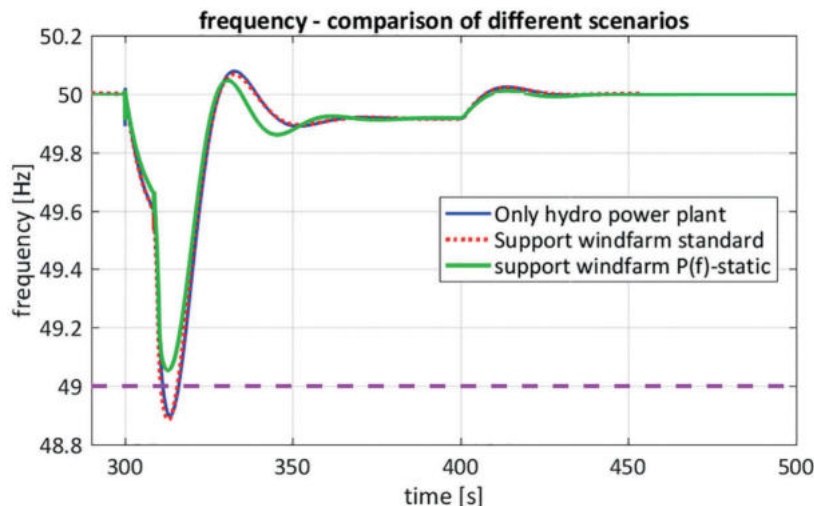
Der Anteil der Betriebs- und Instandhaltungskosten an den Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Electricity = LCOE) aus Windenergie bewegt sich onshore und offshore um 25%. Die Zuverlässigkeit der Anlagen und ihrer Komponenten nahm zuletzt sogar ab, sodass Instandhaltungsaufwand und -kosten gestiegen sind.

Dieser Entwicklung kann zielgerichtet entgegen gewirkt werden, indem die Erfahrungen aus Betrieb und Instandhaltung systematisch analysiert und für zukünftige Generationen von WEA verfügbar gemacht werden.

### Entwicklungsbedarf in Betrieb und Instandhaltung

Im Zuge der Transformation des Energieversorgungssystems müssen WEA zunehmend netzstützende und wahrscheinlich auch netzbildende Aufgaben übernehmen, um eine sichere Energieversorgung gewährleisten zu können. Hier werden neue Regelalgorithmen bzw. Module sowie Funktionalitäten zur Erbringung von Systemdienstleistungen, wie negativer Sekundärregelung, entwickelt, die den steigenden Forderungen hinsichtlich der Netzstützung nachkommen. Zu den aktuellen Aufgaben gehören u. a. die schnelle Variation der eingespeisten

Abbildung 5  
**Antwort der Frequenz auf einen Lastsprung in einem Inselnetz bei unterschiedlichen netzstützenden Funktionen einer WEA**  
 [Quelle: Fraunhofer IWES, Kassel]





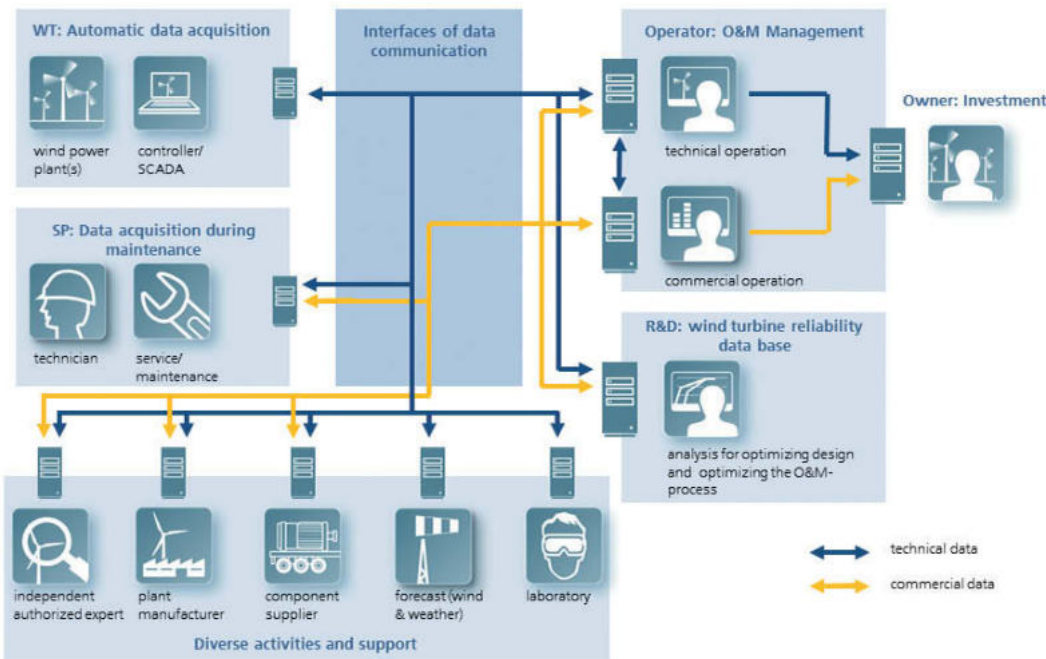


Abbildung 6  
**Kommunikationswege zwischen den Rollen in Betrieb und Instandhaltung**  
[Quelle: Fraunhofer IWES, Kassel]

Für eine situationsabhängige, präventive Instandhaltung sind zukünftig eine systematische und in Teilen automatisierte Datenerfassung sowie eine umfassende Analyse notwendig. Zur Identifizierung von initialen Schäden und der Beobachtung ihrer Weiterentwicklung sind sogenannte Condition-Monitoring-Systeme für alle relevanten Komponenten mit einer typischen, ausgeprägt zeitabhängigen Fehlerentwicklung zu entwickeln.

### Maßnahmen zur Reduzierung von Umweltauswirkungen und zum Erhalt der Akzeptanz

Im Zeichen des immer stärker werdenden Interesses der Bevölkerung und der Regulierungsbehörden an einer umweltverträglichen Nutzung der Windenergie kommt auch der Schallemission, der Schallausbreitung und letztlich der Schallimmission rund um die WEA eine wichtige Rolle zu.

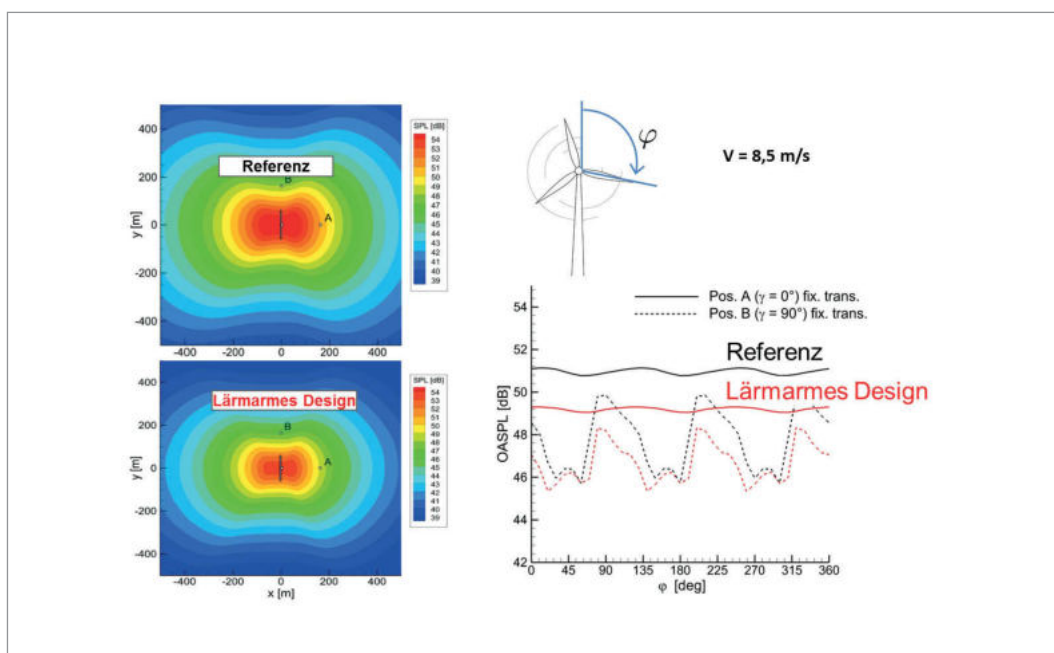


Abbildung 7  
**Simulierte Geräuschsignaturen am Boden mit Auswertung der Amplitudenmodulation für zwei Beobachterpositionen über einen Blattumlauf**  
[Quelle: Rautmann, DLR/Nordex]

Neben Maßnahmen am Blatt gilt es auch zu untersuchen, wann und in welcher Stärke die Geräusche der WEA in der Umgebung nachweisbar sind und wie stark sie vom Gelände, dem Wetter und den Windverhältnissen abhängen (Bedarf nach präziser Lärmvorhersage).

Eine Herausforderung stellt das Phänomen der Amplitudenmodulation dar, wofür derzeit weder validierte Vorhersagemethoden noch geeignete Bewertungsmetriken vorliegen.

Weitere Herausforderungen sind die Erweiterung der 3D-Akustikvorhersagefähigkeiten zur gezielten Designunterstützung, die Nutzung von simulierten Schallfeldern für die Anlagenregelung und die Berücksichtigung komplexer Topografien bei der Schallimmissionsberechnung.

Detaillierte naturschutzfachliche Untersuchungen beschränken sich heute im Wesentlichen auf die erforderlichen Begleituntersuchungen im Rahmen der Genehmigung der Einzelprojekte.

Um Fehler beim weiteren Ausbau zu vermeiden, müssen Auswirkungen wie die Zielkonflikte mit Naturschutz und Landschaftspflege, Beeinträchtigung der Funktionen des Naturhaushalts oder Einfluss auf die Erholungsfunktion umfassend untersucht und aufgearbeitet werden. Dazu sind bereits konsistente naturschutzfachliche Monitoringsysteme im Aufbau, mit denen die Auswirkungen der Windenergienutzung und der Stromtransportinfrastruktur auf Naturschutzgüter erfasst und bewertet werden. Ziel ist es dabei, Fehlentwicklungen möglichst frühzeitig zu identifizieren und Optionen zur Gegensteuerung bereit zu stellen.

## Literatur

- [1] Hrsg. AG Energiebilanzen e. V., Stromerzeugung nach Energieträgern 1990–2016, online verfügbar unter: [https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=ausw\\_24juli2017\\_ov.pdf](https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ausw_24juli2017_ov.pdf)
- [2] Hrsg. Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Windenergie Report Deutschland 2016, Kassel, 2017
- [3] Hrsg. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Energiesystem Deutschland 2050, online verfügbar unter [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE\\_Energiesystem-Deutschland-2050.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE_Energiesystem-Deutschland-2050.pdf), zuletzt geprüft am 09.06.2017.
- [4] Hrsg. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) und Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, online verfügbar unter [http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal\\_2012\\_1/leitstudie2011\\_bf.pdf](http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf), zuletzt geprüft am 10.04.2017
- [5] Hrsg. World Energy Council, World Energy Scenarios 2016. The grand transition, online verfügbar unter [https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Scenarios-2016\\_Full-Report.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Scenarios-2016_Full-Report.pdf), zuletzt geprüft am 11.04.2017
- [6] Hrsg. Greenpeace International, energy [r]evolution. A sustainable world energy outlook 2015, Amsterdam 2015

# Forschung und Entwicklung in der Silizium-Photovoltaik: heute und morgen

## Photovoltaik (PV) und Markt

Die PV-Technologie generiert elektrische Energie aus Licht mittels des inneren Photoeffekts in Halbleiterstrukturen. Diese Technologie hat in den vergangenen zwei Jahrzehnten für die terrestrische Energieproduktion aus Sonnenlicht eine sehr erfolgreiche Entwicklung genommen und stellt heute eine der wichtigsten erneuerbaren Energien dar.

► *Abbildung 1a* zeigt die Entwicklung des PV-Weltmarktes zwischen 2006 und 2016. Ende 2016 waren weltweit PV-Anlagen mit einer Kapazität von über 330 GW installiert, davon etwa 41 GW in Deutschland, die etwa 6,9% des deutschen Nettostromverbrauchs abdecken [1]. Dabei verwenden über 90% der installierten Solarmodule Silizium als Absorbermaterial. Auch für die Zukunft wird ein weiteres rasantes Marktwachstum erwartet (siehe exemplarisch ► *Abbildung 1b*). Alle Studien, die sich mit der Energiewende beschäftigen, zeigen, dass Wind- und Photovoltaiktechnologie die Basistechnologien für eine erfolgreiche Wende sein werden. Ohne diese Technologien ist eine Umstellung auf ein CO<sub>2</sub>-freies Energiesystem über alle Sektoren (Strom, Wärme, Mobilität und Industrie) nicht machbar. Die mit dem Modell ReModD am Fraunhofer ISE [2] durchgeführten Rechnungen für techno-ökonomische Szenarien mit der Randbedingung der derzeit politisch vorgegebenen Ziele (80% CO<sub>2</sub>-Reduktion bis 2050 bezogen auf das Referenzjahr 1990) zeigen deutlich den hohen Bedarf von 120 bis 400 GW an PV-Installationen in Deutschland. Die Marktentwicklung steht also erst am Anfang. Dies gilt dann nicht nur für Deutschland sondern auch global.

Ermöglicht wurde die bisherige PV-Entwicklung durch intensive, auch öffentlich geförderte, Zusammenarbeit von Forschung und Industrie, wobei Deutschland im Bereich F&E einen Spitzenplatz einnimmt und im Bereich Maschinenbau weltweit führend ist. Die über F&E erreichte Verbesserung von Produkten, Prozessen und Anlagentechnologie sowie das Skalenwachstum bewirkten eine Preisreduktion von PV-Modulen von 23,4 Euro/W<sub>p</sub> im Jahr 1980 auf unter 0,4 Euro/W<sub>p</sub> im Jahre 2016, also um einen Faktor 53 [1]. Die Kostenreduktion geht auch in den kommenden Jahren weiter. Diese Entwicklung beförderte die PV von einer Außenseiterrolle im Erneuerbare-Energien-Portfolio zu einer tragenden Säule der nationalen und globalen Energiewende. Die treibende Rolle bei dieser Entwicklung spielte zunächst

das deutsche Energieeinspeisegesetz (EEG), welches von einer Vielzahl von anderen Ländern übernommen wurde und dadurch ein starkes globales Wachstum ermöglichte.

Auch die deutsche Industrielandschaft hat von der PV-Entwicklung profitiert. In den Jahren 2005–2009 hatten deutsche Zell- und Modulfirmen die internationale Führerschaft und es wurden in Deutschland auch viele Gigawatt an PV-Leistung installiert. China hat danach die Produktionsführerschaft bei Solarzellen und Modulen übernommen und dabei ein rasantes Wachstum erreicht. Dies verschärfte den weltweiten Wettbewerb und führte zu Insolvenzen in Deutschland. Die Zell- und Modulproduktion sollte in Deutschland – auch durch einen wachsenden Heimatmarkt – wieder gestärkt werden. Nur so können wir auch von diesem Teil der Wertschöpfungskette wirtschaftlich profitieren.

Dazu sind erhöhte F&E-Anstrengungen notwendig, um sich mit neuen technologischen Konzepten aus dem Labor vorteilhaft im Weltmarkt positionieren zu können. Trotz des Druckes auf die Zell- und Modulhersteller profitiert derzeit die deutsche Industrie im Bereich der Materialien als Zulieferer und hat im Bereich des Maschinenbaus zur Herstellung des Produktionsequipments noch eine führende Stellung inne, die es auszubauen gilt. Dies wird auch durch weitergehende F&E-Arbeiten gesichert.

Die wesentlichen Aufgaben der F&E sind

- Prozessoptimierung,
- Steigerung der Wirkungsgrade und des Durchsatzes
- sowie die Verbesserung der Nachhaltigkeit in der gesamten Produktionskette.

Um diese F&E-Aufgaben umzusetzen, ist auch weiterhin öffentliche Förderung in den nächsten Jahren notwendig. Hier gilt es insbesondere, die Kontinuität der Förderung zu bewahren und gleichzeitig die richtigen Rahmenbedingungen zu setzen.

## Kristallines Silizium – Industrielle Entwicklungen

Etwa 93% aller installierten Module bestehen aus mono- oder multi-kristallinem Silizium (c-Si). Betrachtet man die käuflich zu erwerbenden Modulwirkungsgrade, so liegen diese im Bereich von 16%–24%, wobei sich der Marktanteil für die Top-



**Fraunhofer ISE**

Dr. Andreas Bett  
andreas.bett@ise.fraunhofer.de

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

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

### HZB

Prof. Dr. Rutger Schlatmann  
rutger.schatmann@helmholtz-berlin.de

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

### ISFH

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

Dr. Bianca Lim  
lim@isfh.de

### FZ Jülich

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

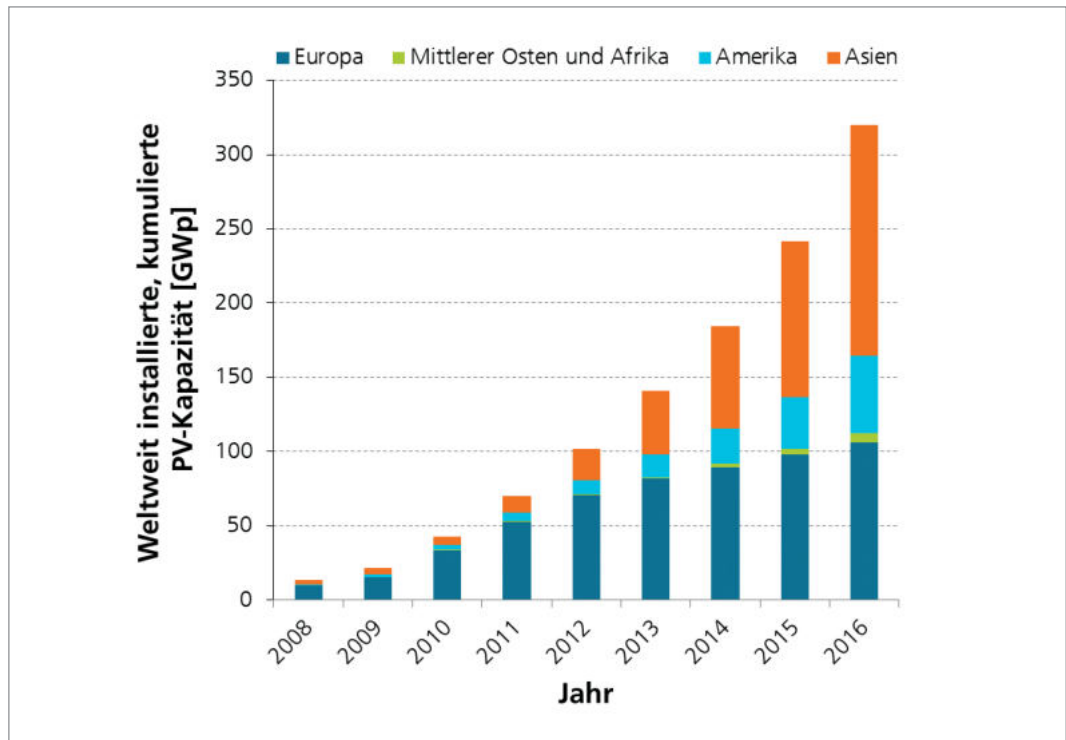
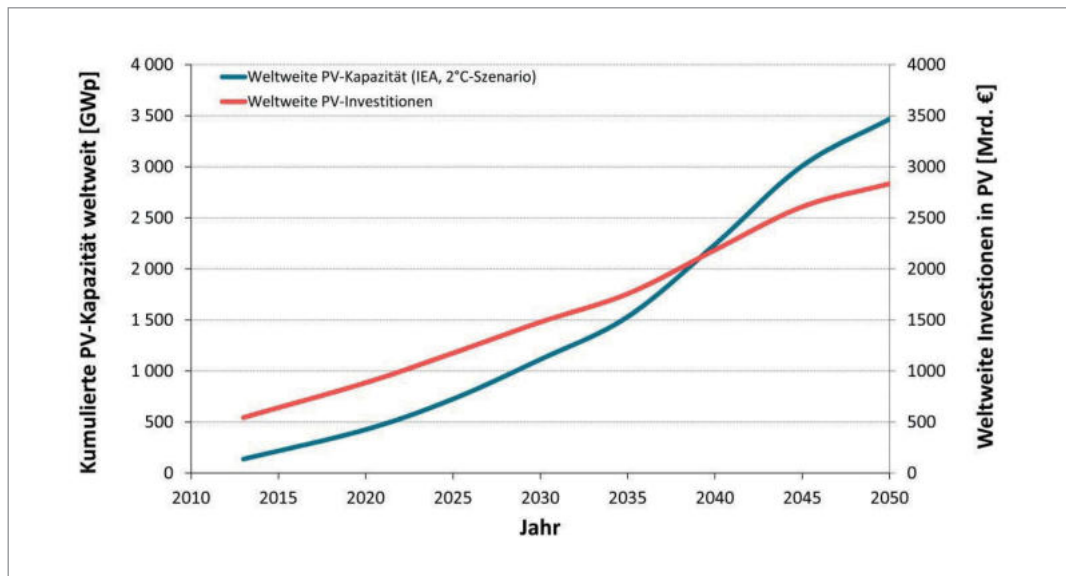


Abbildung 1

a) Entwicklung der kumulierten PV-Leistung weltweit zwischen 2006 und 2016 [1]

b) Szenario der IEA für die langfristige Entwicklung des PV-Marktes [3]. Auf der rechten Achse ist entsprechend das geschätzte, kumulierte Marktvolumen nach eigenen Berechnungen aufgetragen.



klassen im unteren Prozentbereich befindet. Der weitaus dominierende Teil liegt im Wirkungsgradbereich bis 20%. Der Grund ist in der bisher verwendeten Solarzellenstruktur zu sehen, die vergleichsweise einfach aufgebaut ist und als Al-BSF (Aluminium-Back Surface Field) Zelle bezeichnet wird. Diese in [Abbildung 2a](#)) gezeigte Zellstruktur verwendet auf der Vorderseite eine mit einer dünnen, optisch transparenten Schicht versehene Textur, welche eine effiziente Lichteinkopplung und geringe elektrische Verluste an der Vorderseite der Solarzelle erlaubt. Auf der Rückseite wird eine flächige Aluminiumschicht aufgebracht, welche auch als Rückseitenkontakt

dient. Diese Solarzellenarchitektur wurde zunächst im Labor und dann auch in der industriellen Produktion über viele Jahre optimiert und hat heute einen typischen Produktionswirkungsgrad von ca. 20% erreicht, siehe [Abbildung 2b](#). Diese Solarzellenstruktur kommt damit an ihr Wirkungsgradlimit und es müssen neue Solarzellenarchitekturen industriell realisiert werden, welche schon vor einiger Zeit im Labor entwickelt wurden.

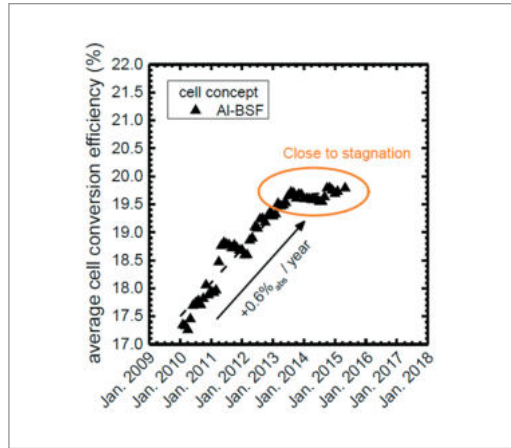
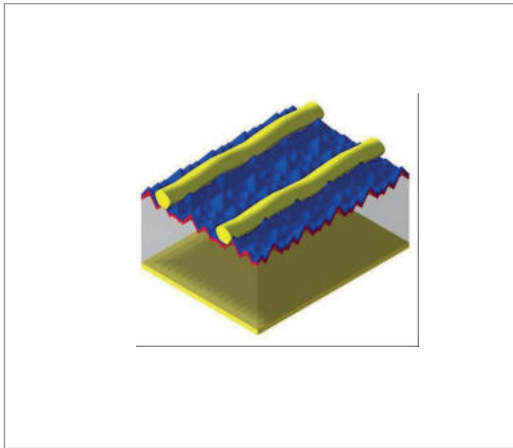


Abbildung 2

a) Al-BSF (Aluminium-Back Surface Field) Solarzelle (schematischer Aufbau)

b) Entwicklung der Wirkungsgrade von Al-BSF-Solarzellen in der industriellen Produktion (nach [7]).

Derzeit werden daher PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) wie sie beispielhaft in ► *Abbildung 3a* dargestellt sind, industriell eingeführt. Der zentrale Unterschied zur Al-BSF Struktur ist, dass an der Rückseite der Solarzelle eine technologisch aufwändigere Prozessfolge eingeführt wird, um die elektrischen Verluste an der Rückseite der Solarzelle zu minimieren. Dazu wird die Oberfläche mit einer flächigen, dielektrischen Schicht versehen, die dann lokal geöffnet wird, um einen direkten Halbleiter-Metall-Kontakt zur Abführung des Stroms zu ermöglichen. Der Vorteil dieser Technologieabfolge ist, dass auch auf der Rückseite ein Metallgitter statt eines flächigen Kontakts aufgebracht werden kann [4]. Somit kann auch die Rückseite der Solarzelle beleuchtet werden und dieser Beitrag kann zu einer weiteren Ertrags-erhöhung in speziellen Anwendungsfällen führen. Solche Solarzellen werden Bifazial- oder PERC+ Zellen genannt und werden z. B. von SolarWorld produziert. Bei entsprechender Anwendung kann hier bis zu 30% mehr Ertrag aus einer Zelle erwartet werden. Mit PERC-Solarzellen werden heute in der industriellen Produktion bereits Wirkungsgrade > 21% erzielt, im Labor wurden bis zu 25% nachgewiesen [5]. Die PERC-basierenden Strukturen werden derzeit in großem Stil in die industrielle Produktion eingeführt und es ist in den kommenden Jahren durch konti-

nuierliche F&E mit weiteren Wirkungsgradsteigerungen zu rechnen. In der industriellen Umsetzung werden Wirkungsgrade bis 23,5%–24,0% möglich sein [6], siehe ► *Abbildung 3b*. Sind diese Wirkungsgrade in der Produktion erreicht, stößt man erneut an Grenzen und es müssen neue Strukturen eingeführt werden, die sich heute bereits in der Forschung befinden.

### Kristallines Silizium – Status Vorlaufforschung

Eine Weiterentwicklung der PERC-Solarzellenstruktur beinhaltet eine Reduzierung der elektrischen Verluste am Halbleiter-Metall-Kontakt durch sogenannte passivierende Kontakte. Dazu wurden in den vergangenen Monaten an den Instituten neue Technologien entwickelt. So wurde beim Fraunhofer ISE das TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)-Konzept und am ISFH der POLO (Poly-Si-on-Oxide)-Kontakt entwickelt. Für technologisch Interessierte sei auf die weiterführende Literatur verwiesen [9, 10]. Beide Technologien verwenden eine dünne passivierende dielektrische Schicht worauf eine Schicht Poly-Silizium folgt. Das am Fraunhofer ISE entwickelte TOP-Con-Konzept wurde sehr erfolgreich auf n-dotiertes

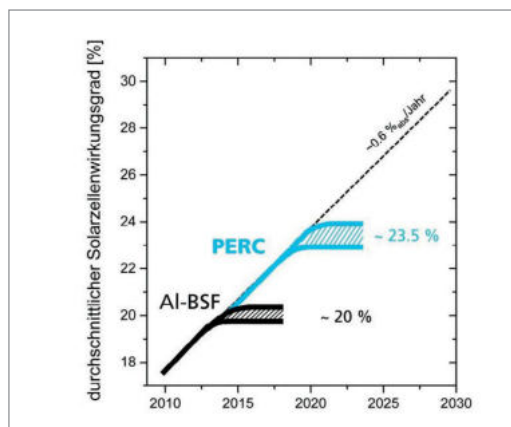
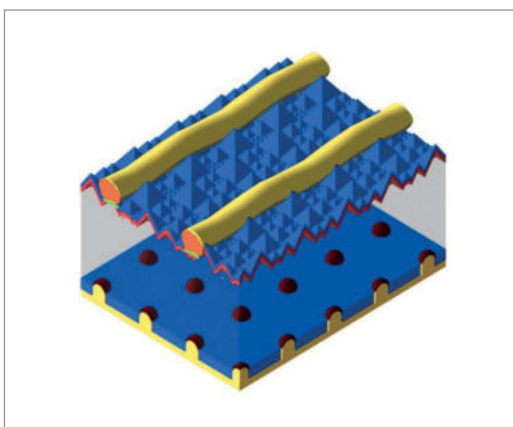


Abbildung 3

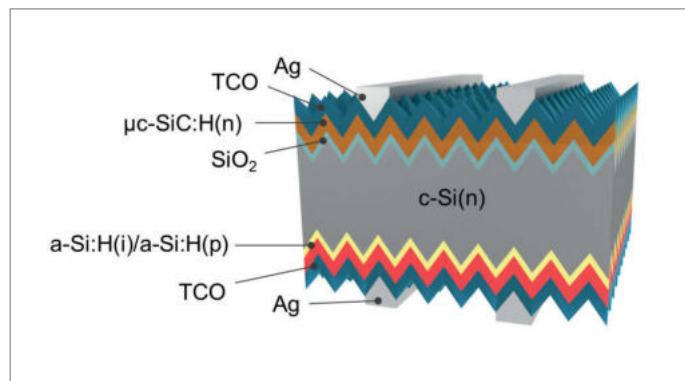
a) PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)-Solarzelle (schematischer Aufbau)

b) Entwicklung und Prognose der Wirkungsgrade von PERC-Solarzellen in der industriellen Produktion (nach [8]).

Tabelle 1  
**Spitzenwirkungsgrade**  
 von *c*-Si-Solarzellen mit  
 passivierten Kontakten  
 sowie von Mehrfach-  
 solarzellen auf Silizium  
 \* bestätigt vom Fraunhofer ISE  
 Callab  
 \*\* bestätigt vom ISFH-CalTeC

Konzept	Material	Area	Voc [mV]	Jsc [mA/cm <sup>2</sup> ]	FF [%]	H [%]
TOPCon	<i>n</i> -Typ Mono	4 cm <sup>2</sup> (da)	724	42,9	83,1	25,8*
TOPCon	<i>n</i> -Typ Multi	4 cm <sup>2</sup> (da)	674,2	41,1	80,5	22,3*
TOPCon	<i>n</i> -Typ Mono	100 cm <sup>2</sup> (ap)	713	41,4	83,1	24,5*
POLO	<i>n</i> -Typ Mono	244,15 cm <sup>2</sup> (t)	714	38,5	81,1	22,3
POLO	<i>p</i> -Typ Mono	3,97 cm <sup>2</sup> (da)	723	41,9	82,6	25,0**
Mehrfachsolarzelle, monolithisch	GaInP/GaAs/ <i>c</i> -Si	3,984 cm <sup>2</sup> (ap)	3127	12,7	83,8	33,3
Mehrfachsolarzelle, mechanisch gestapelt	GaInP/GaAs// <i>c</i> -Si	1 cm <sup>2</sup> (da)	2535 670	13,43 10,4	87,9 78,8	35,4

Abbildung 4  
**Solarzelle mit  
 pn-Heterostruktur**  
 (schematische Darstellung)



Siliziummaterial angewandt. Mit dem am ISFH entwickelten POLO-Konzept wurden sehr erfolgreich Rückkontaktsolarzellen hergestellt, die für beide Kontakte POLO-Schichten verwenden.

► **Tabelle 1** zeigt die im Labor erzielten Spitzenwirkungsgrade.

Anzumerken ist, dass die erzielten Werte für das mono-kristalline mit 25,8% sowie für das multi-kristalline Silizium mit 22,3% die weltweit besten Wirkungsgrade für beidseitig kontaktierte Solarzellen darstellen. Am ISFH wurden *n*- und *p*-dotierte POLO-Kontakte bereits mit Siebdruckmetallisierung verknüpft und damit Wirkungsgrade von 22,3% erzielt, siehe ► **Tabelle 1**. Die Technologie der passivierten Kontakte lässt somit auch in industrieller Umsetzung Wirkungsgrade mit mehr als 25% erwarten (siehe auch ► **Abbildung 7**)

Ein weiterer Ansatz mit Potenzial für höhere Wirkungsgrade ist eine Solarzellenstruktur, die den *pn*-Übergang nicht nur im Siliziummaterial realisiert, sondern über eine *pn*-Heterostruktur. Hier erfolgt die Funktionalisierung der Solarzelle über sehr dünne intrinsische Passivier- und dotierte Kontaktschichten. Beispielhaft ist eine solche Struktur in ► **Abbildung 4** gezeigt.

Weitere Dünnschichtmaterialien, die auf beiden Seiten der Solarzelle zum Einsatz kommen, sind  $\mu$ c-Si:H

und  $\mu$ c-SiOx:H. Diese sogenannte SHJ (Silizium Heterojunction) oder HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer)-Solarzellen haben den Vorteil, dass sehr hohe offene Klemmspannungen aufgrund der sehr guten Oberflächenpassivierung möglich sind und dass niedrigere Prozesstemperaturen eingesetzt werden. Eine Herausforderung bei dieser Struktur ist die Bereitstellung geeigneter Heteromaterialien, die einerseits eine hohe optische Transparenz und andererseits eine gute elektrische Leitfähigkeit haben sollen. Zudem soll die Oberfläche gut passivierbar sein, um die elektrischen Verluste zu minimieren. Derartige Solarzellen haben Spitzenwirkungsgrade von 25,1% erreicht [11]. Derzeit entstehen die ersten Fabriken, die SHJ-Solarzellen und -module in Massenproduktion fertigen.

Schließlich wird noch der technologische Ansatz verfolgt, die Abschattungsverluste durch das Metallgrid auf der Vorderseite zu vermeiden, indem beide Kontakte der Solarzelle auf der Rückseite platziert werden. Dieser Ansatz wird BJC (back-junction cell) genannt. In Kombination mit dem HIT-Ansatz wurde in einer Zelle der Firma Kaneka der derzeitige Rekordwirkungsgrad von 26,7% für eine Silizium-solarzelle realisiert [5]. Bis diese Technologie in großem Maßstab kostengünstig in der industriellen Umsetzung sein wird, müssen noch mehrere Jahre Entwicklungsleistungen erbracht werden, siehe auch ► **Abbildung 7**.

## Mehrfachzellen auf c-Si

Das physikalische Limit für reine Siliziumsolarzellen wurde schon vor Jahren mit 29,4% [12] berechnet. Mit dem heutigen Laborrekordwert ist man schon sehr nahe an dieser physikalischen Grenze angelangt. Um diese physikalische Barriere zu überwinden, muss Silizium mit anderen Materialien kombiniert werden. Stapelsolarzellen sind aus unterschiedlichen Materialien mit dann zwei oder mehreren pn-Übergängen zusammengesetzt. Sie können monolithisch zusammengesetzt und damit mit nur einem Front- und Rückkontakt kontaktiert werden oder aber mit einer separaten Kontaktierung jedes pn-Übergangs realisiert werden, siehe ► *Abbildung 5*.

Das Ziel ist, durch eine bessere Ausnutzung des Solarspektrums den theoretischen Wirkungsgrad von Einfachzellen deutlich zu übertreffen. Die Technologie wird schon seit vielen Jahren mit III-V-Halbleitern für die Anwendung im Weltraum auf Satelliten und in terrestrischen Konzentratorsystemen genutzt. So wurde der höchste Solarzellenwirkungsgrad von 46,1% mit einer 4-fach Zelle auf Basis der III-V-Halbleiter und unter konzentrierter Lichteinstrahlung erzielt [13].

► *Abbildung 6* zeigt graphisch, wie Materialien mit unterschiedlicher Bandlücke das Sonnenspektrum effizienter nutzen können. Die hochenergetischen Photonen im blau/grün/gelben Spektralbereich werden in Materialien mit höherer Bandlücke als Silizium aufgrund geringerer Thermalisierungsverluste effizienter genutzt. Es gibt verschiedene Halbleitermaterialien, die als Oberzelle(n) auf c-Si-Solarzellen aufgebracht werden könnten. Vielversprechende Optionen sind III-V-Halbleiter, Perowskite und auch Chalkopyrite. In jüngerer Zeit wurden bereits erfolgreiche Experimente mit III-V-Halbleitern auf Si durchgeführt. So wurde kürzlich eine Dreifachszelle mit einer Unterzelle aus aktivem Silizium realisiert. Hierbei wurde die Wafer-Bonding-Technologie eingesetzt, bei der zwei Halbleiterstrukturen auf atomarer Ebene verbunden werden, so dass diese letztlich ein monolithischer Block sind. Solche monolithischen

Dreifachzellen auf c-Si wurden am Fraunhofer ISE hergestellt und erzielen einen Wirkungsgrad von 33,3%. Herausforderungen bestehen insbesondere darin, dass die Material- und die Produktionskosten gesenkt werden müssen. Eine Alternative zu monolithischen Mehrfachszellen ist die Realisierung eines mechanischen Stapels. Hier werden zwei separat entwickelte Solarzellen so übereinander positioniert, dass das transmittierte Licht aus der Oberzelle in der Unterzelle gewandelt werden kann. Die beiden Solarzellen haben jeweils eine separate elektrische Kontaktierung. Ein solcher Ansatz wurde am ISFH in Zusammenarbeit mit dem NREL in den USA erprobt und es konnte ein Wirkungsgrad von 35,4% demonstriert werden [14].

## Zusammenfassung

Die Entwicklung der Si-Solarzelle verzeichnete in den letzten Jahren große Fortschritte. Zunächst ist die erfolgreiche industrielle Umsetzung zu benennen. Die Al-BSF Solarzelle ist zum Massenprodukt geworden und erreicht Spitzenwirkungsgrade von 20%. Um den Wirkungsgrad weiter zu steigern, setzt die Industrie auf die PERC-Strukturen, mit denen in der Endausbauphase Wirkungsgrade von ca. 24% in der industriellen Fertigung möglich sein sollten. Im Labor werden bereits die weitergehenden Konzepte erprobt und gezeigt, dass noch höhere Wirkungsgrade möglich sind.

Ein nächster Technologieschritt ist neue passivierte Kontaktstrukturen zu entwickeln. Hier wurden im Labor an deutschen Forschungsinstituten schon Spitzenwirkungsgrade von 25,7% für monokristallines und 22,3% für multikristallines Silizium erzielt. Kombiniert man diese Technologie mit dem Konzept der Heterojunction und des Rückseitenkontaktierens sind auch Wirkungsgrade nahe 28% möglich. Damit wird die physikalische Grenze von 29,4% für Silizium fast erreicht.

Die nächste Generation von Solarzellen werden Mehrfachszellen mit Silizium als Unterzelle sein.

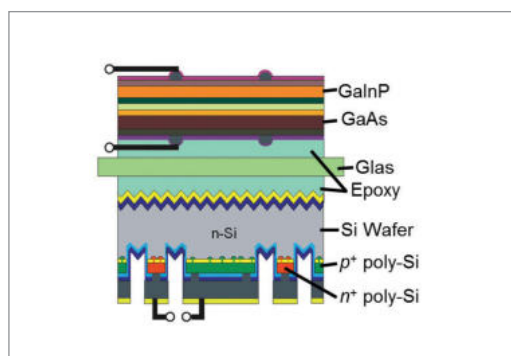
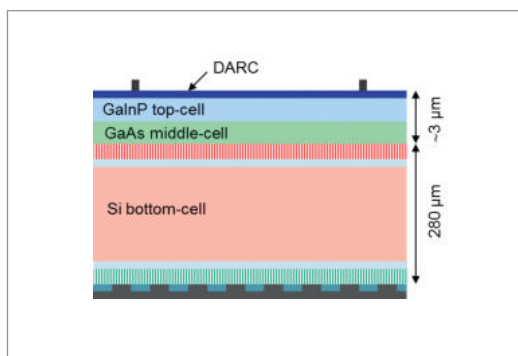


Abbildung 5  
Stapelsolarzellen auf Silizium in monolithischer Bauweise (a) und mit separaten Teilzellen (b).

Abbildung 6

**Effiziente Ausnutzung des Sonnenspektrums durch Mehrfachsolarzellen.**

**b) Einfachsolarzelle mit nur einem Absorbermaterial:**

Hier entstehen Verluste durch Transmission (niederenergetisches (rotes) Licht) und durch Thermalisierung (hocheenergetisches (blaues) Licht).

**a) und c) Mehrfachsolarzellen verwenden Teilzellen mit unterschiedlichen Absorbermaterialien.** Diese verwerten verschiedene Anteile des Sonnenspektrums und reduzieren so Verluste.

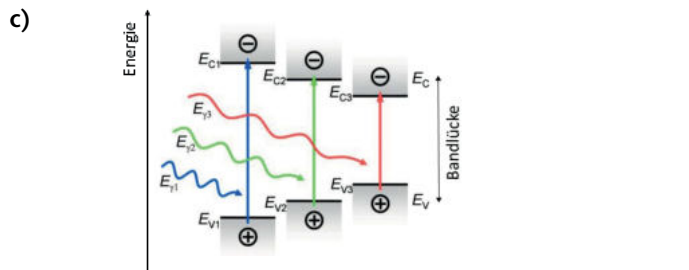
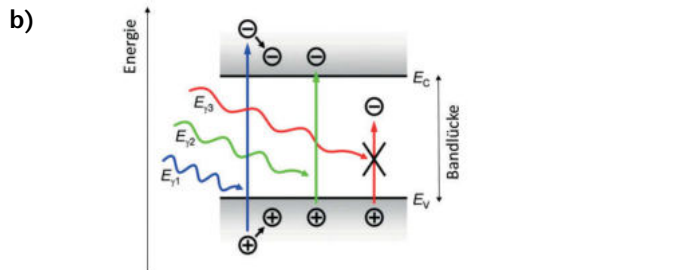
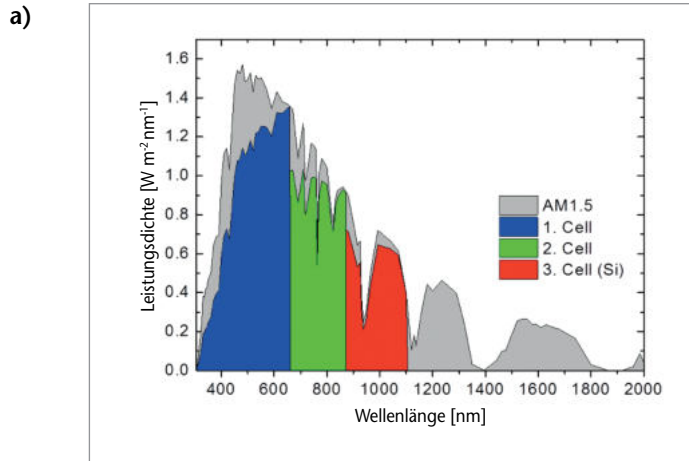
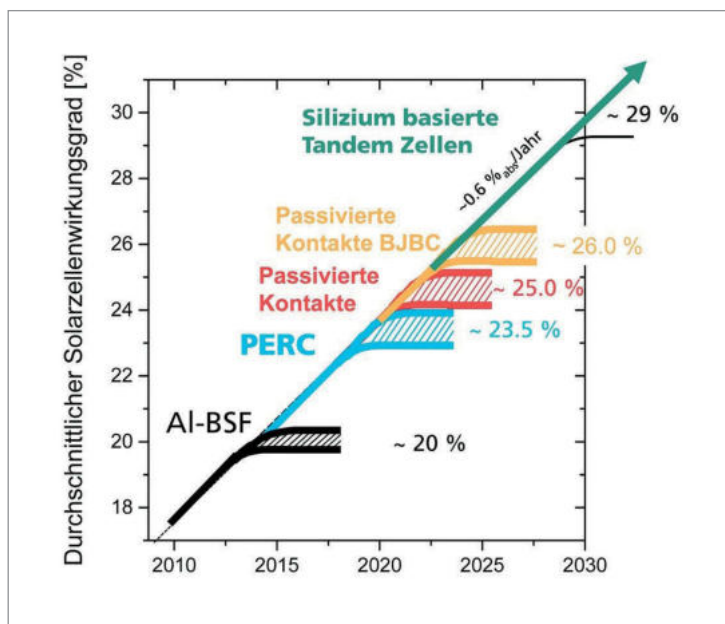


Abbildung 7

**Entwicklung und Prognose der Wirkungsgrade verschiedener Solarzellenkonzepte in der industriellen Produktion (nach [8]).**





Als Material für die Oberzellen kommen Perowskite oder die III-V-Halbleiter in Frage. Mit den III-V Halbleitern und mechanischer Stapelung wurde bereits ein Wirkungsgrad von 35,4% und im monolithischen Fall von 33,3% demonstriert.

Die F&E im Bereich der Photovoltaik hat noch große Aufgaben vor sich. Die Herstellungskosten konnten in der Vergangenheit schon dramatisch reduziert werden, so dass in Deutschland im besten Fall der mit PV erzeugte Strom unter 5 €cent/kWh kostet. Die Kostensenkung wird weitergehen. Künftig werden ökologische Aspekte noch stärker in den Fokus rücken. So gilt es, die Produktionskette vom Ursprung bis zur Entsorgung nachhaltig zu gestalten und damit die globalen Ressourcen in allen Aspekten zu schonen. Die Photovoltaiktechnologie ist eine der zentralen Säulen für die globale Energiewende und bietet damit ein riesiges Marktpotenzial. Deutschland ist aktuell sowohl technologisch als auch wirtschaftlich sehr gut aufgestellt, um von der Zukunftstechnologie Photovoltaik zu profitieren.

## Quellenverzeichnis

- [1] Fraunhofer ISE, Photovoltaics Report, (2017).
- [2] Henning, H.-M. and Palzer, A., Was kostet die Energiewende? – Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050, (2015).
- [3] IEA, Energy Technology Perspectives 2016, Paris: International Energy Agency (2016).
- [4] Dullweber, T., Kranz, C., Peibst, R., Baumann, U., Hannebauer, H., Fülle, A., Steckemetz, S., Weber, T., Kutzer, M., Müller, M., Fischer, G., Palinginis, P. and Neuhaus, H., „PERC+: industrial PERC solar cells with rear Al grid enabling bifaciality and reduced Al paste consumption“, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 24, 2016.
- [5] Green, M.A., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E.D., Levi, D.H., Hohl-Ebinger, J. and Ho-Bailie, A.W.Y., „Solar cell efficiency tables (version 50)“, *Progress in Photovoltaics* 25, 2017.
- [6] Min, B., Müller, M., Wagner, H., Fischer, G., Brendel, R., Altermatt, P.P. and Neuhaus, H., „A roadmap toward 24%-efficient PERC solar cells in industrial mass production“, *IEEE Journal of Photovoltaics* 7, 2017.
- [7] Fertig, F., Lantzsch, R., Mohr, A., Schaper, M., Bartzsch, M., Wissen, D., Kersten, F., Mette, A., Peters, S., Eidner, A., Cieslak, J., Duncker, K., Junghänel, M., Jarzembowski, E., Kauert, M., Faulwetter-Quandt, B., Meißner, D., Reiche, B., Geißler, S., Hörnlein, S., Klenke, C., Niebergall, L., Schönmann, A., Weihrauch, A., Stenzel, F., Hofmann, A., Rudolph, T., Schwabedissen, A., Gundermann, M., Fischer, M., Müller, J.W. and Jeong, D.J.W., „Mass production of p-type Cz silicon solar cells approaching average stable conversion efficiencies of 22%“, *Energy Procedia* 124, 2017.
- [8] Hermle, M., *Silicon Solar Cells – Current Production and Future Concepts*, in Annual Conference of the European Technology and Innovation Platform Photovoltaics – ‚PV Manufacturing in Europe‘. 2017: Brussels, Belgium.
- [9] Feldmann, F., Steinhauser, B., Arya, V., Büchler, A., Brand, A.A., Kluska, S., Hermle, M. and Glunz, S.W., *Evaluation of TOPCon technology on large area solar cells*, in 33<sup>rd</sup> European PV Solar Energy Conference and Exhibition. 2017: Amsterdam, The Netherlands.
- [10] Peibst, R., Reiter, S., Larionova, Y., Reineke-Koch, R., Brendel, R., Tetzlaff, D., Krügener, J., Wietler, T., Höhne, U., Kähler, J.-D. and Mehlich, H., *Building Blocks for Industrial, Screen-Printed Two Sides-Contacted POLO Cells with Highly Transparent ZnO: Al Layers*, in 33<sup>rd</sup> European PV Solar Energy Conference and Exhibition. 2017: Amsterdam, The Netherlands.
- [11] Adachi, D., Hernández, J.L. and Yamamoto, K., „Impact of carrier recombination on fill factor for large area heterojunction crystalline silicon solar cell with 25.1% efficiency“, *Applied Physics Letters* 107, 2015.
- [12] Richter, A., Hermle, M. and Glunz, S.W., „Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells“, *IEEE Journal of Photovoltaics* 3, 2013.
- [13] Dimroth, F., Tibbits, T.N.D., Niemeyer, M., Predan, F., Beutel, P., Karcher, C., Oliva, E., Siefert, G., Lackner, D., Fuß-Kailuweit, P., Bett, A.W., Rainer Krause, Drazek, C., Guiot, E., Wasselin, J., Tauzin, A. and Signamarcheix, T., „Four-Junction Wafer-Bonded Concentrator Solar Cells“, *IEEE Journal of Photovoltaics* 6, 2016.
- [14] Rienäcker, M., Kajari-Schröder, S., Niepelt, R., Brendel, R., Peibst, R., Warren, E., Schnabel, M., Stradins, P. and Tamboli, A., *Maximum Power Extraction Enabled by Monolithic Tandems Using Interdigitated Back Contact Bottom Cells with Three Terminals*, in 33<sup>rd</sup> European PV Solar Energy Conference and Exhibition. 2017: Amsterdam, The Netherlands.

# Dünnschichtphotovoltaik – Technologien für die Energiewende



## HZB

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

Dr. Eva Unger  
eva.unger@helmholtz-berlin.de

## FZ Jülich

Prof. Dr. Thomas Kirchartz  
t.kirchartz@fz-juelich.de

## Fraunhofer IEE (vorm. IWES)

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

## KIT

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

## ZAE Bayern

Dr. Andreas Baumann  
andreas.baumann@zae-bayern.de

## ZSW

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

Dr. Friedrich Kessler  
friedrich.kessler@zsw-bw.de

## 1. Einleitung

Photovoltaik (PV), also die direkte und emissionsfreie Erzeugung von elektrischer Energie aus Sonnenlicht, hat in den letzten Jahrzehnten weltweit ein rasantes Wachstum erfahren. So stieg in Deutschland die durch PV-Anlagen installierte Leistung bis Ende 2016 auf etwa 41 GWp und weltweit auf über 320 GWp. Sie entspricht einem Anteil am Nettostromverbrauch in Deutschland von etwa 6,9% bzw. weltweit von etwa 1,3% [1]. Eine wesentliche Grundlage für dieses Wachstum war und ist die stete Verbesserung von Technologien, Prozessen und Produkten insbesondere in Hinblick auf Effizienz und Kosten der Solarmodule und der weiteren systemseitigen Komponenten. Dies zeigt sich beispielsweise bei den Preisen für Solarmodule, die in einem Zeitraum von ca. 30 Jahren eine Reduktion um Faktor 53 auf 0,44 €/Wp im Jahr 2016 erfuhren. [1] [2]

Ermöglicht wurde die Entwicklung der PV vor allem durch eine intensive, auch öffentlich geförderte Zusammenarbeit von Forschung und Industrie sowie richtungsweisende politische Rahmenbedingungen (z. B. Einspeisevergütungen).

Technologisch gesehen, ist das Kosteneinsparpotenzial für solaren Strom auch weiterhin sehr groß. Neben zu erwartenden Skalierungseffekten in der Massenproduktion und Reduktion der Systemkosten sind technische Innovationen der Treiber für weiteres Wachstum der Photovoltaik. Dabei werden für das Gelingen der Energiewende neben klassischen PV-Kraftwerken auch PV-Anlagen im Fokus stehen, die im urbanen Raum, z. B. in Bauwerken, integriert sind und vor Ort dezentral und emissionsfrei Strom erzeugen.

Der überwiegende Teil der verwendeten Solarmodule beruht heutzutage auf kristallinen Silizium-solarzellen. Ihr Anteil an der Gesamtproduktion lag im Jahr 2016 bei etwa 94%. Der Marktanteil der sogenannten Dünnschichtmodule betrug dagegen nur etwa 6%. [1]

Schwerpunkt des *Technologieberichtes Photovoltaik* ist dementsprechend auch die kristalline PV, deren Stand in einem separaten Beitrag diskutiert wird. Im Rahmen dieses Artikels werden im Folgenden Dünnschichttechnologien diskutiert, die zwei zentrale Herausforderungen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung adressieren: Erhöhung des Solarzellen-Wirkungsgrades und Reduzierung der Herstellungskosten [3].

## 2. Dünnschichtsolarmodule – etablierte Technologien

Dünnschichtsolarmodule sind Photovoltaikmodule, bei denen sehr dünne photoaktive Schichten auf Trägermaterialien, wie z. B. Glas oder Folien, aufgebracht wurden. Diese Schichten sind im Vergleich zu klassischen, Wafer-basierten Solarzellen etwa um den Faktor 50 bis 100 (im Fall organischer PV sogar bis Faktor 1000) mal dünner und bieten dadurch neben der Materialersparnis vor allem Vorteile in der Herstellung und der Gestaltung der Module. So kommen in der Produktion kostengünstige Verfahren zur Beschichtung von großen Flächen zum Einsatz (z. B. analog zur Architekturglasbeschichtung bzw. im Rolle-zu-Rolle-Verfahren). Inline-Produktionstechnologien ermöglichen eine voll integrierte Herstellung, an deren Anfang das Substrat, beispielsweise das Glas/die Folie, und an deren Ende das verkapselte Modul steht.

Auch die elektrischen Eigenschaften der Dünnschichtmodule bieten bestimmte Vorteile gegenüber der klassischen Konkurrenz. Ein niedriger Temperaturkoeffizient<sup>1</sup> und eine vergleichsweise gute Energieausbeute bei niedrigen Bestrahlungsstärken ermöglichen gute Leistungserträge, insbesondere gemittelt über die Jahreszeiten und in Regionen mit einem hohen Anteil an indirekter (diffuser) Einstrahlung [4].

Die Herstellungstechnologien für Dünnschichtmodule erlauben die Beschichtung von verschiedenen Substratformen, sodass „maßgeschneiderte“ und sogar mechanisch flexible Module möglich sind. Gleichzeitig lassen sich Transparenz und Farbe variieren. Damit eignet sich diese Art von Modulen besonders für die Integration in Gebäudehüllen (BIPV – bauwerkintegrierte PV). Während die klassische Solarzellentechnik für das lichtabsorbierende Material ausschließlich auf den Halbleiter Silizium zurückgreift, kommen in den Dünnschichttechnologien verschiedene organische und anorganische Halbleiter und Halbleiterverbindungen zur Anwendung.

Eine Herausforderung für alle Dünnschichttechnologien ist der immer noch vergleichsweise geringere Wirkungsgrad gegenüber den Siliziumwafer-basierten (insbesondere monokristallinen) Solarmodulen. Betrachtet man jedoch die Entwicklung der Solarzel-

<sup>1</sup> Temperaturkoeffizient meint hier die relative Veränderung des Wirkungsgrades bei Änderungen der Temperatur.

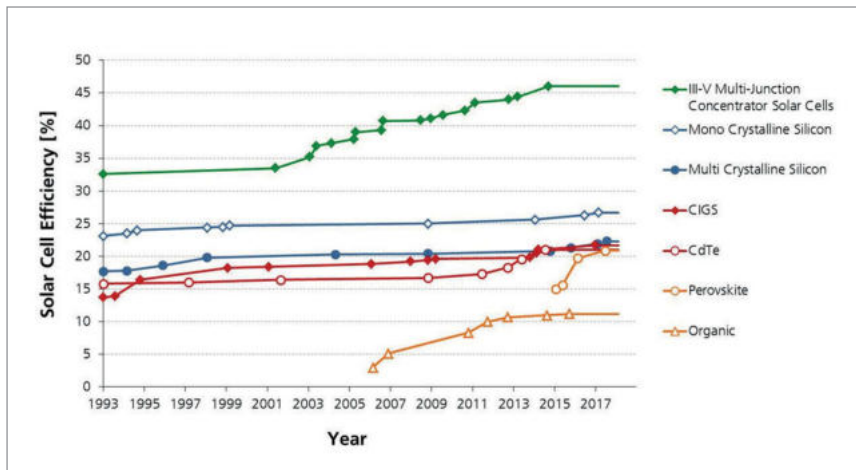


Abbildung 1

**Entwicklung der Solarzellenwirkungsgrade verschiedener Zelltechnologien über die Zeit.** Hier diskutierte Dünnschichttechnologien: in Rot: CIGS und CdTe in Orange: Perovskite und organische Photovoltaik (Stand Feb. 2018, Quelle: [1]).

ineffizienz, insbesondere in den letzten 5-10 Jahren, ist eine deutliche Steigerung des Wirkungsgrades aller Dünnschichttechnologien zu sehen.

► **Abbildung 1** zeigt diese Entwicklung für alle gängigen Solarzellentechnologien [1].

Blau dargestellt sind die klassischen Silizium-Wafer, rot die etablierten Dünnschichttechnologien CIGS (Kupfer-Indium-Gallium-Selenid/Sulfid) und CdTe (Cadmiumtellurid).

Die orangen Kurven zeigen die Entwicklung der aktuell besonders vielversprechenden Perovskite und der organischen Solarzellen, zweier Materialgruppen, die sich insbesondere durch ihre einfache und kostengünstige Herstellungsweise auszeichnen.

Ebenfalls dargestellt (in Grün) sind auch die Wirkungsgrade sogenannter III-V-Stapelzellen, also Solarzellen, die aus Elementen der III. und V. Hauptgruppe des Periodensystems hergestellt wurden (z. B. GaAs, InP) und aus mehreren übereinandergestapelten Solarzellen bestehen. Aufgrund der hohen Herstellungskosten sind diese Materialien für eine flächenhafte, terrestrische Anwendung eher ungeeignet und finden vor allem in der Raumfahrt Anwendung sowie in Konzentrator-Anlagen. Letztere unterscheiden sich technologisch von der klassischen PV und verlangen beispielsweise immer eine direkte Sonneneinstrahlung und somit aufwendige Nachführsysteme. Diese Technologien werden in diesem Artikel nicht weiter diskutiert. ► **Abbildung 1** zeigt

außerdem, dass sowohl CIGS- als auch CdTe-Solarzellen (rote Kurven) die Wirkungsgrade von monokristallinem Silizium (blaue Kurve) im Labor erreicht bzw. übertroffen haben und damit ein sehr hohes Potenzial für effiziente Modultechnologien besitzen.

Während die Solarzellenwirkungsgrade die material-spezifischen Potenziale der einzelnen Technologien andeuten, zeigt ► **Tabelle 1** die Dünnschichtkonzepte, die bereits erfolgreich am Markt vertreten sind. Zum Vergleich sind auch die klassischen Wafer-basierten Technologien aufgeführt.

Der Marktführer CdTe hat hierbei den mit Abstand größten Anteil von etwa 60%. Der höchste Wirkungsgrad für ein CdTe-Modul liegt bei 18,6% und stammt von der Firma First Solar, USA [5], die auch der Vorreiter dieser Technologie ist und den Markt dominiert (installierte Produktionskapazität von 3 GW/a und Ankündigungen von weiteren 2,4 GWp/a bis 2020 [6]). Aufgrund der sehr niedrigen ausgewiesenen Kosten (<1US\$/Wp) kann First Solar auch als der Vorreiter aller Dünnschichttechnologien bezeichnet werden. Als Nachteil dieses Konzeptes wird im Allgemeinen das enthaltene Schwermetall Cadmium betrachtet, welches das Erschließen bestimmter Märkte (z. B. im asiatischen Raum) erschwert oder gar verhindert und das auf lange Sicht ein wirtschaftliches Risiko darstellt.

Technologie	Marktanteil der Technologie an Dünnschicht-PV (2017) [2]	Modulwirkungsgrad (Rekordwerte)
CdTe	60%	18,6% (First Solar) [4]
CIGS	25%	17,5% (Solibro GmbH) [6]
amorphes Si	15%	12,3% (Tokyo Electron) [4]
monokristallines Si		24,5% (Kaneka) [4]
multikristallines Si		19,9% (Trina Solar) [4]

Tabelle 1

**Marktanteil und Modulwirkungsgrad der am Markt am weitesten verbreiteten Dünnschichttechnologien im Vergleich zu klassischen, kristallinen Siliziumsolarmodulen**

Die zweithäufigste Dünnschichttechnologie mit einem Marktanteil von etwa 25% nutzt CIGS. Der Rekordwirkungsgrad für ein solches Solarmodul stammt von der deutschen Firma Solibro und beträgt 17,5% [7]. Marktführer mit Produktionskapazitäten von über 1 GWp/a ist der japanische Hersteller Solar Frontier. Weltweit lag die Produktionskapazität bei etwa 2 GWp/a [4]. Der Fokus der vergleichsweise jungen CIGS-Industrie liegt zum einen auf der Steigerung der Modulwirkungsgrade und damit verbunden auf der Reduktion der sogenannten Total Cost of Ownership (TCO) („Gesamtbetriebskosten“). Im „CIGS white paper“ [4], einer gemeinsamen Initiative der wichtigsten Vertreter der CIGS-Industrie und -Forschung, wird anhand einer klaren Roadmap gezeigt, wie die aktuellen TCO von 0,40 US\$/Wp auf unter 0,25 US\$/Wp gesenkt werden können.

Die amorphe Siliziumtechnologie gilt als die „Pioniertechnologie“ der Dünnschichtphotovoltaik. Sie ist bereits seit Jahrzehnten am Markt. Ausgehend von Kleingeräteanwendungen (Solartaschenrechner, Solaruhren, etc.) hat sie sich hin zu wahlweise flexiblen oder glasbasierten Solarmodulen weiterentwickelt. Der Vorteil dieser Technologie ist die Verfügbarkeit des Halbleiters Silizium und die Ungiftigkeit der verwendeten Materialien. Nachteil ist vor allem der relativ geringe Wirkungsgrad dieses Solarzellentyps. Der Rekordwirkungsgrad für eine amorph/nanokristalline Stapelsolarzelle von 12,7% (AIST) verglichen mit einem Rekordmodulwirkungsgrad von 12,3% (Tokyo Electron) [5] zeigt die Grenzen dieses Materialsystems. Amorphes Silizium hat aktuell (2016) noch einen Marktanteil von 15%, wird aber tendenziell zu Gunsten der anderen genannten Technologien an Bedeutung verlieren.

### 3. Dünnschichtsolarzellen – neuartige Konzepte

Neben den etablierten PV-Technologien werden weltweit noch einige andere vielversprechende Konzepte erforscht und entwickelt.

#### Perowskitesolarzellen

Insbesondere die sogenannten Perowskite erregen seit 2012 großes Interesse in der Fachwelt. Diese Materialgruppe besteht in der Regel aus hybriden organisch-anorganischen Halbleitern, basierend auf Blei oder Zinn sowie Halogenen (Iod, Chlor, Brom). Sie sind mit sehr einfachen Mitteln kostengünstig herzustellen. Verifizierte Wirkungsgrade von 22,7% konnten schon demonstriert werden [8].

Durch Änderungen der chemischen Zusammensetzung können Perowskite in ihrer Bandlücke variiert werden [9]. Damit eignen sie sich besonders gut für Stapelzellenkonzepte bei denen die Perowskitesolar-

zelle der Sonne zugewandt ist und den hochenergetischeren, also kurzwelligeren Anteil des Sonnenspektrums absorbiert. Dahinter absorbiert eine Basiszelle (beispielsweise eine klassische Silizium-solarzelle oder eine CIGS-Solarzelle) den langwelligeren Teil des Lichtes, den die Perowskitesolarzelle durchlässt. Mit solchen Stapelzellenkonzepten ist es möglich, die theoretischen Wirkungsgradbegrenzungen der verschiedenen Einzelzellenkonzepte zu übertreffen. Erste erfolgreiche Umsetzungen zeigen z.B. eine monolithisch integrierte Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle mit einem stabilisierten Wirkungsgrad von 23,6% [10] und eine sogenannte 4-Terminal-Perowskit-Silizium-Tandem Solarzelle mit sogar 26,7% [11]. Auch reine Perowskite-Dünnschicht-Konzepte, wie z. B. ein 4-Terminal-Perowskit-CIGS-Tandem-Minimodul mit 17,8% konnten schon gezeigt werden [12]. Die zentralen Forschungsthemen bei den Perowskiten sind ihre Langzeitstabilität und die Skalierung der Technologie. Außerdem stehen die weitere Verbesserung des Wirkungsgrades (z. B. durch Analyse der Defektmechanismen) und die Substitution des giftigen und wasserlöslichen Bleisalzes, das im Perowskitkristall verbaut wird, im Vordergrund.

#### Organische Photovoltaik

Eine andere besonders attraktive Solarzellentechnologie basiert auf organischen, also Kohlenwasserstoffbasierten Materialien. Die organische Photovoltaik zeichnet sich vor allem durch mechanisch hochflexible Module, eine große Farbvariabilität und optional eine hohe Transparenz aus. Organische Solarzellen können vollständig aus umweltfreundlichen Materialien hergestellt werden und besitzen eine konkurrenzlos niedrige Energierücklaufzeit von nur wenigen Monaten. Kommerzielle Anwendungen insbesondere im Consumer-Bereich (mobile Elektronik, ...) [13] sowie im Bereich der Bauwerksintegration [14] sind bereits erhältlich. Im Vergleich zu anderen Solarzellenkonzepten ist der Wirkungsgrad organischer Solarzellen derzeit noch geringer (13,2%) [15] und genau wie bei den Perowskiten ist die Langzeitstabilität ein zentrales Thema aktueller Forschungen.

#### Neuer Silizium-basierter Dünnschichtansatz

Neben den oben aufgeführten, neuartigen Materialsystemen wird auch noch ein weiterer, auf Silizium basierender Dünnschichtansatz verfolgt. Dabei wird eine dünne amorphe oder nanokristalline Siliziumschicht auf ein Trägermaterial (üblicherweise Glas) aufgebracht. Im Anschluss wird Laserlicht oder ein Elektronenstrahl über das Material geführt und schmilzt dieses kurzzeitig auf. Im darauffolgenden Erstarrungsprozess kristallisiert das Silizium zu größeren, geordneten Kristallen. Das Ergebnis ist eine dünne (ca. 10 bis 15 µm) Siliziumschicht, deren

elektrische Eigenschaften denen von hochreinem, defektarmen Silizium ähneln. Ein Wirkungsgrad von 14,2% wurde auf diese Weise bereits demonstriert [16]. Dieses Solarzellenkonzept verbindet das Potenzial hoher Wirkungsgrade der Silizium-Wafer-technologie mit den kostengünstigen Vorteilen einer Dünnschichttechnologie. Damit ist es auch besonders vielversprechend für den Einsatz als Basissolarzelle in Stapelzellkonzepten (z. B. in Kombination mit Perowskitsolarzellen).

#### 4. Multikriterienanalyse der Dünnschicht-Photovoltaik

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Technologieforschung für die Energiewende“ wurden die einzelnen Technologiefelder einer Multikriterienanalyse unterzogen. Im Folgenden wird nun die Dünnschicht-PV hinsichtlich ausgewählter Kriterien dieser Analyse beschrieben.

#### Kriterium 2 Forschungs- und Entwicklungsrisiken

Die hier bereits aufgeführten Dünnschichttechnologien befinden sich in verschiedenen Entwicklungsstadien. Zur Einordnung wird das international verwendete Konzept der Technology Readiness Level (TRL) verwendet. ► *Abbildung 2* zeigt die einzelnen Technologien bezogen auf ihr TRL. Dabei werden die Bezeichnungen aus dem Forschungsbericht beibehalten. Es ist zu beachten, dass bei allen Ansätzen die Einordnung bis in hohe TRL auch beinhaltet, dass Forschungsfragen auf niedrigerem TRL bestehen. Die bereits diskutierten, vielversprechenden Perowskite wurden im Technologiebericht an dieser Stelle nicht separat aufgeführt. Ihre Zuordnung fließt je nach Anwendungsziel zum einen in „A2 Stapelzellen auf c-Si und Module“ und in „A3 Dünnschicht-Si auf Glas, GaAs, ...“ mit ein.

Die Einordnung der Technologien hinsichtlich bestehender Risiken für Forschung und Entwicklung (F&E) ist in ► *Abbildung 3* dargestellt.

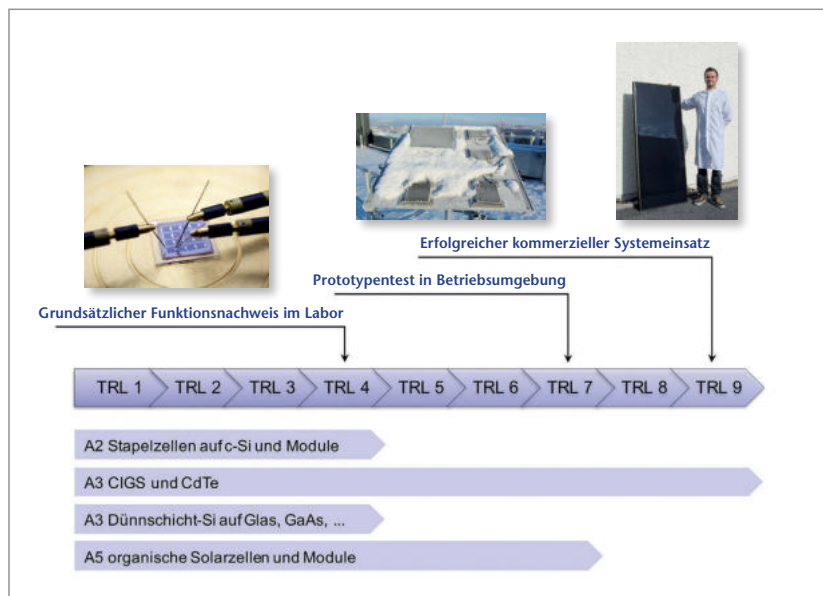


Abbildung 2  
**Technology Readiness Level (TRL)**  
der verschiedenen Dünnschichttechnologien

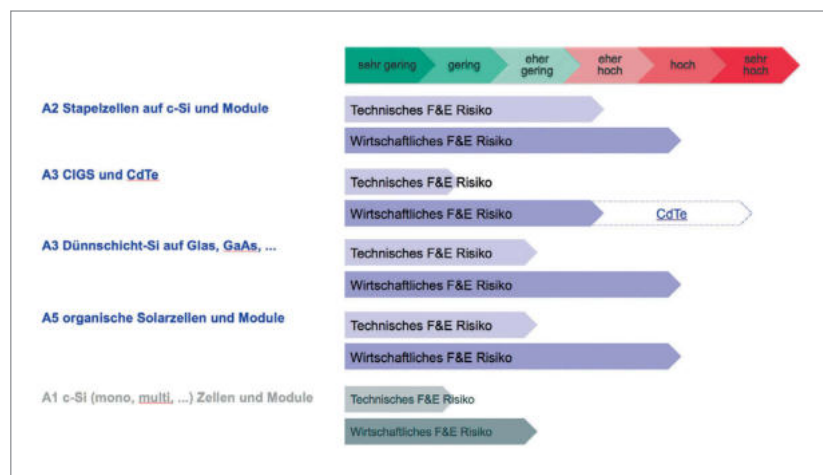


Abbildung 3  
**Risikobewertung**  
Bewertung der verschiedenen Dünnschichttechnologien hinsichtlich bestehender technischer und wirtschaftlicher Risiken für F&E im Vergleich zur kristallinen Siliziumtechnologie

Es wurden sowohl das technische als auch das wirtschaftliche F&E Risiko bewertet.

Das technische Risiko bezeichnet dabei die Einschätzung inwieweit ein Konzept aus technischen Gründen nicht erfolgreich sein könnte. Dazu zählen beispielsweise Fragen der Materialstabilität, Skalierbarkeit, material- oder prozessspezifischer Limitierungen. Ein geringes Risiko drückt dabei eine eher geringe Wahrscheinlichkeit aus, dass eine Entwicklung am Ende technisch nicht umsetzbar sein könnte. Ein hohes Risiko sieht technische/technologische Gründe für ein Scheitern eines Ansatzes als sehr wahrscheinlich an.

Das wirtschaftliche Risiko beinhaltet vor allem marktspezifische Aspekte, wie allgemeine Marktentwicklungen, Ressourcenverfügbarkeit, wirtschaftspolitische Rahmenbedingungen und anderes. Exemplarisch sei hier auf die wirtschaftlichen Risiken für CIGS und CdTe eingegangen. Obwohl beide Technologien bereits am Markt etabliert sind, müssen sie sich gegen eine dominante kristalline Siliziumtechnologie behaupten. Hier ist beispielsweise eine offene Frage, inwieweit CIGS seine Vorteile für BIPV-Technologien nutzen kann. Ein weiteres Thema sind mögliche Restriktionen hinsichtlich der Verwendung von Schwermetallen (z. B. Cd). Verschärfende (z. B. europäische) Richtlinien könnten hier einen Einfluss haben. Zum Vergleich ist in der Abbildung auch die Einschätzung für kristallines Silizium angegeben.

### Kriterium 3 Marktpotenziale

Photovoltaik hat in den vergangenen Jahren ein sehr starkes Wachstum erfahren. So betrug zwischen den Jahren 2000 und 2015 die jährliche Wachstumsrate der weltweiten PV-Installationen 42%. Der Anteil der PV an der weltweiten Stromproduktion beträgt aktuell rund 1% (235 TWh) und in Deutschland rund 7% (38,4 TWh). Allgemein wird der PV auch weiterhin ein starkes Wachstum vorhergesagt. Studien gehen davon aus, dass zukünftig ein deutlicher Anstieg des Anteils der PV an der weltweiten Stromerzeugung auf einen Anteil von 10% bis 25% zu verzeichnen sein wird [2].

In dieser Entwicklung wird sich die Dünnschichtphotovoltaik auch weiterhin in starker Konkurrenz zu den etablierten kristallinen Silizium-Technologien befinden, bei denen ebenfalls eine Weiterentwicklung hin zu effizienteren und kostengünstigeren Produkten erwartet werden kann. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass die aktuellen Dünnschichtkonzepte auf dem klassischen Solarstrommarkt (Freiflächenanlagen und Dachinstallationen) die kristallinen Technologien verdrängen werden oder ihnen kurz- bis mittelfristig Marktanteile abringen können. Jedoch bieten gerade Stapelzellenkonzepte in Verbindung

von Dünnschichttechnologien wie Perowskite mit kristallinen Siliziumsolarzellen auch in diesem Markt ein hohes Potenzial.

Aufgrund ihrer schon eingangs genannten spezifischen Eigenschaften haben die Dünnschicht-PV-Technologien aber inhärente Vorteile, die ihnen abseits des klassischen Solarstrommarktes vor allem andere Anwendungsfelder erschließen werden. Neben dem geringen Gewicht, das sie speziell auch für mobile Anwendungen interessant macht, ergeben sich vor allem aus der Möglichkeit der vielfältigen Gestaltung in Form, Farbe und Transparenz favorisierte Einsatzfelder mit großem Marktvolumen, wie bei der Bauwerkintegration oder auch bei mobilen Anwendungen. Im Hinblick auf die Gestaltung der Energiewende und die ambitionierten aber auch erforderlichen Ziele kommt der BIPV eine besondere Rolle zu. Allein in Deutschland gibt es etwa 2000 km<sup>2</sup> für PV-Anwendungen nutzbare Dach- und Fassadenflächen. Dies entspricht einem Anteil von nur 5% aller bebauten Flächen und bietet gleichzeitig das Potenzial bis zu 30% des Stromverbrauches in Deutschland durch BIPV zu decken [17].

Somit ist speziell für die Dünnschichtphotovoltaik ein Marktsegment für solaren Strom klar zu identifizieren.

### Kriterium 7 Inländische Wertschöpfung

Für die Beurteilung der inländischen Wertschöpfungskette der Dünnschichtphotovoltaik gilt es, die gesamte Wertschöpfungskette zu betrachten. Allgemein kann sie in zwei Abschnitte unterteilt werden. Der sogenannte „Upstream“ beschreibt die Produktion der Solarmodule vom Anlagen- und Maschinenbau über die Erzeugung der Ausgangsprodukte und Hilfsstoffe, die Solarzellen- bzw. Modulherstellung bis hin zu den erforderlichen Systemkomponenten wie z. B. Wechselrichter und Gestelle.

Der sogenannte „Downstream“ beinhaltet darüber hinaus die erforderlichen Dienstleistungen wie Installation, Monitoring und Wartung der PV-Anlagen.

Zwar ist der Upstream stark internationalisiert, jedoch kommt den deutschen Maschinenbauern der Photovoltaik eine besondere Rolle zu. Sie liefern mit einem Exportanteil von knapp 90% Produktionsanlagen und komplette „Turnkey-Systeme“ (= schlüsselfertige Produktionssysteme) weltweit [2]. Im CIGS-Bereich sind dies beispielsweise Manz CIGSfab und Solibro H-Tech, die zwar mit asiatischen Eigentümern agieren, aber auch weiterhin in Deutschland für den weltweiten Markt entwickeln und produzieren. Dünnschicht-PV-Modulhersteller wie Avancis und Solibro haben ebenfalls chinesische Eigentümer, produzieren aber ebenso in Deutschland. Sowohl die Maschinenbauer als auch die Modulhersteller haben

eine sehr starke internationale Konkurrenz aus dem asiatischen und dem US-amerikanischen Bereich vor allem für CIGS und CdTe. Trotzdem bilden die deutschen Standorte weiterhin wichtige Chancen für den heimischen Markt. Das gilt insbesondere für Hersteller, die BIPV-Produkte anbieten. In diesem Sektor ist die Nähe zum Markt eine wichtige Erfolgskomponente, da hier kundenspezifische Lösungen im Vordergrund stehen. In der organischen Photovoltaik agieren der Weltmarktführer Merck KGaA (Herstellung organischer Halbleiter) und die Solarmodul-Hersteller OPVius und Heliatek in Deutschland. Auch besitzt Deutschland eine sehr aktive und hochqualifizierte Forschungsinfrastruktur im Bereich nahezu aller Dünnschichtphotovoltaik-Technologien.

Im Downstream kann von einem rein nationalen Markt ausgegangen werden. Hier spielen vor allem die förderpolitischen und richtlinienbezogenen Randbedingungen die entscheidende Rolle für die Installationsbetriebe. Demgegenüber kommen Monitoring und Wartung bestehender Anlagen mehr und mehr eine wichtige Rolle zu. In Hinblick auf einen vermehrten Ausbau von bauwerksintegrierten PV-Lösungen ist zudem von einem steigenden Marktinteresse an entsprechend spezialisierten Planern auszugehen.

### Kriterium 8 Stand und Trends von Forschung und Entwicklung

Deutschland hat durch seine intensiven Maßnahmen der Marktförderung und der gezielten Förderung von Forschung und Entwicklung maßgeblich zu einem rasanten, weltweiten Wachstum der PV beigetragen. Motor dieser Entwicklung waren und sind die vielen Aktivitäten nationaler Forschungseinrichtungen und insbesondere ihre enge Vernetzung mit der deutschen und der internationalen Industrie entlang der gesamten Wertschöpfungskette (Upstream). So arbeiten diese auf allen Feldern der Dünnschicht-solarzellenentwicklung von Materialsynthese und -analyse, über die Identifizierung von Defektmechanismen bis hin zu Solarzellen und -modulen. Die oftmals sehr enge Verbindung mit industriellen Partnern ermöglicht dabei die anwendungsnahe Entwicklung/ Weiterentwicklung von solaren Bauelementen und Systemen. Auf den aktuellen Stand und die Trends der Dünnschichtphotovoltaik wurde bereits intensiv in den Abschnitten 2. und 3. eingegangen.

## 5. Zusammenfassung

Die Dünnschichtphotovoltaik hat zwar aktuell nur einen geringen Anteil an der weltweiten Stromproduktion, sie ist jedoch trotzdem weit mehr als ein Nischenmarkt. Inhärente Vorteile wie die hohe Produktivität bei der Herstellung auf großen Flächen, die Ästhetik, die Flexibilität in Form, Transparenz und Farbe sowie vergleichsweise gute Stromausbeuten bei schwacher Lichteinstrahlung oder Verschattungen ermöglichen ein breites Anwendungsfeld neben der klassischen, kristallinen Siliziumtechnologie. Insbesondere im Consumer-Bereich, bei mobilen Anwendungen und vor allem bei der Bauwerksintegration besteht zukünftig ein hohes Marktpotenzial. Dünnschichttechnologien wie Perovskitsolarzellen spielen eine zentrale Rolle für zukünftige hocheffiziente Stapelzellenkonzepte in Kombination mit kristallinem Silizium. Die aktuellen Themen der Forschung und Entwicklung sind u. a. die Erhöhung des Solarzellen- bzw. Modulwirkungsgrades, die Kostenreduktionen in der Herstellung und teilweise die Langzeitstabilität der Materialien und Bauelemente. Verschiedene Bauelemente und Konzepte für Anwendungen jenseits klassischer Freiflächenanlagen sind dabei ein zentrales Thema.

## Referenzen

- [1] Fraunhofer ISE, *Photovoltaics Report*, 2018.
- [2] S. Phillips, A. W. Bett, B. Rau und R. Schlattmann, „Technologiebericht TF1.3 Photovoltaik (in Technologien für die Energiewende),“ 2017.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung – Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung,“ 2011.
- [4] v. Autoren, „CIGS White paper,“ 2015.
- [5] M. Green und andere, „Solar cell efficiency tables (version 50),“ *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2017.
- [6] First Solar, „Press release,“ 5. Dezember 2017.
- [7] Solibro GmbH, „Pressemitteilung,“ Februar 2018.
- [8] M. Green und andere, „Solarcell efficiency tables (version 51),“ *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, 2017.
- [9] E. Unger und andere, „Roadmap and roadblocks for the band gap tunability of metal halide perovskites,“ *J. Mater. Chem. A*, Bd. 5, pp. 11401-11405, 2017.
- [10] K. A. Bush und andere, „23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability,“ *Nature Energy*, p. 17009, 2017.

- [11] C. O. Ramirez Quiroz und andere, „Balancing electrical and optical losses for efficient 4-terminal Si-perovskite solar cells with solution processed percolation electrodes,“ *J. Mater. Chem. A*, Nr. 6, pp. 3583-3592, 2018.
- [12] U. Pätzold und andere, „Scalable perovskite/CIGS thin-film solar module with power conversion efficiency of 17.8%,“ *J. Mater. Chem. A*, Nr. 5, pp. 9897-9906, 2017.
- [13] D. Landerer und andere, „Solar Glasses: A Case Study on Semi-transparent Organic Solar Cells for Self-Sustainable, Light-Weight and Mobile Smart Devices,“ *Energy Technol.*, Bd. 5, pp. 1936-1945, 2017.
- [14] S. Berny und andere, „Solar Trees: First Large-Scale Demonstration of Fully Solution Coated, Semitransparent, Flexible Organic Photovoltaic Modules,“ *Adv. Sci.*, Bd. 3, p. 1500342, 2016.
- [15] Heliathek, „Pressemitteilung,“ 2016.
- [16] C. T. Trinh und andere, „Potential of interdigitated back-contact silicon heterojunction solar cells for liquid phase crystallized silicon on glass with efficiency above 14%,“ *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Bd. 174, pp. 187-195, 2018.
- [17] R. Haselhuhn, Photovoltaik: Gebäude liefern Strom., B. F. K. BINE Informationsdienst, Hrsg., Fraunhofer IRB Verlag, 2010.



# Solare Wärme und Kälte

Der Beitrag präsentiert den aktuellen Stand sowie die Perspektive der Wärme- und Kälteerzeugung mit Hilfe solarthermischer Anlagen im Temperaturbereich bis zu ca. 150 °C. Anders als im vorherigen FVEE-Statusbericht von 2015 [1] wird hier die Nutzung der Photovoltaik zu diesem Zweck nicht behandelt, da diese Technologie separat analysiert und bewertet wurde. Die Kurzanalyse fasst die Ergebnisse der umfangreichen Studie im Rahmen des BMWi-Projektes „TF-Energiewende“ zusammen [2] und stellt zudem repräsentative Forschungsaktivitäten der FVEE-Mitglieder auf dem Gebiet vor.

## 1. Bestandsaufnahme

Die Solarthermie ist eine etablierte Technologie, die auf eine Tradition von über 40 Jahren zurückblickt. Ende 2016 waren in Deutschland 2,2 Mio. solarthermische Anlagen mit einer Fläche von 20 Mio. m<sup>2</sup> und einer installierten thermischen Leistung von 13,9 GWth in Betrieb. Damit wurden im gleichen Jahr insgesamt 7,5 TWh Solarwärme produziert und ca. 2 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden [3]. Eingesetzt werden diese Anlagen vor allem für die Wärmeversorgung von Ein- bis Zweifamilienhäusern, wo sie den Verbrauch fossiler Brennstoffe üblicherweise um 20–30% (Raumheizung und Trinkwarmwasser) bzw. 50–60% (nur Trinkwarmwasser) reduzieren.

Mit einem Anteil an der gesamten Wärmeerzeugung von ca. 0,6% bleibt die Solarthermie aber noch weit entfernt von ihrem großen Potenzial, das von den im erwähnten Projekt „TF-Energiewende“ analysierten Zukunftsszenarien bis auf fast 100 TWh für das Jahr 2050 geschätzt wird. Damit könnten solarthermische Anlagen ca. 12% des gesamten Wärmebedarfs abdecken und einen bedeutenden Beitrag zum Erfolg der Energiewende leisten. Eine solche Entwicklung würde nicht nur zu ökologischen Vorteilen sondern auch zu Kosteneinsparungen im Vergleich zu den „Business-As-Usual“-Projektionen führen.

Dass die dabei angenommene Kostendegression realistisch ist, zeigt eine aktuelle Studie der Universität Kassel [4]. Hier wurden die Kosten solarthermischer Anlagen im Verhältnis zur kumulierten Produktionsmenge analysiert und ihre bisher nicht wahrgenommene „Lernfähigkeit“ bewiesen (► *Abbildung 1*).

Für eine prominente Positionierung der Solarthermie als Wärmetechnologie in einem zukünftigen Energieversorgungssystem mit ausgeprägter Sektorenkopplung spricht auch ihre hohe Integrationsfähigkeit und Kompatibilität.

Auf dem Weg zur vollständigen Dekarbonisierung kann sie als verbrauchssenkende Effizienzmaßnahme die Treibhausgasemissionen noch vorhandener fossiler



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

Prof. Dr. Oliver Kastner  
oliver.kastner@isfh.de

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

Tom Cordes  
tom.cordes@helmholtz-berlin.de

Fraunhofer ISE  
Dr. Wolfgang Kramer  
wolfgang.kramer@ise.fraunhofer.de

ZAE Bayern  
Manuel Riepl  
manuel.riepl@zae-bayern.de

Markus Pröll  
markus.proell@zae-bayern.de

Lars Staudacher  
lars.staudacher@zae-bayern.de

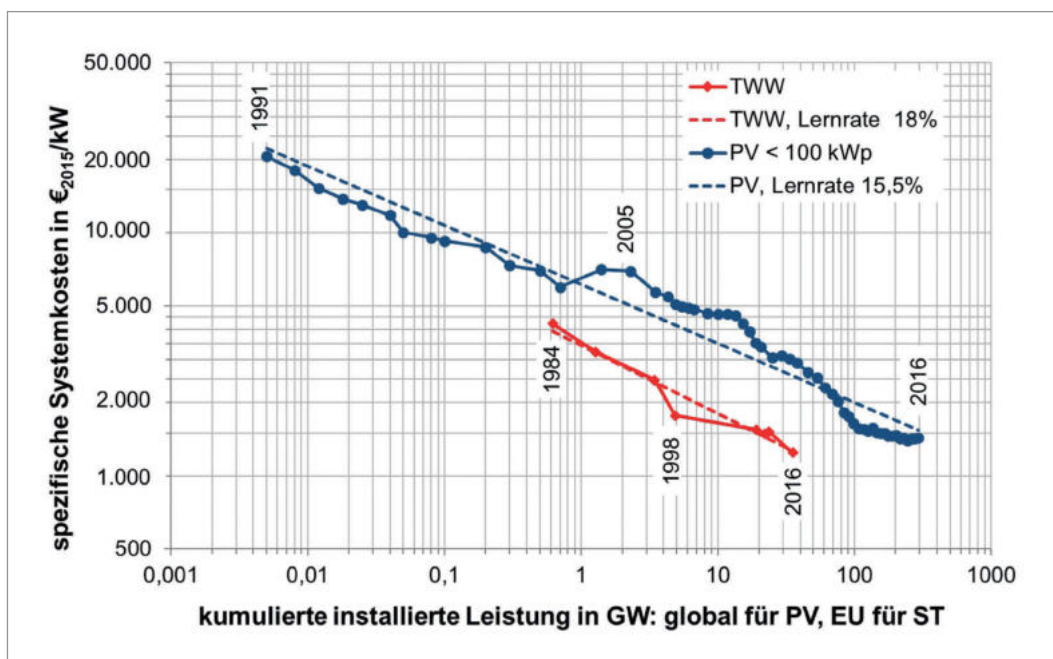


Abbildung 1  
**Kostendegressionen**  
von solarthermischen  
Trinkwarmwasser-  
anlagen und  
photovoltaischen  
Systemen im Vergleich.  
Quelle: Universität Kassel [3]

Wärmeerzeuger deutlich reduzieren, ohne dass besondere Anforderungen an Versorgungsinfrastrukturen oder Gebäudestandards zu stellen sind.

In Kombination mit regenerativen Erzeugern erhöht sie die Gesamteffizienz der resultierenden Systeme. Besonders zu erwähnen ist die vorteilhafte Kopplung mit der Wärmepumpe. Hier ist die Leistungssteigerung der kombinierten Lösung und die entsprechende Entlastung des Stromnetzes zu nennen sowie die Gewährleistung eines nachhaltigen Betriebs der hocheffizienten Sole-Wasser-Wärmepumpen durch eine sehr effektive Regeneration des Erdreiches.

Ein weiteres Beispiel für Kompatibilität und Integrationstauglichkeit ist die Nutzung von Solaranlagen in Systemen mit multifunktionalen Langzeitspeichern.

Damit diese Szenarien Realität werden, sind aber neue, nicht nur technologische Impulse dringend erforderlich. Unter den aktuellen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen lässt sich die sehr schwache Marktentwicklung der letzten Jahre nur durch besser geeignete politische Instrumente umkehren. Diese Problematik betrifft nicht nur die Solarthermie, sondern allgemein die Umsetzung der Energiewende im Wärmebereich. Notwendige Maßnahmen sind:

- eine wirksame CO<sub>2</sub>-Bepreisung fossiler Brennstoffe
- ambitioniertere ordnungsrechtliche Vorgaben für den Einsatz erneuerbarer Wärmeerzeuger im Gebäudebereich

Die übergeordnete Aufgabe der Forschung besteht unter diesen Voraussetzungen darin, die am besten passende Einsatzbereiche zu identifizieren und entsprechende Lösungen dafür zu entwickeln bzw. zu optimieren. Ein interdisziplinärer Ansatz, der sowohl im technischen Bereich unterschiedliche Branchen und Technologien (Wärme und Strom, erneuerbare und nicht erneuerbare Bereiche) einbezieht, als auch weitere nicht technische Aspekte mitberücksichtigt, wird in einem so komplexen Transformationsprozess immer wichtiger.

Für die Niedertemperatur-Solarthermie bleibt die Senkung der Wärmegestehungskosten ein zentrales Ziel. Dieses Ziel kann durch die Entwicklung neuer Komponenten und Systeme, die eine einfachere Herstellung und Installation sowie einen wartungsarmen Betrieb ermöglichen, aber auch durch die Erarbeitung alternativer Vertriebsmodelle erreicht werden. Neue Lösungen sind ebenso erforderlich um den Substitutionsgrad fossiler Brennstoffe durch Solarwärme deutlich zu erhöhen: Damit gemeint sind sowohl die Steigerung des solaren Deckungsanteils (> 50%) als auch die effiziente Integration der Solarthermie in CO<sub>2</sub>-neutrale Wärme- und Energieversor-

gungssysteme. Mit Bezug auf die Anwendungen soll schließlich die bisherige starke Beschränkung auf die dezentrale Wärmeversorgung von Ein- und Zweifamilienhäusern überwunden und die komplexeren Marktsegmente Mehrfamilienhäuser, netzgebundene Wärmegestehung, industrielle Prozesswärme und Kälteerzeugung erschlossen werden.

## 2. Laufende FVEE-Forschungsaktivitäten

### 2.1 Kostenreduktion

Für die Senkung der Wärmegestehungskosten werden im Forschungsverbund Erneuerbare Energien unterschiedliche Ansätze verfolgt, die die Vielseitigkeit der Thematik widerspiegeln.

Am Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH) wird in verschiedenen Bereichen eine systemorientierte Komponentenentwicklung betrieben, die auf die Reduzierung des Aufwandes sowohl für Investitionen als auch für den Betrieb der Anlagen zielt.

In den letzten Jahren sind z. B. neuartige Gravitationswärmerohre (heatpipes) für den Einsatz in stagnationssicheren thermischen Kollektoren untersucht worden (BMW, FKZ 0325550). Nach grundlegenden Arbeiten zur Optimierung des zweiphasigen Wärmetransportes in den Wärmerohren und der Anbindung zwischen Wärmerohren und Sammler ist es dieses Jahr in Kooperation mit den Industriepartnern KBB Kollektorbau, Narva Lichtquellen und AkoTec gelungen, sowohl Vakuumröhrenkollektoren als auch Flachkollektoren zu realisieren, die bei vergleichbarer Systemleistung die maximalen Temperaturen im Solarkreis auf 125 °C – üblicherweise sonst über 200 °C – begrenzen (► *Abbildung 2*). Damit lässt sich die Verdampfung des Wärmeträgers, die unter typischen Druckbedingungen bei 130 bis 140 °C stattfindet, komplett unterbinden und es können einfachere und wartungsarme Systeme mit kostengünstigeren Komponenten (Rohrleitungen aus Kunststoff, kleineren Kompensationsgefäßen) umgesetzt werden. Basierend auf bisherigen Ergebnissen sowie Herstellerangaben wird dadurch eine Senkung der Wärmegestehungskosten bis zu 30% erwartet. Aktuelle Aktivitäten zielen jetzt auf die Entwicklung, die Erprobung im Feld und die Bewertung dieser neuartigen Solaranlagen.

Das Fraunhofer ISE untersucht dagegen im Verbundprojekt TEWISol (BMW, FKZ 0325558) einen innovativen, ganzheitlichen Ansatz zur Optimierung des Preis-/Leistungsverhältnisses von solarthermischen Anlagen. Dabei werden wirtschaftswissenschaftliche Methoden der Wertanalyse, des Komplexitätsmanagements und der Prozesskostenanalyse mit modernen, technischen Methoden der Anlagensimulation und

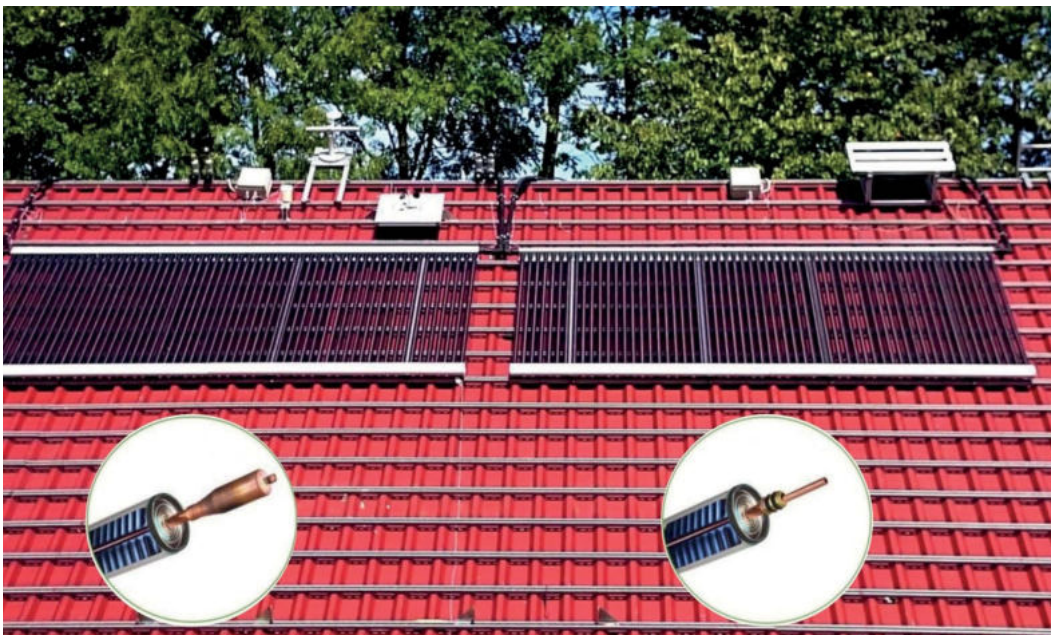
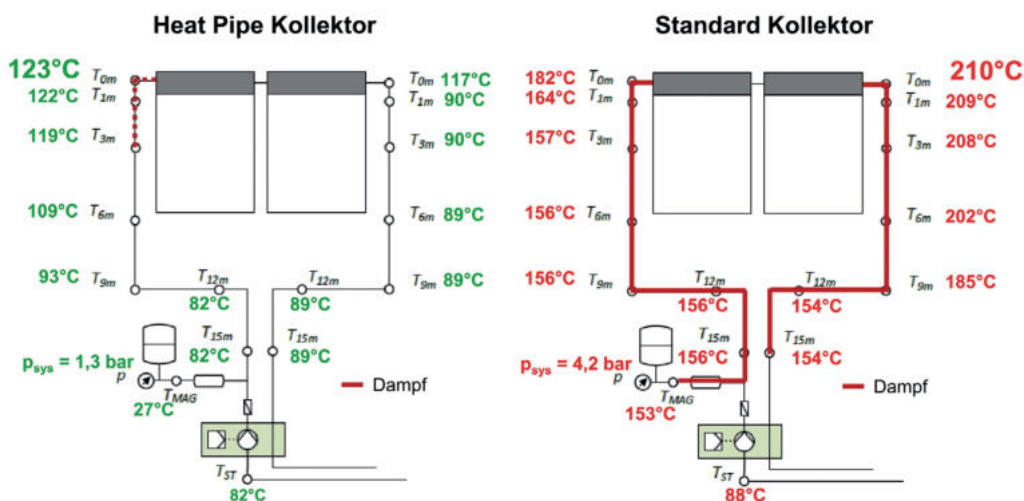


Abbildung 2  
**Heatpipes für stagnationssichere thermische Kollektoren**

Vergleichende Untersuchung:  
Links: schaltende Heatpipe Vakuumröhrenkollektoren  
Rechts: Standard-Kollektoren

Die Abbildung zeigt jeweils die Testanlage und gemessene Temperaturen im Solarkreis während einer typischen Stagnationsphase.  
Quelle: ISFH



der Messtechnik kombiniert (► [Abbildung 3](#)). Im Fokus stehen dabei vor allem die indirekten Kosten, welche heute bei vielen Unternehmen höher als die direkten Fertigungskosten sind. Diese integrierte Vorgehensweise erlaubt unter anderem Kosten zu quantifizieren, welche durch die Komplexität von Produkten und die Vielfalt im Produktportfolio entstehen. Berücksichtigt wird hierbei die komplette Prozesskette von Komponentenlieferanten über Systemhersteller bis zur Installation durch den Handwerker. Optimierungskriterium ist die Minimierung der Vollkosten für den Kunden im Verhältnis zum Wärmeertrag des Systems. Als Ergebnis dieser Optimierung soll sich eine Kostensenkung für den Endkunden von mehr als 20% ergeben. Projektpartner sind das Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen, die Firma Meibes System-Technik GmbH sowie der Installationsbetrieb SWB Herten.

## 2.2 Hocheffiziente dezentrale Wärmeversorgung im Wohnungsbau

Im Wohnungsbau liegt ein Forschungsschwerpunkt bei der Entwicklung und Erprobung von hocheffizienten, solarbasierten, dezentralen Wärmeversorgungs-konzepten.

Am ISFH wird beispielsweise schon lange die Kombination von Sole/Wasser-Wärmepumpen und Solarthermie untersucht. Im laufenden Projekt „Terra-Solar-Quelle“ (BMW, FKZ 03ET1275) wurde das Potenzial der solaren Regeneration von Erdwärmekollektoren mit nicht abgedeckten thermischen sowie photovoltaisch-thermischen Kollektoren gezeigt. Basierend auf Simulationen sowie experimentellen Untersuchungen an realen Systemen hat das Projekt bewiesen, dass dadurch die erforderliche Fläche für die Erdwärmekollektoren um mehr als 50% reduziert

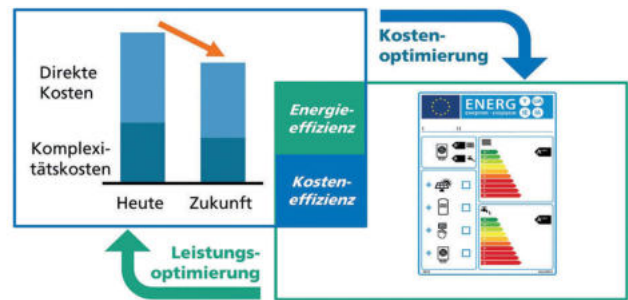
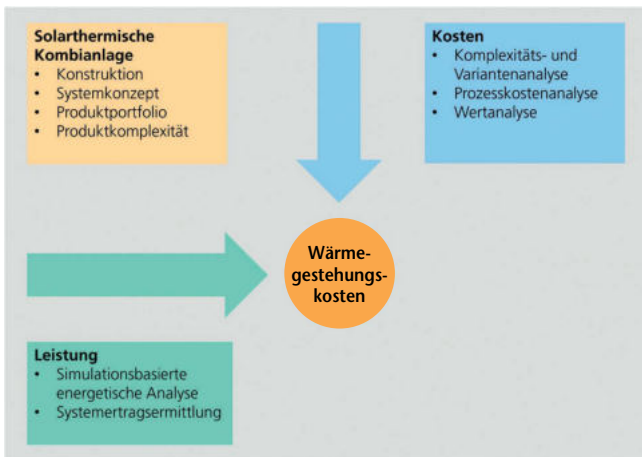


Abbildung 3

**Methodischer Ansatz zur Minimierung der Wärmegestehungskosten von solarthermischen Kombianlagen im Projekt TEWISOL.**

Quelle und Copyright: Fraunhofer ISE

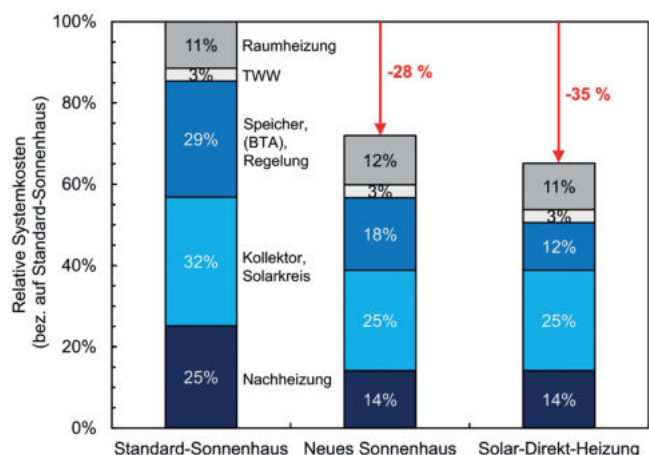
werden kann, bei vergleichbarer Leistung und Wirtschaftlichkeit. Somit steigen die Attraktivität und die Wettbewerbsfähigkeit dieser Wärmepumpensysteme, die oft aufgrund ihres hohen Platzbedarfes nicht eingesetzt werden.

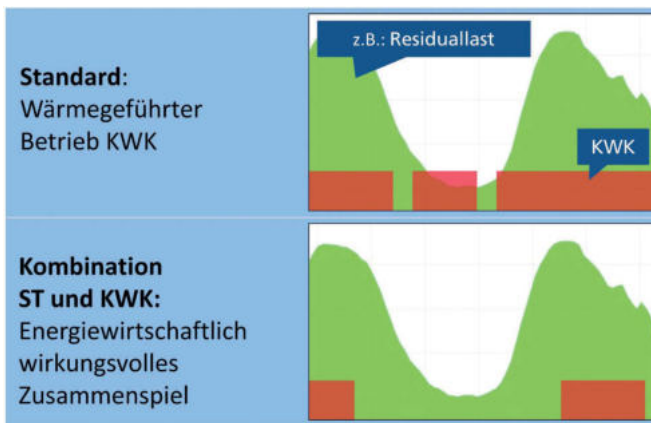
Bei den sogenannten Sonnenhäusern (Gebäude die überwiegend mit Solarwärme beheizt werden) wurden dagegen neue optimierte Konzepte entwickelt und untersucht. Als Beispiel wird hier das Projekt „SH-T-OPT“ (BMW, FKZ 0325981 und 0325559) erwähnt, das vom ISFH in Kooperation mit dem Massivhaus-Anbieter Helma bearbeitet wurde. Der grundlegende Ansatz besteht darin, das Speichervolumen der typischen Sonnenhäuser von 7–8 m<sup>3</sup> auf ca. 1 m<sup>3</sup> zu reduzieren und die fehlende Speicherkapazität durch die thermische Aktivierung der Gebäudemasse zu kompensieren. Anhand eines realen und über zwei Jahre untersuchten Gebäudeprototyps konnte nicht nur ein vergleichbarer solarer Deckungsanteil (51 %), sondern auch eine signifikante Senkung der Kosten bis zu 30 % gegenüber konventionellen Sonnenhäusern erreicht werden (► *Abbildung 3*).

Abbildung 4

**Realisiertes neues Konzept von Sonnenhaus und ermittelte Kosteneinsparungen.**

Quelle: ISFH





nomische, ökologische, soziologische sowie energiesystemtechnische Bewertungsmuster erarbeitet und angewendet. Ziel ist insbesondere eine zeitlich hochaufgelöste energetische Bewertung von Solarthermie mit Wärmepumpensystemen, die mit am Gebäude erzeugtem PV-Strom betrieben werden.

### 2.3 Nicht etablierte Anwendungsbereiche: Wärmenetze, Prozesswärme und Kälteerzeugung

Parallel zur dezentralen Wärmeversorgung von Gebäuden bieten auch Wärmenetze eine vielversprechende Plattform für die Integration und Kombination verschiedener regenerativer Quellen. Solarthermisch unterstützte Anlagen werden seit über 20 Jahren in Deutschland realisiert, wobei die Aktivitäten in der letzten Zeit deutlich intensiviert wurden. Mitte 2017 waren ca. 50.000 m<sup>2</sup> Solaranlagen im Betrieb, über 60.000 m<sup>2</sup> befanden sich aber in der Realisierungs- oder in der Planungsphase.

Hauptaufgabe der Forschung ist hier, wettbewerbsfähige Konzepte zu erarbeiten und in der Praxis zu demonstrieren.

Im Rahmen des Vorhabens „EnWiSol“ (BMW, FZK 0325544) untersucht beispielsweise das Fraunhofer ISE die dezentrale Einbindung von solarthermischen Anlagen in ein auf einem Blockheizkraftwerk (BHKW) basierendes Wärmeversorgungskonzept für das Neubaugebiet Gutleutmatten in Freiburg im Breisgau. Der Anlagebetrieb wird dabei hinsichtlich bestmöglicher Interaktion des BHKW mit dem Stromnetz und Minimierung der Verteilverluste des Nahwärmenetzes optimiert (► *Abbildung 5*). Es wird dabei das Ziel verfolgt, das Wärmenetz im Sommer über längere Zeiträume stillzulegen. Neben der konkreten Demonstration eines innovativen Integrationsansatzes, soll im Projekt die Rolle der Solarthermie in der Versorgung urbaner Quartiere unter aktuellen und zukünftigen energiewirtschaftlichen Randbedingungen und mit einer integralen Betrachtung der

Sektoren Strom und Wärme bewertet werden. Die städtebauliche Entwicklung läuft seit 2013, wobei das Fernwärmenetz sowie die sich auf den jeweiligen Gebäuden befindlichen Kollektoranlagen zur Versorgung der ersten fertiggestellten Wohngebäude im Sommer 2016 in Betrieb genommen wurden.

Ein weiteres noch nicht etabliertes Einsatzgebiet, das in den letzten Jahren in der Forschung intensiv untersucht wurde, ist die Bereitstellung industrieller Prozesswärme. Die langsame Marktentwicklung trotz steigenden Interesses und sehr günstiger Förderbedingungen (BAFA Marktanreizprogramm) lässt sich neben der noch mangelnden Bekanntheit beim Endnutzer vor allem auf die sehr hohen wirtschaftlichen Anforderungen der Branche zurückführen. Bei der Verwendung der Amortisationszeit als Entscheidungskriterium für die Investitionen werden hier Investitionen für die Integration solarer Wärme in der Regel durch produktionsbezogene Investitionen abgefangen. Um die Marktpenetration zu beschleunigen, ist es somit erforderlich, neben der Entwicklung und Demonstration von technischen Lösungen, alternative Finanzierungsansätze zu erarbeiten und zu erproben.

Ein aktuelles Beispiel in diese Richtung stellt das Projekt TrustEE (EU, FZK 696140) dar, das vom Fraunhofer ISE in Kooperation mit weiteren europäischen Partnern bearbeitet wird. Das Projekt zielt auf die Einrichtung technischer Unterstützungsinstrumente und vertraglicher Rahmenbedingungen, die den Aufbau eines speziellen Investitionsvehikels für Investitionen in Energieeffizienz und erneuerbare Energie in verschiedenen Industriesektoren ermöglichen. Im Rahmen des Projekts wird eine Online-Plattform für die Einreichung von Investitionen entwickelt, die eine automatische technisch-wirtschaftliche Machbarkeit von Investitionsvorschlägen ermöglicht. Die Online-Plattform wird 2018 öffentlich zugänglich sein, so dass ein Projektportfolio zusammengestellt werden kann, das für die Anziehung potenzieller Drittanleger geeignet ist.

Abbildung 5  
**Kombination von KWK und Solarthermie für die netzgebundene Wärmeversorgung des Neubaugebietes Gutleutmatten in Freiburg im Breisgau – Konzept und Realisierung.**  
Quelle und Copyright: Fraunhofer ISE (li.), Stadt Freiburg (re.)

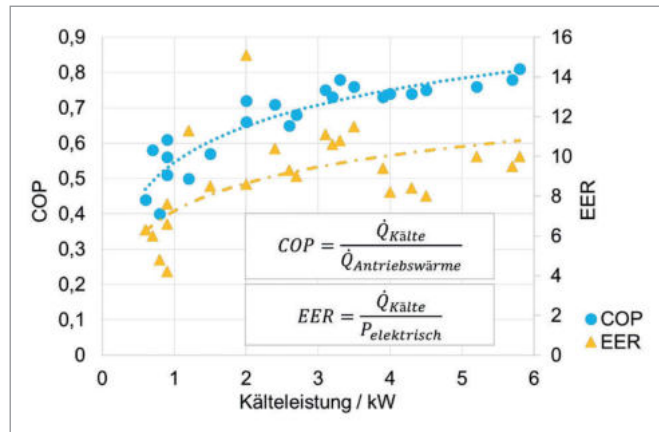


Abbildung 6

**Multivariable Absorptionskältemaschine/-wärmepumpe mit integriertem Hydraulikmodul und Speicher sowie experimentelle Ergebnisse im Kühlbetrieb.**  
Quelle: ZAE Bayern

Als letztes Marktsegment wird schließlich die solare Kälteerzeugung betrachtet. Dieser Bereich ist heute in Deutschland für nur 2% des gesamten Endenergieverbrauches verantwortlich und spielt damit eine untergeordnete Rolle für die nationale Wärmewende. Entwicklungen auf dem Gebiet adressieren vor allem die Märkte in Asien und im Nahen Osten, wobei bei steigendem Kältebedarf sowohl im Nicht-Wohnungsbau als auch im Komfortwohnungsbau selbst in Mitteleuropa mit einer zunehmenden Bedeutung zu rechnen ist.

Perspektivisch zukunftssträchtige Anwendungsbeispiele zeigen zwei FVEE-Projekte mit sehr unterschiedlichen Ansätzen:

In einem Verbundvorhaben aus GFZ, HZB, TU Berlin und HTW Berlin sowie dem omanischen Institute of Advanced Technology wird das Potenzial der solarthermischen Klimatisierung zur Entlastung des öffentlichen Stromnetzes in sonnenreichen Ländern mit hohem Kühlbedarf am Beispiel eines Freizeitgebäudes im Maskat (Oman) untersucht. Bisherige Simulationsergebnisse zeigen, dass durch die starke Korrelation zwischen Kühllast und Strahlungsangebot sowie die sehr hohen Kollektorserträge (bis zu 1000 kWh/m<sup>2</sup>) eine vollständig autarke Kälteversorgung mit einer einfachen und kostengünstigen Lösung ohne saisonale Speicherung unter diesen extremen Klimabedingungen erzielbar ist. Das System besteht aus 1400 m<sup>2</sup> doppelt abgedeckten Flachkollektoren, 250 m<sup>3</sup> Wasserspeicher und einer Absorptionskältemaschine (Li-Br) mit einer Nennleistung von 320 kW. Die häufig verwendete feuchte Rückkühlung soll hier mit einer wassersparenden Kombination aus trockener Rückkühlung und Einbindung des Erdreiches ersetzt werden. Das Konzept soll bis 2020 umgesetzt und experimentell verifiziert werden.

Im Rahmen eines deutsch-finnischen Forschungsprojektes wurde dagegen von den Partnern VTT, Savo Solar und dem ZAE Bayern ein solarthermisches Heiz- und Kühlsystem entwickelt, das die Wärme- und Kälteversorgung eines Bürogebäudes in Mikkeli (Finnland) übernimmt. Das Herzstück der Anlage bildet eine multivariable Absorptionskältemaschine (AKM) mit einer Nennleistung von 10 kW sowie zusätzlicher Wärmepumpenfunktion und integriertem Hydraulikmodul mit intelligenter Regel- und Steuereinheit (► *Abbildung 6*, links). 18 Flachkollektoren, von denen die Hälfte mit am ZAE Bayern neu entwickelten Glas-Folien-Verbundelementen ausgestattet ist, erzeugen im Sommer die Antriebswärme für die AKM bei Temperaturen zwischen 65 und 100 °C. Der überschüssige Solarertrag wird von einem integrierten, 2 m<sup>3</sup> Pufferspeicher mit einer am ZAE Bayern entwickelten optimierten Schichtladeeinheit gespeichert. Als Backupwärmequelle kommt Fernwärme zum Einsatz. Zudem besteht die Möglichkeit den trockenen Rückkühler zur „Freien Kühlung“, vor allem in den Morgenstunden, zu verwenden. Die Ergebnisse der im Jahr 2017 abgeschlossenen wissenschaftlichen Begleitung beweisen die sehr gute Teillastfähigkeit des Systems: Bei Kälteleistungen von 3 kW (30% der Nennleistung) wird schon ein COP<sub>Kälte</sub> von über 0,7 erreicht. Ab 2 kW wird bereits ein Energy Efficient Ratio (EER<sub>Kälte</sub>) des Gesamtsystems zwischen 8 bis 15 erreicht (► *Abbildung 6*, rechts). In der Übergangszeit dienen die Flachkollektoren parallel zur Fernwärme als Niedertemperatur-Wärmequelle für die Absorptionswärmepumpe. Da der optimierte Pufferspeicher über die Wärmepumpe bis auf eine Temperatur von etwa 5 °C ausgekühlt werden kann, ist es möglich, trotz geringerer Einstrahlung und niedriger Umgebungstemperaturen, einen signifikanten Solarertrag zu erwirtschaften. Während der Heizperiode liegt der COP<sub>Wärme</sub> der Wärmebereitstellung zwischen 1,4 bis 1,6 und der entsprechende EER<sub>Wärme</sub> zwischen 15 bis 20. Die Kosten der multivariablen AKM, inklusive des Hydraulikmoduls, liegen bei ca. 1000 € pro kW<sub>Kälte</sub>.

## Literatur

- [1] Giovannetti F.; Kramer W.; Kramer K.; Wiemken E.; Binder J.; Reuß M.; Beikircher T.; Jäger H.; Hafner B. (2015): Solare Wärme: Bedeutung, Potenzial, Forschungsaufgaben. FVEE-Themen 2015.
- [2] Giovannetti F.; Kastner O.; Lampe C.; Reineke-Koch R.; Park S.; Steinweg J. (2018): Technologiebericht 1.4 Solare Wärme und Kälte. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken (im Druck).
- [3] Bundesverband Solarwirtschaft e. V. (2017): Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (<https://www.solarwirtschaft.de>)
- [4] Orozaliev J.; Werner F.; Vajen K. (2018): Learning Curve of Solar Thermal Heating Systems. In: Proceedings Solar World Congress / IEA SHC Conference 2017, Abu Dhabi (im Druck).

# Solarthermische Kraftwerke



**DLR**  
Prof. Dr. Robert Pitz-Paal  
robert.pitz-paal@dlr.de

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

**ISE**  
Dr. Peter Nitz  
wolfgang.kramer@ise.fraunhofer.de

**WI**  
Dr. Julia Terrapon-Pfaff  
julia.pfaff@wupperinst.org  
Dr. Thomas Fink  
thomas.fink@wupperinst.org

Ole Soukup  
ole.soukup@wupperinst.org

## Zusammenfassung

Der Schutz des Klimas und die dafür erforderliche Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien ist eine globale Herausforderung, welche nach maßgeschneiderten Lösungen für die unterschiedlichen Klimazonen und Märkte der Erde verlangt. Die verstärkte Solarenergienutzung spielt dabei eine maßgebliche Rolle. Die Rolle Deutschlands als Exportnation beschränkt sich hierbei nicht auf die Klimawende im eigenen Land, sondern beinhaltet auch den weltweiten Export erneuerbarer Energietechnologien.

Die Kosten der photovoltaischen Stromerzeugung (PV) und der Windkraft sind in den vergangenen Jahren erfreulicherweise deutlich gesunken, entsprechend wurden in vielen Ländern große Kapazitäten zugebaut. Die resultierende stark gestiegene Einspeisung fluktuierender Erzeuger stellt Netzbetreiber vor neue Herausforderungen, insbesondere durch die extremen Lastschwankungen für plan- und steuerbare, heute größtenteils fossil befeuerte konventionelle Kraftwerke.

Hier bieten solarthermische Kraftwerke (► *Abbildung 1a*) Parabolrinnenkraftwerk; *1b*) Solarturmkraftwerk)

Lösungen: Sie bestehen aus großen Feldern von konzentrierenden Kollektoren, die Hochtemperaturwärme mit einer Temperatur von mehr als 400 °C bereitstellen, die in einem konventionellen Kraftwerksblock zur Stromerzeugung genutzt wird. Durch die Zwischenspeicherung der Wärme in großen thermischen Energiespeichertanks können sie in sonnenreichen Ländern Solarstrom flexibel und nach Bedarf produzieren.

Die Stromgestehungskosten solarthermischer Kraftwerke für planbare elektrische Energie sanken in den letzten Jahren bereits deutlich von rund 30 €/ct/kWh auf heute unter günstigen Einstrahlungs- und Finanzierungsbedingungen etwa 6 €/ct/kWh. An weiteren deutlichen Kostensenkungen muss jedoch auch zukünftig gearbeitet werden, um die noch sehr schmale Marktbasis von einigen hundert Megawatt pro Jahr signifikant zu verbreitern. FVEE-Einrichtungen arbeiten seit vielen Jahren zusammen mit der Industrie im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten an dieser Zielsetzung, was im Folgenden anhand einiger Beispiele erläutert wird:

## 1. Markt und Kostensituation

In ► *Abbildung 2* werden die verschiedenen Ausbauphasen für solarthermische Kraftwerke gezeigt:

- Phase 1: Erste kommerzielle solarthermische Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von 350 MWe wurden bereits Mitte der 1980er Jahre in Kalifornien installiert.
- Phase 2: Eine großtechnische Markteinführung erfolgte aber erst ab dem Jahr 2007 vor allem in Spanien und den USA, angetrieben durch Förderprogramme für die Markteinführung von erneuerbaren Energien.
- Phase 3: Seit 2013 erfolgte der weitere Ausbau in zahlreichen Ländern des Sonnengürtels wie z. B. Südafrika, Marokko, Vereinigte Arabische Emirate oder China. Bis Ende 2016 waren etwa 5,2 GW an Anlagen am Netz, sehr viele von ihnen mit großen thermischen Energiespeichern, die einen Betrieb des Kraftwerks nach Sonnenuntergang zwischen 3 bis mehr als 12 Stunden ermöglichen.

Während der Markteinführung in Spanien wurde anfänglich eine Einspeisevergütung von knapp 30 ct/kWh gezahlt. Die Kosten sind seitdem stark gefallen und erreichen heute unter günstigen Randbedingungen Werte von etwa 6 ct/kWh. Neben

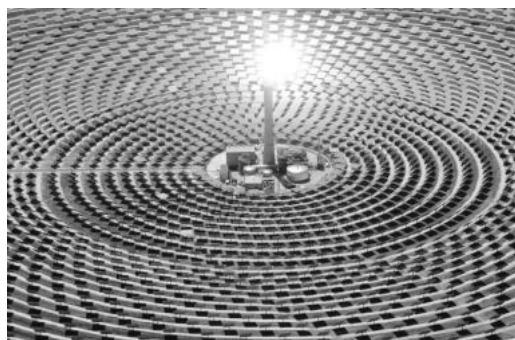
Abbildung 1

### Solarthermische Kraftwerke:

**a) Parabolrinnenkollektorsysteme,** bei denen ein Thermoöl in einem bestrahlten Rohrleitungsnetz durcherhitzt wird  
Quelle Solar Millennium



**b) Solarturmsystem,** bei dem der Sonne nachgeführte Spiegel einen Rohrbündelwärmeübertrager auf der Spitze eines Turmes bestrahlen, in dem eine Salzschnmelze als Wärmeträgerfluid zirkuliert



Quelle Gemasolar solar thermal plant owned by Torresol Energy © Sener



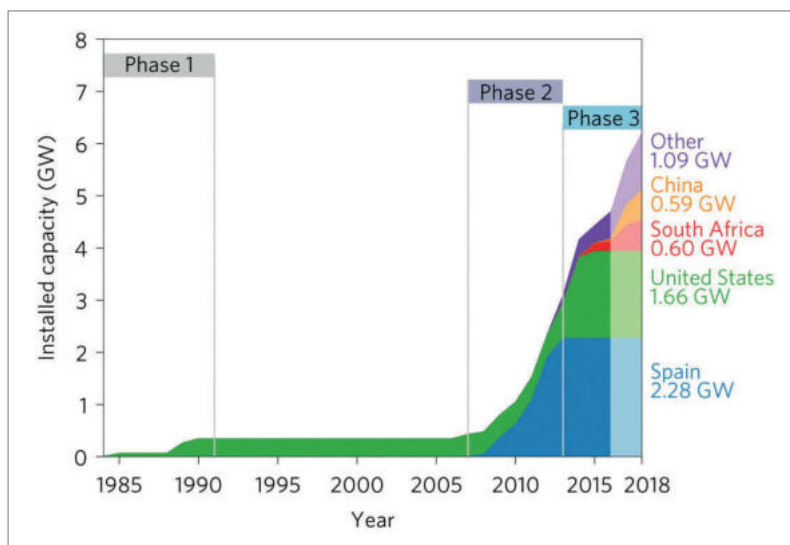


Abbildung 2

**Installierte Kapazität aller solarthermischen Kraftwerke weltweit als Funktion der Zeit**

(Bild nach Lilliestam, J., Labor- dena, M., Patt, A. & Pfenninger, S. *Nat. Energy* 2, 17094 (2017)).

technischen Innovationen sind vor allem Skalierungseffekte, langfristige Stromabnahmeverträge und ein verstärkter Wettbewerb um Schlüsselkomponenten wesentliche Treiber für die Kostensenkung.

Insbesondere die Kombination von PV-Kraftwerken, die den Strom an sonnenreichen Standorten für unter 3 ct/kWh produzieren können, mit solarthermischen Kraftwerken, die mittels ihrer Wärmespeicher erst am späten Nachmittag, während Wolken durchgängen oder Sandstürmen und in der Nacht den Strom produzieren, erlaubt eine Rund-um-die-Uhr-Versorgung, die wettbewerbsfähig mit fossilbefeuerten Gas- und Dampfturbinen Kraftwerken ist. Gleichzeitig vermeiden sie die Volatilitätsrisiken in Bezug auf den Brennstoffpreis sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen und bieten ein erhebliches lokales Wertschöpfungspotenzial in den Zielmärkten.

**2. Forschungsansätze zur Markteinführung und Kostensenkung**

Forschung und Entwicklung zielen darauf ab, die Effizienz von Komponenten und Systemen zu verbessern und gleichzeitig die Herstellungskosten zu senken.

Ein wesentlicher Treiber dafür ist die im System erzielte obere Prozesstemperatur, die heute bei 400 °C für Parabolrinnen und bei 560 °C für Solarturmkraftwerke liegt. Höhere Prozesstemperaturen erlauben es, die Umwandlung von Wärme in Strom effizienter zu gestalten. Dafür werden alternative Wärmeträgerfluide benötigt, die die Wärmeenergie auf diesem Temperaturniveau gut aufnehmen und speichern können.

Ein weiterer Ansatz bezieht sich darauf, digitale Techniken zum Einsatz zu bringen, um Betrieb und Wartung der großen Solarfelder zu optimieren. Eine Markteinführung dieser Technologien muss neben

den Kosten weitere Kriterien berücksichtigen, um erfolgreich zu sein. Auf diese drei Aspekte wird im Folgenden näher eingegangen.

**2.1 Neue Wärmeträgerfluide**

Wärmeträgerfluide müssen neben guten Wärmeübertragungseigenschaften auch über eine gute Temperaturstabilität für den Einsatzbereich oberhalb von 550 °C sowie geringe Kosten verfügen. Drei Materialklassen stehen hiermit im Fokus: kostengünstige Salzmischungen, die im Einsatzbereich flüssig und möglichst wenig korrosiv sind, inerte keramische Partikel und Flüssigmetalle. Ihre Einsatzmöglichkeiten werden im Folgenden diskutiert:

*Salzschmelze*

Bereits heute werden Schmelzen aus Nitratsalzen (40% KNO<sub>3</sub>, 60% NaNO<sub>3</sub>) bei Temperaturen bis 560 °C als Wärmeträgerfluid und gleichzeitig auch Speichermedium kommerziell eingesetzt. Ein Forschungsansatz zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung ist die Untersuchung neuer Salze und Mischungen mit tieferen Erstarrungs- und höheren Betriebstemperaturen. Dabei müssen auch Materialverträglichkeiten und Korrosionsbeständigkeit berücksichtigt und verbessert sowie eine geeignete Anlagentechnik entwickelt werden.

Ein Ansatz, der hierzu am Fraunhofer ISE verfolgt wird, ist die Verwendung von Ein-Tank-Schichtspeichern, die im Vergleich zu den aktuellen Zwei-Tank-Speichern Kosteneinsparungen versprechen. An dem aufgebauten Prototyp-Speicherteststand (► *Abbildung 3*) konnte erfolgreich eine sehr gute Schichtung (Trennung von kälterer und wärmerer Schmelze durch Dichteunterschiede) nachgewiesen werden. Die vergleichsweise kleinskalige Versuchsanlage erlaubt den Test neuer Materialien sowie von Füllkörpern, um die Kosten weiter zu senken.

Abbildung 3  
**Ein-Tank-Speicherteststand**  
 für Salzschnmelzen des Fraunhofer ISE. Eine sehr gute Schichtung der Salzschnmelze im Speicher (links im Bild) konnte erfolgreich nachgewiesen werden.  
 Quelle Fraunhofer ISE



#### Partikel

Kommerzielle Partikel aus Bauxit sind sehr kostengünstig und bis zu 1.000 °C stabil. Noch wichtiger ist, dass die dunklen Partikel direkt mit der konzentrierten Sonnenstrahlung erhitzt werden können. Dieses Merkmal, das als „direkte Absorption“ bezeichnet wird, reduziert den Bedarf an teuren Hochtemperaturlegierungen für Rohrleitungen erheblich. In ersten Studien wurde das Kostenreduktionspotenzial auf bis zu 16 % im Vergleich zu den Solarturmsystemen mit geschmolzenem Salz geschätzt.

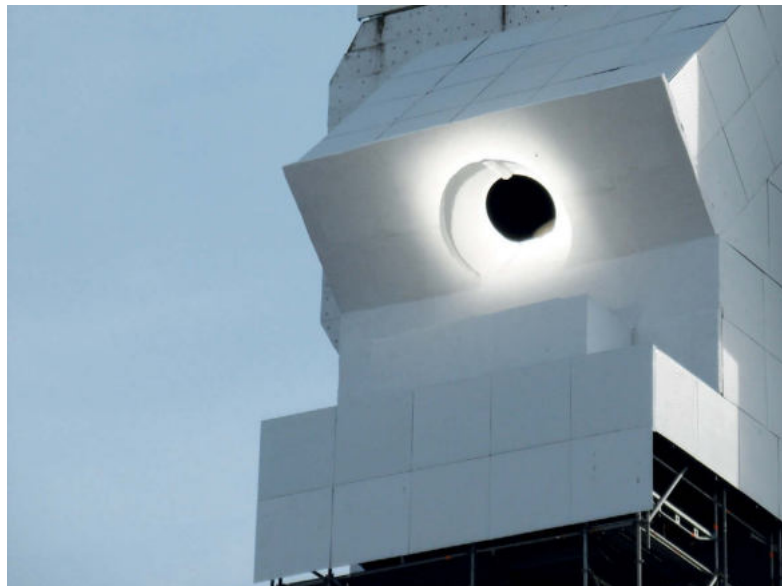
Im DLR wird das Konzept des rotierenden Zentrifugalreceivers (► [Abbildung 4](#)) verfolgt. Die Partikel werden gegenüber der Strahlungseintrittsöffnung eingeführt und bewegen sich langsam an der rotierenden Zylinderwand, wo sie durch Zentrifugal-

kräfte gehalten werden. Eine geeignete Einstellung der Rotationsgeschwindigkeit steuert die Verweilzeit im Receiver und ermöglicht somit die Kontrolle der Temperatur. Nach Labortests im 10-kW-Maßstab bis zu Austrittstemperaturen von 900 °C erfolgte eine Skalierung in den 500 kW Maßstab, die zurzeit auf dem Solarturm in Jülich getestet wird.

#### Flüssigmetalle

Flüssige Metalle sind in einem breiten Temperaturbereich von ca. 100 °C bis hin zu Temperaturen über 1000 °C als flüssige Wärmeträgermedien einsetzbar und zeichnen sich dabei durch vorteilhafte thermophysikalische Eigenschaften aus. Für leichte Metalle wie Lithium, Natrium, Kalium und ihre Legierungen, aber auch schwere Metalle wie Zinn, Blei, Wismut und deren Legierungen liegen langjährige Einsatzer-

Abbildung 4  
**Test eines Zentrifugalpartikelreceivers**  
 mit einer Leistung von 500 kWth auf der Testplattform des DLR-Solarturms in Jülich  
 Quelle DLR



fahrungen aus speziellen Bereichen vor. Hierzu gehören metallurgische Prozesse, die Glasherstellung und die Kerntechnik. Die hervorstechendsten Merkmale der Flüssigmetalle sind ihre Hochtemperaturstabilität und ihre gegenüber konventionellen Flüssigmedien zeh- bis hundertfach höhere Wärmeleitfähigkeit. Beide Eigenschaften ermöglichen höhere und inhomogenere Strahlungsdichten an den Absorbern, welche u. a. in eine erhebliche Verkleinerung der spezifischen Absorberflächen und damit verbundene Kostenvorteile übersetzt werden können.

Zwischen DLR und KIT besteht eine enge und komplementäre Zusammenarbeit bei der Erforschung und Entwicklung von flüssigmetallbasierten Receiversystemen [Fritsch2017, Fleisch2017]. Am KIT wird dazu ein Forschungsansatz verfolgt, der alle flüssigmetallspezifischen Aspekte zukünftiger Solarturmkraftwerke umfasst. Dazu gehören Grundlagenfragen zur Thermofluidynamik [Marocco2016], Fragen des Anlagenbetriebs und der Sicherheit [Fleisch2015], Forschung zu Korrosionsbeständigkeit und Korrosionsschutz von Strukturmaterialien bei Verwendung mit Flüssigmetallen [Kap. 6 in Heinzel2017] bis hin zu Möglichkeiten der direkten Wandlung von Wärme in Elektrizität in flüssigmetallbasierten elektrochemischen Wandlern [Onea2015]. Auch der Einsatz als innovatives Arbeitsmedium in thermochemischen Prozessen [Geißler2016] und Optionen zur thermischen Speicherung beim Einsatz von Flüssigmetallen [Niedermeier2016] werden hier untersucht.

## 2.2 Nutzung von Digitalisierungstechniken für Betrieb und Wartung

Die Nutzung insbesondere hochauflösender optischer Sensoren und die automatische Bildverarbeitung der damit aufgenommenen großen Datenmengen ermöglichen einen zunehmend besseren Betrieb und einen verringerten Wartungsaufwand. Hier ist es das Ziel, möglichst viele Informationen zu koppeln. Im Folgenden werden dazu zwei Beispiele vorgestellt.

### Heliostatfeldsteuerung

Eine neue Kombination aus modulierter Nachföhrbewegung von Heliostaten, hoch auflösenden Kameras und geeigneter Bildverarbeitungsalgorithmen erlaubt einen Abgleich von Soll- und Ist-Position von Brennflecken aller Heliostaten eines Turmkraftwerkes im laufenden Betrieb. Damit werden sowohl der Aufbau und die erstmalige dabei notwendige Kalibrierung der Heliostaten sowie die Regelung und die Kontrolle der Kalibrierung im Betrieb durch einen geschlossenen Regelkreis wesentlich vereinfacht (► *Abbildung 5*, schematisch).

Die am Fraunhofer ISE entwickelte Methode wurde bereits erfolgreich im Labor und prototypisch im Feld getestet. Die Weiterentwicklung und Anbindung an kommerzielle Steuerungen sind Gegenstand laufender Aktivitäten.

### Qualitätskontrolle mittels Flugdrohnen

Nutzt man hochauflösende Digitalphotographie in Verbindung mit Flugdrohnen, ist es möglich, die optisch großen Solarkollektorfelder in sehr kurzer Zeit und ohne Einfluss zu qualifizieren (► *Abbildung 6*).

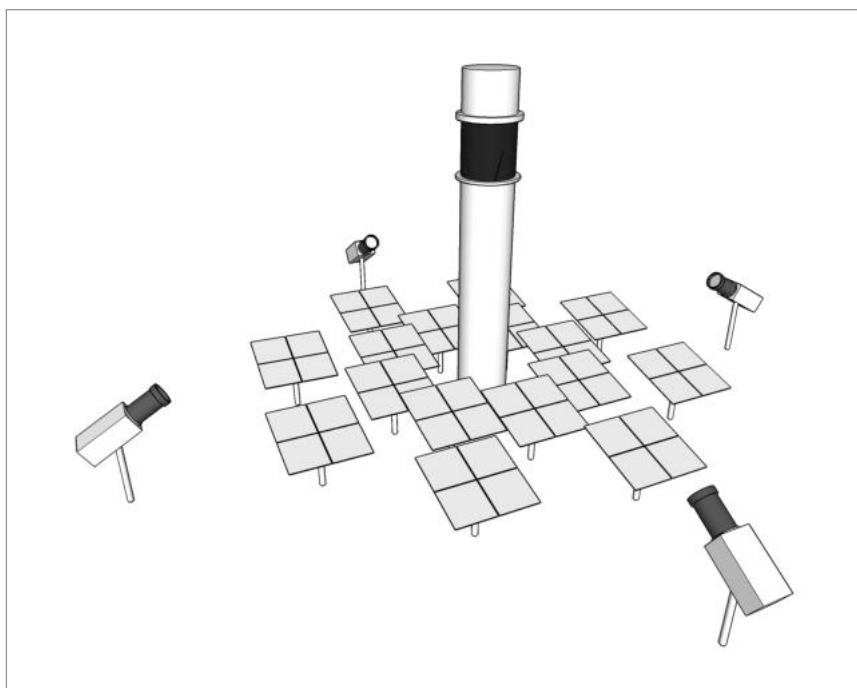


Abbildung 5

**Optimierte Nachführung von Heliostaten:** Schematischer Einsatz von digitaler Kamera-technik und Bildauswertung für die Nachführung von Heliostaten in Turmkraftwerken in einem geschlossenen Regelkreis. Durch die eingesetzten Algorithmen kann die Regelung im laufenden Betrieb erfolgen.

Quelle Fraunhofer ISE

Abbildung 6  
**Flugdrohnen**  
 mit hochauflösender  
 Digitalkamera beim  
 Überflug über ein  
 Solarfeld.  
 Quelle: DLR



Dabei wird das Spiegelbild des Absorberrohrs in den Spiegelfacetten des Kollektors genutzt, um die Formabweichung und Richtungsabweichung des Spiegels vom Idealzustand zu ermitteln. Mittels numerischer Modelle lässt sich daraus die optische Effizienz des Kollektorfeldes orts aufgelöst bestimmen. Dies gibt dem Betreiber des Kraftwerks wichtige Hinweise in Bezug auf die Steuerung seiner Anlage und die Notwendigkeit zur Nachjustierung seiner Kollektoren.

### 2.3 Akzeptanzforschung

Neben diesen technologischen und ökonomischen Aspekten spielen die politische und gesellschaftliche Akzeptanz allgemein und vor Ort eine wichtige Rolle für den weiteren Ausbau von solarthermischen Kraftwerken. Partizipative Multi-Stakeholderprozesse sowie empirische Feldforschung können dabei helfen, das Wissen über die komplexen Beziehungen zwischen verschiedenen Optionen zur nftiger Stromerzeugung, nachhaltiger Entwicklung und gesellschaftlichen Präferenzen zu verbessern und so die Akzeptanz von solarthermischen Kraftwerken zu erhöhen.

#### *Partizipative Strategieentwicklung und Entscheidungsunterstützung*

Im Rahmen des Projekts MENA SELECT wurden beispielsweise mittels partizipativer Szenarienentwicklung, Stromsystemmodellierung sowie empirischer Feldforschung verschiedene Strommixmaptionen für drei ausgewählte Länder (Marokko, Jordanien und Tunesien) mit vielfältigen lokalen Akteuren und Entscheidungsträgern entwickelt und diskutiert. Abschließend wurde mit Hilfe einer Multi-Kriterien-Analyse ein Ranking der verschiedenen Strommixmaptionen für die drei untersuchten Länder erstellt. Laut diesem Ranking weisen durch die beteiligten Stakeholder-Gruppen bevorzugte Szenarien in allen drei Zielländern bis zum Jahr 2050 hohe Anteile erneuerbarer Energien auf. Im Mix verschiedener

erneuerbarer Erzeugungstechnologien spielen dabei auch solarthermische Kraftwerke (mit installierten Leistungen im ein- bis zweistelligen GW-Bereich) eine wichtige Rolle.

#### *Evaluierung von sozioökonomischen Auswirkungen*

Untersuchungen am Beispiel des solarthermischen Kraftwerks NOOR<sub>0</sub> I am Standort Ouarzazate in Marokko haben gezeigt, dass derartige Kraftwerke nicht nur erneuerbare Stromlieferanten für den steigenden Energiebedarf im südlichen Mittelmeerraum sind, sondern dass diese auch positive Effekte auf die regionale Entwicklung haben können. Die Studie hat zudem gezeigt, dass Planung und Bau von NOOR<sub>0</sub>I durch die lokale Bevölkerung bisher sehr positiv aufgenommen wurden. Gleichzeitig sind aber auch Befürchtungen, beispielsweise über mögliche Folgen des Kraftwerksbetriebs (z. B. Wasserbedarf), und die Entwicklungsbedürfnisse der lokalen Bevölkerung beim zukünftigen Ausbau von solarthermischen Kraftwerken zu berücksichtigen.

### 3. Perspektiven

Solarthermische Kraftwerke sind mit etwa 5 GW an installierter Kapazität weltweit noch eine vergleichsweise junge Technologie, die jedoch inzwischen flexiblen Strom zu sehr attraktiven Kosten anbieten kann und somit den weiteren Ausbau von fluktuierend einspeisenden erneuerbaren Technologien wie Wind und PV ermöglicht. Weitere rasche Kostensenkung erscheint auf der Basis jüngster Forschungsergebnisse möglich, insbesondere durch den Ausbau der oberen Prozesstemperatur und der damit verbunden Wirkungsgradsteigerungen. Die FVEE-Institute sind dafür gut aufgestellt, um gemeinsam mit der Industrie diese Innovationen umzusetzen.

## Referenzen

- [Flesch2015] Flesch, J., Fritsch, A., Cammi, G., Marocco, L., Fellmoser, F., Pacio, J., & Wetzel, T. (2015). Construction of a test facility for demonstration of a liquid lead-bismuth-cooled 10kW thermal receiver in a solar furnace arrangement-SOMMER. *Energy Procedia*, 69, 1259-1268.
- [Flesch2017] Flesch, J., Niedermeier, K., Fritsch, A., Musaeva, D., Marocco, L., Uhlig, R., ... & Wetzel, T. (2017, July). Liquid metals for solar power systems. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 228, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- [Fritsch2017] Fritsch, A., Uhlig, R., Marocco, L., Frantz, C., Flesch, R., & Hoffschmidt, B. (2017). A comparison between transient CFD and FEM simulations of solar central receiver tubes using molten salt and liquid metals. *Solar Energy*, 155, 259-266.
- [Geißler2016] Geißler, T., Abánades, A., Heinzl, A., Mehravaran, K., Müller, G., Rathnam, R. K., ... & Weisenburger, A. (2016). Hydrogen production via methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor with a packed bed. *Chemical Engineering Journal*, 299, 192-200.
- [Heinzel2017] Heinzel, A., Hering, W., Konys, J., Marocco, L., Litfin, K., Müller, G., ... & Weisenburger, A. (2017). Liquid Metals as Efficient High Temperature Heat Transport Fluids. *Energy Technology*.
- [Marocco2016] Marocco, L., Cammi, G., Flesch, J., & Wetzel, T. (2016). Numerical analysis of a solar tower receiver tube operated with liquid metals. *International Journal of Thermal Sciences*, 105, 22-35.
- [Niedermeier2016] Niedermeier, K., Flesch, J., Marocco, L., & Wetzel, T. (2016). Assessment of thermal energy storage options in a sodium-based CSP plant. *Applied Thermal Engineering*, 107, 386-397.
- [Onea2015] Onea, A., Hering, W., Palacios, J. L., & Stieglitz, R. (2015). AMTEC Clusters for power generation in a concentrated solar power plant. *Magnetohydrodynamics (0024-998X)*, 51(3).

# Research for the Transformation of the Global Energy System



NREL (U.S.A.)  
National Renewable Energy Laboratory  
Dr. Martin Keller  
Laboratory Director  
martin.keller@nrel.gov

In this lecture I would like to show the NREL's approach, what is happening on a global scale and where the trend is going.

## About NREL

In 2017 NREL celebrates 40 years of clean energy research. NREL has a lot of industry partnerships which helps to overcome the "valley of death". Our laboratories are very active to develop and de-risk technologies to help the industry to push out innovations into the market place.

## NREL's Portfolio

- renewable power: solar, wind, water, geothermal
- sustainable transportation: bioenergy, vehicle technologies, hydrogen
- energy efficiency: buildings, advanced manufacturing, government energy management
- energy systems integration: high-performance computing, data and visualizations

## Climate goals and renewables

What do we need to do to keep global warming below 2 °C? A real impact on climate change requires decarbonization of global energy systems. The need is great because energy consumption is predicted to grow 56% by 2040. Renewables are providing energy and cutting emissions, but there are challenges. Energy needs are spread across many end-use sectors. In the U.S., more than half of CO<sub>2</sub> emissions come from industrial and transportation sectors. There are a lot of gaps that research has to fill.

## Energy use in the U.S.

The U.S. economy is growing while energy use is shrinking. Gross domestic product (GDP) grew 12% since 2007, while total energy use fell 3,6%. So, the energy productivity of the U.S. economy – the ratio of U.S. GDP to energy consumed – grew 16%. (Source: 2017 Sustainable Energy in America Factbook, Bloomberg New Energy Finance and the Business Council for Sustainable Energy, February 2017) Renewables represent growing share of U.S. generation. Far from "alternative," renewable energy is the new normal in the United States. Global solar and wind generation show sharp increase.

## Costs for renewable technologies are falling.

This incredible increase was driven by falling costs, especially dramatic cost reductions for solar. Advanced energy technologies are providing real-world solutions. They drive a domestic energy economy

and are increasingly cost-competitive. Energy manufacturing and installations provide major opportunities for American workers.

## Creating global economic opportunity What's driving the momentum?

- Government commitments on national, state and community levels. Nearly 50 countries vow to use 100% renewables by 2050.
- Private sector commitments: There are 62 large U.S. companies which pledged that they are going 100% renewables.
- Investments
- Advancements in technology
- According to IRENA, decarbonizing global energy systems requires \$29 trillion of investment – only about 0,4% of GDP (2050)

## NREL's Research Activities

Continuing R&D is essential to transform the global energy system. These are some of the key fields we think it's important to make a change:

### 1. Solar Technologies

For solar technologies, a major goal is scale up to make a significant impact – 10 terawatts by 2030, or ~50% of world electricity generation. The cost of solar energy has fallen 96% and now stands at less than a dollar a watt for solar module, pre-installation. But this is still not good enough, so we need more research.

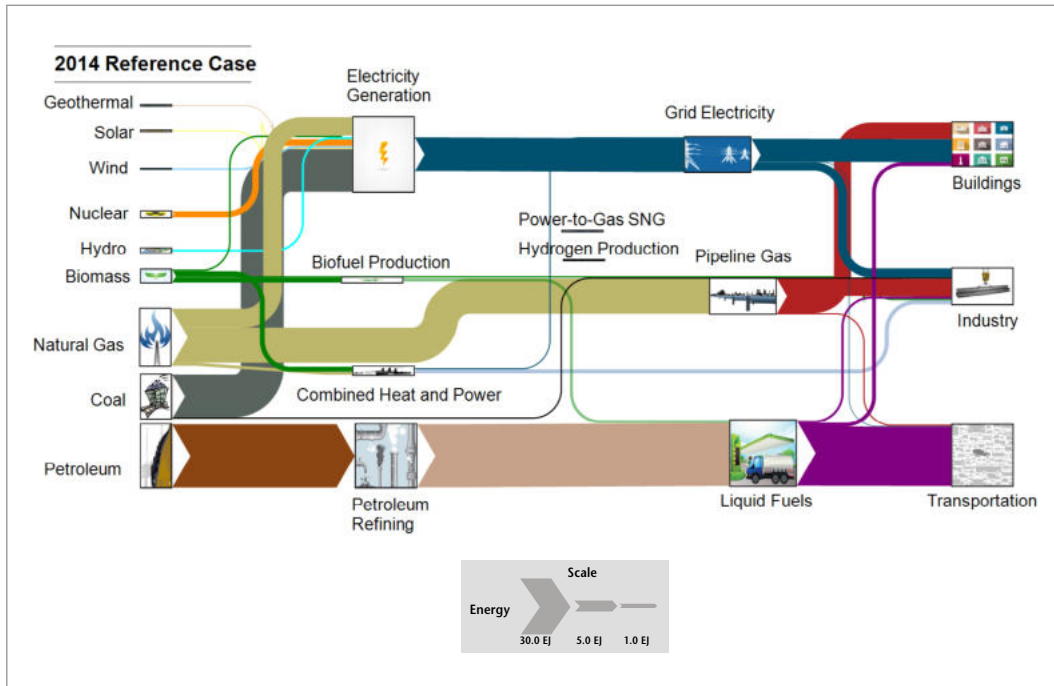
## Market Impact

- costs: from less than \$1 to \$6/W
- levelized cost of energy at 7-16 cents/kWh
- Solar provides nearly 1% of U.S. power generation.
- U.S. installed capacity at 45 GW
- Solar power employs nearly 374,000 U.S. workers.
- U.S. forecast (through 2040) is for nearly 40 GW of photovoltaic (PV) capacity in pipeline.

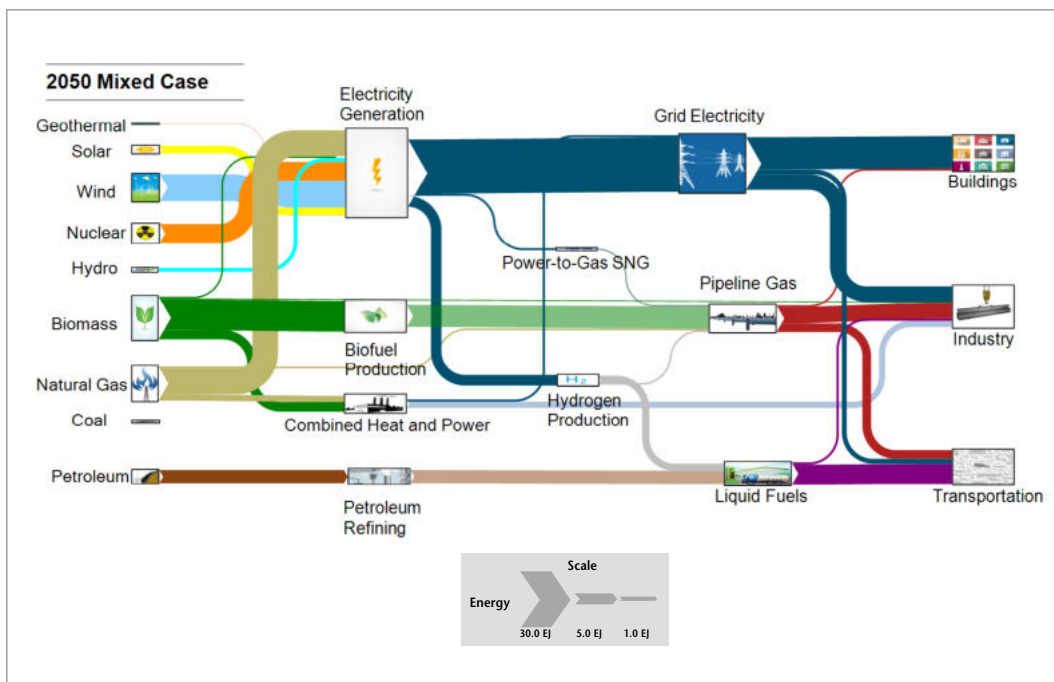
## Key Research Areas

- Providing rapid growth: perovskite technology has provided new materials with an efficiency of more than 20%.
- Boosting efficiency of modules high-efficiency thin films improve carrier lifetime of commercial products.

Decarbonization of global energy systems



Current Energy System (2014 Reference)  
 Source: DDPP (Deep Decarbonization Pathways Project),  
 Dr. Jim Williams, U.S. DDPP Director, NREL, 2016



Deeply Decarbonized Energy System (2050)  
 Source: DDPP (Deep Decarbonization Pathways Project),  
 Dr. Jim Williams, U.S. DDPP Director, NREL, 2016

- Increasing cell efficiency: research in silicon tandem cells improves the best cell efficiencies by 10%-30%.
- Improving applications for high-efficiency technologies: 1- and 2-junction III-V cells lower growth cost.

NREL's research activities for PV:

- materials
  - six-junction solar device: possible >50% efficiency
  - multijunction, III-V cells: efficiency >30%
  - Perovskites show steep climb in efficiency: 22.1% efficiency for most recent lab device and there is a potential for higher efficiencies and lower production costs, but we still have to work on stability.

Perovskite technology can completely change the way of manufacturing solar cells and help to actually manufacture the PV capacities needed. Hybrid Perovskite Solar Cells (HPSCs) could be manufactured more than 50 times faster than current silicon cells. Similar to newspaper production, HPSC manufacturing can use a roll-to-roll web printing method. Benefits of HPSCs are low-capex and high-volume manufacturing for PV.

- dual-junction III-V solar cell: world record 32.6% efficiency
- *next generation of manufacturing*
  - roll-to-roll consortium
  - perovskite inks
  - thin-film manufacturing – cadmium telluride
- *integration of renewables onto the grid*

## 2. Wind Energy

The U.S. wind industry is striving toward supplying 2% of the nation's electrical demand in 2030 – or four times the current installed wind capacity. Innovations have driven down the cost of wind energy as much as 90% between 2009 and 2016, enabling industry success.

### Market Impact

- Installed capital cost between \$1,300 and \$1,900/kW
- Costs: 4-7 cents/kWh
- U.S. ranks second in world for installed capacity at 82 GW.
- Wind provides about 6.2% of U.S. electricity.
- Wind power employs more than 101,000 U.S. workers.
- More than 500 wind-related manufacturing facilities in the U. S.

### Key Research Areas

- optimizing wind plants – individual wind turbine controls for improved performance
- eliminating transportation constraints – process for on-site production of turbine blades
- integrating with the grid – insights on higher wind generation in power grid through high-performance computing
- improving operations and reliability – modeling wake effects from wind turbines and their impact
- increasing offshore and distributed wind technologies – focus on new concepts, materials, and components
- accelerating market impacts – lightweight carbon fiber materials for turbine blades

## 3. Bioenergy

Bioenergy has a major push to scale up the technology to 60 billion gallons biofuel by 2030. NREL contributed to first-of-a-kind commercialization of cellulosic ethanol technologies in the United States.

### Market Impact

- integrated and scaled up bioconversion technology
- modeled cost-competitive production of cellulosic ethanol

### Key Research Areas

- Using refinery infrastructure that already exists – feasibility of co-processing pyrolysis oil (drop-in hydrocarbons) with Ensyn Corporation.
- Producing natural bioplastics, acids, and alkanes – pathway found in nature (lignin valorization) uses “waste” lignin.
- Developing new chemicals and materials – includes renewable carbon fiber, sustainable ammonia production, ethylene via sunlight, bioconversion of methane to lactate.

## 4. NREL's Vehicles Research

R&D breakthroughs provide efficient, high-performance, and market-ready transportation solutions for consumers and industry.

### Market Impact

- per capita consumer fuel economy savings of \$600/year
- potential annual supply of more than 30 billion gallons of fuel from domestic biomass feedstocks
- electric vehicle battery cost 70% less than 2008
- fuel efficiency standards with potential for \$170 billion cost savings for commercial truck operators
- fuel cell electric vehicle range of more than 300 miles

### Key Research Areas for Sustainable Transportation Technologies

- co-optimizing fuels and engines – R&D to maximize performance, efficiency, and compatibility with existing infrastructure
- increasing sustainable mobility – connected and autonomous transportation innovations for intelligent, efficient, integrated network
- reducing expense of battery development
- improving efficiency of heavy-duty vehicles – commercial truck fuel, engine, thermal management, and powertrain innovation
- demonstrating electrification of vehicles – energy storage for plug-in electric and fuel cell electric vehicles; power electronics; and infrastructure R&D to boost performance and market viability



## 5. Energy Systems Integration

We have to integrate the technology we already have but also to identify the gaps in the energy system. The aim is to fortify energy infrastructure at a pace and scale that matters.

### Research Focus Areas

- renewable electricity to grid integration
- vehicle-to-grid integration
- renewable fuels to grid integration
- battery and thermal energy storage
- microgrids
- large-scale numerical simulation
- cybersecurity and resilience
- smart home and building systems
- energy-water nexus
- high-performance computing, analytics, and visualization

### Advanced Energy System Design

This tool creates a computer model of energy systems. So researchers are coming up with a blue print which they can give to cities to help them to lay out their energy demand.

- High-Performance Computing (HPC) models enable interactive evaluation of potential power system design choices-wide variety of technology, infrastructure, operation, economic and policy possibilities.
- Additional integration opportunities: heating/cooling, hydrogen, natural gas, liquid transportation fuels, water and wastewater systems, and communications networks.
- Optimized energy system designs with higher reliability, security and resilience, affordability, and use of advanced technologies.

### Making progress on a global scale requires ...

- continued investment in innovation,
- integration of renewables and efficiency,
- partnering across political and socio-economic barriers.

## 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](mailto:fvee@helmholtz-berlin.de) • [www.fvee.de](http://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  
Dorothee Bürkle: Tel. 02203/601-3492  
dorothee.buerkle@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 Czaperek: 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 Halbleiternmaterialien 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

**Standort Garching**  
Walther-Meißner-Straße 6 • 85748 Garching  
Manuela Stepputtis: Tel. 089/329442-96  
pr@zae-bayern.de

**Standort Würzburg**  
Magdalene-Schoch-Straße 3 • 97074 Würzburg

**Standort Erlangen**  
Haberstraße 2a • 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 2017

### Innovationen für die 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 • Tel.: 030 8062-17138  
E-Mail: [fvee@helmholtz-berlin.de](mailto:fvee@helmholtz-berlin.de) • [www.fvee.de](http://www.fvee.de)

#### Redaktion

Petra Szczepanski  
Franziska Wunschick

#### Förderung

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

- BMWi
- BMBF
- BMU
- BMEL
- BMVI

#### Layout, Grafik

Hoch3 GmbH – Design- und Werbeagentur

#### Druck

Elbe Druckerei Wittenberg GmbH

Berlin, April 2018

ISSN • 0939-7582



**FVEE** ForschungsVerbund  
Erneuerbare Energien  
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](mailto:fvee@helmholtz-berlin.de) • [www.fvee.de](http://www.fvee.de)